

Р. Я. ИСАКОВИЧ
В. И. ЛОГИНОВ
В. Е. ПОПАДЬКО

**АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ
НЕФТЯНОЙ
И ГАЗОВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Р.Я. ИСАКОВИЧ,
В.И. ЛОГИНОВ,
В.Е. ПОПАДЬКО

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ нефтяной и газовой промышленности

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Электрификация и автоматизация горных работ»



МОСКВА "НЕДРА" 1983

Исакович Р. Я., Логинов В. И., Попадько В. Е. Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. Учебник для вузов. М., Недра, 1983, 424 с.

Изложены аналитические методы определения динамических характеристик действующих объектов, физико-химические закономерности протекания процессов в газожидкостных смесях, основы построения математических моделей. Рассмотрены технические средства автоматизации. Описаны системы автоматического управления нефтегазодобывающими предприятиями, объектами транспорта и хранения нефти и газа.

Для студентов нефтяных вузов, обучающихся по специальности «Электрификация и автоматизация горных работ». Может быть полезна специалистам, занятым разработкой систем автоматического управления предприятиями нефтяной и газовой промышленности.

Табл. 23, ил. 175, список лит.— 45 назв.

Рецензенты:

кафедра автоматизации производственных процессов (Уфимский нефтяной институт);

канд. техн. наук *Д. Н. Фрид* (ВНИИКАНефтегаз)

**Исакович Роман Яковлевич,
Логинов Владимир Иванович,
Попадько Владимир Ефимович**

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редакторы издательства *В. А. Куликова, Н. В. Сергеева*
Переплет художника *Ю. Г. Асафова*
Художественный редактор *В. В. Шутько*
Технические редакторы *Л. Н. Шиманова, Е. В. Воробьева*
Корректор *М. П. Курылёва*

ИБ № 3647

Сдано в набор 06.04.83. Подписано в печать 14.09.83. Т-16592. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 26,5. Усл. кр.-отт. 26,5. Уч.-изд. л. 26,91. Тираж 5800 экз. Заказ 1271/8314—8. Цена 1 р. 20 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

И 2501020000—365
043(01)—83 190—84

© Издательство «Недра», 1983

Развитие нефтяной и газовой промышленности СССР привело к увеличению за последние 20 лет добычи нефти (включая газовый конденсат) более чем в 4 раза, а газа — в 10 раз, чему в значительной степени способствовало повышение уровня автоматизации производственных процессов в отрасли. Под автоматизацией производственных процессов нефтяных и газовых промыслов следует понимать применение приборов, приспособлений и машин, обеспечивающих бурение, добычу, промысловый сбор, подготовку и передачу нефти и газа с промысла потребителю без непосредственного участия человека, лишь под его контролем. Автоматизация производственных процессов является высшей формой развития техники добычи нефти и газа, предусматривающей применение передовой технологии, высокопроизводительного и надежного оборудования.

Можно без преувеличения сказать, что улучшение технологии добычи нефти и газа, создание высокопроизводительного оборудования, повышение культуры производства, освоение новых нефтяных и газовых районов, рост добычи нефти и газа стали возможны благодаря развитию и внедрению автоматизации и совершенствованию управления с применением экономико-математических методов и электронно-вычислительной техники.

Автоматизация технологических процессов в настоящее время является важнейшим условием ускорения технического прогресса, повышения культуры производства, роста производительности труда.

Первые попытки автоматизации нефтяных промыслов относятся к 1951—1952 гг., когда на нефтяных промыслах Орджоникидзенефти (Азербайджанская ССР) была смонтирована система автоматизации и диспетчеризации нефтяных скважин. Однако из-за несовершенства автоматики, сложности аппаратуры дистанционного контроля и управления и малой надежности линий связи испытание системы не дало положительных результатов.

С 1951 по 1958 г. различные конструкторские организации, институты и специалисты на нефтепромыслах разрабатывали средства автоматизации отдельных операций процесса добычи нефти и аппаратуру телемеханизации. Было разработано большое число приборов, автоматов и телемеханической аппаратуры одного и того же назначения, но разных конструкций, что затрудняло организацию их массового производства, приводило к удорожанию процесса добычи нефти и низкой надежности. С 1958 г. начались работы по комплексной автоматизации нефтяных промыслов, предусматривающей автоматизацию всех

технологических объектов нефтедобывающего предприятия. Однако отсутствие типовых технологических схем промыслового сбора нефти и попутного газа сдерживало развитие автоматизации.

В 1968 г. были утверждены основные положения по обустройству и автоматизации нефтедобывающих предприятий, определены сроки разработки и изготовления новых средств автоматики и автоматизированного блочного технологического оборудования, утвержден план комплексной автоматизации новых и уже действующих нефтедобывающих предприятий. При этом в качестве базовой была принята однотрубная технология сбора нефти и газа.

Тем же путем шло развитие автоматизации и газовых промыслов. Системный подход при решении вопросов автоматизации технологических процессов, создание и внедрение автоматизированных систем управления позволили осуществить переход к комплексной автоматизации всех основных и вспомогательных технологических процессов бурения добычи и транспортировки нефти и газа.

В настоящее время $\frac{2}{3}$ всей добываемой нефти и природного газа получают с комплексно-автоматизированных нефтедобывающих и газодобывающих предприятий.

Автоматизированное блочное оборудование, успешно примененное впервые на нефтяных и газовых промыслах Татарии и Башкирии, обеспечило быстрый рост добычи и резкое снижение трудовых затрат. Этот метод обустройства нефтяных промыслов, примененный в сложных географических и суровых климатических условиях Западной Сибири, обеспечил быстрый ввод в эксплуатацию и освоение уникальных месторождений нефти и газа восточных районов страны.

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» заданиями по автоматизации нефтяной и газовой промышленности предусмотрено довести в 1985 г. удельный вес добычи нефти на комплексно-автоматизированных промыслах до 85—90 %, внедрять на газовых промыслах высокопроизводительные автоматизированные блочные установки по подготовке газа, осуществлять сооружение мощных магистральных газопроводов с высокой степенью автоматизации и эксплуатационной надежности.

Современные нефте- и газодобывающие предприятия представляют собой сложные комплексы технологических объектов, рассредоточенных на больших площадях, размеры которых достигают десятков и сотен квадратных километров. Технологические объекты (скважины, групповые измерительные установки, сепарационные установки, сборные пункты, установки комплексной подготовки нефти и газа, резервуарные парки) связаны между собой через продуктивный пласт и поток продукции, циркулирующей по технологическим коммуникациям. До-

быча нефти и газа производится круглосуточно, в любую погоду, поэтому для нормального функционирования нефтегазодобывающего предприятия необходимо обеспечить надежную работу автоматизированного оборудования, дистанционный контроль за работой технологических объектов и их состоянием.

Наиболее высокая эффективность работы газо- и нефтедобывающих объектов может быть достигнута при автоматическом управлении технологическими процессами в оптимальном режиме.

Под оптимальным автоматическим управлением технологическим объектом понимают функционирование объекта с автоматическим выбором такого технологического режима, при котором обеспечивается наибольшая производительность с наилучшим использованием энергетических и сырьевых ресурсов.

Технологические процессы бурения, добычи и транспортировки нефти и газа характеризуются значительным числом параметров, определяющих ход этих процессов, наличием внутренних связей между параметрами, их взаимным многообразным и сложным влиянием друг на друга и на течение всего процесса. Для того чтобы решить задачу создания системы оптимального автоматического управления технологическим процессом, необходимо его изучить, определить степень влияния характеризующих его параметров на выходные качественные и количественные показатели процесса.

Один из методов изучения — познание процесса через модели, представляющие собой упрощенные системы, отражающие отдельные, интересующие исследователя стороны явлений. Процесс моделирования заключается в установлении зависимостей между входными и выходными параметрами системы.

Наиболее удобным методом исследования сложных технологических процессов, позволяющим реализовать его на электронно-вычислительных машинах, отыскать оптимальные режимы ведения и условия управления процессом, является метод математического моделирования.

Математическая модель должна правильно отражать технологический процесс, его характерные особенности, но в то же время она не должна быть перегружена деталями, несущественными или не влияющими на решение поставленной задачи. Наличие в модели множества второстепенных факторов может усложнить анализ и затруднить решение задачи. В то же время следует иметь в виду, что от того, насколько правильно модель отражает характерные черты изучаемого процесса, зависят успех исследования и ценность полученных результатов.

ГЛАВА 1.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ РАЗМЕРНОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

§ 1. Размерности и критерии подобия

Из общего курса высшей математики известно, что решение многих задач существенно упрощается, если применять специально подобранные для них системы координат. Так, задачи для тел, обладающих центральной симметрией, как правило, удобно решать в полярной или сферической системе координат. Там, где встречаются эллипсоиды вращения, применяют эллиптические координаты. Для решения задачи о взаимодействии двух сфер удобна бисферическая система координат и т. д. Возникает вопрос, нельзя ли и при построении математической модели, после того как ее исходные переменные выбраны, перейти от них к новым переменным — новому базису, который будет обладать некоторыми преимуществами по сравнению с исходным? Для ответа на него проанализируем зависимость математической модели от размерностей базисных переменных.

Любое математическое соотношение между двумя и более размерными величинами не только показывает количественное равенство между этими величинами или их комбинациями, но и подразумевает выполнение равенств размерностей у сравниваемых величин.

Из равенства размерностей сравниваемых величин получаем, что в математическую модель размерные переменные должны входить в таких комбинациях, чтобы у последних была одинаковая размерность, неважно какая, но одинаковая. Не умаляя общности рассуждения, эту размерность можно считать нулевой. Действительно, если в модели сравниваются комбинации ненулевой размерности, то, разделив эти комбинации на одну из них, численно неравную нулю, перейдем к новым комбинациям переменных $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$, которые будут иметь нулевую размерность. Принимая величины $\Pi_i (i = \overline{1, n})$ за координаты нового базиса, запишем математическую модель в форме

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n) = 0. \quad (1.1)$$

В такой записи модель не зависит от выбора системы измерений основных переменных, что уже является большим преи-

муществом перед другими формами ее представления. Кроме того, размерность такого базиса обычно меньше числа исходных размерных переменных, а это существенно упрощает задачи построения и исследования моделей.

Учитывая удобство построения модели в безразмерном базисе, следует отметить неоднозначность его выбора. Она возникает из-за того, что любые произведения и степени безразмерных комбинаций будут также безразмерны. Устранить эту неопределенность из общих соображений нельзя. Разрешить ее можно только за счет учета дополнительной информации о моделируемом объекте или о точности измерений исходных переменных.

Переход к безразмерным переменным в модели рассмотрим на примере уравнения, связывающего в двух точках давление и скорость в ламинарном горизонтальном потоке жидкости:

$$p_1 - p_0 = \rho/2 (v_0^2 - v_1^2). \quad (1.2)$$

В это уравнение входят пять исходных переменных. Разделив правую и левую части на $\rho v_0^2/2$, получим его безразмерную форму:

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= 1 - \Pi_1; \\ \Pi_1 &= \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2; \quad \Pi_2 = \frac{2(p_1 - p_0)}{\rho v_0^2}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

которая определяется только двумя безразмерными переменными.

С методами теории размерностей связано понятие подобия моделируемых явлений, которое поясним на рассмотренном примере. Из формулы (1.3) видно, что отношение $\Pi_1 = (v_1/v_0)^2$ однозначно определяется безразмерным комплексом Π_2 . Эта зависимость обобщенная, так как любому числовому значению Π_1 в соответствие ставится бесчисленное множество частных случаев, соответствующих параметрам $(p_1 - p_0)$, ρ и v_0 при одном лишь условии, что составленная из них безразмерная комбинация Π_2 остается постоянной. Физические процессы, соответствующие этим частным случаям, называются *подобными*. Обобщая этот пример, можно сформулировать следующее общее определение подобных явлений. *Необходимым и достаточным условием для подобия двух моделируемых явлений одинаковой физической природы, характеризуемых одинаковыми наборами безразмерных базисных переменных $\Pi_i' (i = \overline{1, n})$ и $\Pi_i'' (i = \overline{1, n})$, является выполнение равенства $\Pi_i' = \Pi_i''$, $i = \overline{1, n}$.*

Переход от какого-либо явления к другому, ему подобному, с количественной стороны можно понимать как подобное преобразование характеризующих его размерных величин, т. е. как умножение каждой из них на некоторый постоянный множитель. Причем эти множители таковы, что они не изменяют величин безразмерных переменных Π_i .

Безразмерные базисные переменные часто называют критериями подобия. Многим из этих критериев, часто встречающихся на практике, присвоены собственные имена: критерий Рейнольдса, связывающий в безразмерный комплекс скорость движения жидкости v , характерный линейный размер потока d , вязкость жидкости μ и ее плотность ρ ($Re = vd\rho/\mu$), критерий Пекле — безразмерный комплекс из скорости потока, его характерного линейного размера и коэффициента диффузии D ($Re = vd/D$); критерии Прандтля, Эйлера, Архимеда, Фруда и многие другие.

§ 2. Построение безразмерных комплексов. П-теорема

Возможны два способа получения безразмерных комплексов (или критериев подобия). Один из них — логически последовательный вывод критериев из определяющих исследуемую зависимость уравнений. Этот путь называют теорией подобия. Второй способ, обычно называемый анализом размерностей, основан на построении безразмерных комплексов из исходных размерных величин, характеризующих исследуемое явление. И хотя анализ размерностей уступает в строгости теории подобия, он незаменим, когда теоретических уравнений нет или они слишком сложны для решения и исследования. Поскольку последняя ситуация наиболее часто встречается в инженерных исследованиях, основное внимание в дальнейшем уделяется анализу размерностей.

Рассмотрим задачу составления безразмерных комплексов из исходных размерных величин x_1, x_2, \dots, x_n . Из теории размерностей [23] известно, что размерность произвольной величины x_i , которую обозначим $[x_i]$, можно представить в виде

$$[x_i] = \prod_{j=1}^r [y_j]^{z_{ji}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.4)$$

где y_j — размерные величины, которые приняты за основные и которые иногда называют основными (или базисными) размерными категориями, а z_{ji} — действительные числа. Выбор величин y_j неоднозначен. Например, размерность давления, определяемого как величина силы, действующей на единицу поверхности, можно записать в виде $[p] = F/L^2$ и считать силу F и линейный размер L основными размерными категориями. Если же размерность силы выразить через категории массы, длины и времени, то получим $[p] = [M]L/T^2$. Обе эти записи для размерности давления эквивалентны, хотя и используют разные базисные размерные категории.

Безразмерные комбинации из исходных размерных величин будем образовывать путем их перемножения в соответствующих степенях k_i , что можно записать в виде

$$\Pi = x_1^{k_1} \cdot x_2^{k_2} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n}. \quad (1.5)$$

Учитывая условие, что размерность этой комбинации должна быть равна нулю, запишем следующую цепочку равенств:

$$[\Pi] = [x_1^{k_1} \cdot x_2^{k_2} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n}] = [x_1^{k_1}] \cdot [x_2^{k_2}] \cdot \dots \cdot [x_n^{k_n}] = \\ = [x_1]^{k_1} \cdot [x_2]^{k_2} \cdot \dots \cdot [x_n]^{k_n} = 0. \quad (1.6)$$

Заменяя $[x_i]$ на основании равенства (1.4) и группируя сомножители, получаем

$$\sum_{i=1}^n k_i z_{1i} [y_1] \cdot \sum_{i=1}^n k_i z_{2i} [y_2] \cdot \dots \cdot \sum_{i=1}^n k_i z_{ri} [y_r] = 0. \quad (1.7)$$

Поскольку размерности базисных категорий отличны от нуля, равенство (1.7) будет выполняться только при условии, что все показатели степеней одновременно равны нулю. Это условие эквивалентно требованию, чтобы величины k_i являлись решениями следующей системы линейных уравнений:

$$k_1 z_{11} + k_2 z_{12} + \dots + k_n z_{1n} = 0; \\ k_1 z_{21} + k_2 z_{22} + \dots + k_n z_{2n} = 0; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ k_1 z_{r1} + k_2 z_{r2} + \dots + k_n z_{rn} = 0. \quad (1.8)$$

Коэффициенты z_{ji} считаем известными, так как они определяются на основании соотношения (1.4).

Из линейной алгебры известно, что если ранг матрицы, составленной из коэффициентов системы линейных однородных уравнений, меньше числа неизвестных, то система уравнений будет обладать решениями, отличными от нулевого¹. Для определенности будем полагать, что ранг минора, составленного из коэффициентов при первых r неизвестных отличен от нуля. Переносим в каждом из уравнений (1.8) в правую часть все члены с неизвестными $k_{r+1}, k_{r+2}, \dots, k_n$ и принимая их равными величинам $c_{r+1}, c_{r+2}, \dots, c_n$, получаем линейную систему из r уравнений с r неизвестными:

$$k_1 z_{11} + k_2 z_{12} + \dots + k_r z_{1r} = c_{r+1} z_{1r+1} + \dots + c_n z_{1n}; \\ k_1 z_{21} + k_2 z_{22} + \dots + k_r z_{2r} = c_{r+1} z_{2r+1} + \dots + c_n z_{2n}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ k_1 z_{r1} + k_2 z_{r2} + \dots + k_r z_{rr} = c_{r+1} z_{rr+1} + \dots + c_n z_{rn}, \quad (1.9)$$

относительно k_1, k_2, \dots, k_r , обладающую единственным решением при любых величинах $c_{r+1}, c_{r+2}, \dots, c_n$. Придавая послед-

¹ Случай, когда ранг матрицы коэффициентов равен числу неизвестных и система уравнений (1.8) обладает единственным нулевым решением, не представляет для нас интереса.

Таблица 1

y	x				
	d	v	ρ	dp/dx	μ
L	1	1	-3	-2	-1
T	0	-1	0	-2	-1
M	0	0	1	1	1

ним различные значения, можно получить любое число решений. Однако только $n-r$ из них могут быть линейно независимыми и образовывать базис фундаментальной системы решений [27]. Все остальные решения являются линейными комбинациями базисных.

Выбор базисных решений неоднозначен, так как они должны удовлетворять только одному условию взаимной линейной независимости. Для придания процедуре построения базисных решений однозначности условилось получать их путем последовательного отождествления вектора величин $c_{r+1}, c_{r+2}, \dots, c_n$ с одним из $n-r$ векторов $(1, 0, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, 0, 1)$.

Рассмотрим процедуру построения безразмерного базиса при моделировании движения жидкости по горизонтальной трубе, которое определяет следующая система исходных размерных переменных: диаметр трубы d , скорость жидкости v , плотность жидкости ρ , перепад давления на единицу длины dp/dx и вязкость жидкости μ . Выбирая в качестве основных размерных категорий величины, характеризующие длину, время и массу, которые являются основными размерными категориями в системе единиц СИ, составим следующую таблицу величин z_{ij} (табл. 1).

Умножив каждый столбец таблицы на соответствующий коэффициент k_i , запишем следующую систему уравнений, аналогичную системе (1.8):

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 - 3k_3 - 2k_4 - k_5 &= 0; \\ -k_2 - 2k_4 - k_5 &= 0; \\ k_3 + k_4 + k_5 &= 0. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Определитель матрицы коэффициентов этой системы уравнений, составленный из коэффициентов при первых трех неизвестных, отличен от нуля. Переносим в правую часть уравнений члены с неизвестными величинами k_4 и k_5 , получаем

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 - 3k_3 &= 2k_4 + k_5; \\ -k_2 &= 2k_4 + k_5; \\ k_3 &= -k_4 - k_5. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Полагая неизвестные k_4 и k_5 поочередно равными 1 и 0, получим две системы уравнений:

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 - 3k_3 &= 2; & k_1 + k_2 - 3k_3 &= 1; \\ -k_2 &= 2; & -k_2 &= 1; \\ k_3 &= -1. & k_3 &= -1. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Их решениями будут два базисных вектора фундаментальной системы решений¹:

$$K_1 = (1, -2, -1, 1, 0); \quad (1.13)$$

$$K_2 = (-1, -1, -1, 0, 1),$$

которые определяют две безразмерные комбинации:

$$\Pi_1 = dv^{-2}\rho^{-1} \frac{dp}{dx} (\mu)^0 = d \frac{dp}{dx} / (\rho v^2); \quad (1.14)$$

$$\Pi_2 = d^{-1}v^{-1}\rho^{-1} \left(\frac{dp}{dx} \right)^0 \mu = \frac{\mu}{d\rho v}.$$

Таким образом, найденная безразмерная система координат имеет размерность два, в то время как исходная размерная система координат имела размерность пять.

С точки зрения математики процесс перехода от исходных размерных переменных к безразмерным является переходом к новой системе координат. Общность процедуры перехода к безразмерным координатам обычно формулируется в виде следующей теоремы, известной как П-теорема: *Если для однозначного описания физического процесса необходимо n величин, размерности которых могут быть выражены через t размерных категорий, то всегда можно перейти в новую систему координат, базис которой образован безразмерными комплексами и имеет размерность $n-t$.*

Согласно этой теореме, любое однозначное соотношение размерных переменных

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1.15)$$

можно заменить равнозначным, но зависящим от меньшего количества безразмерных переменных:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0. \quad (1.16)$$

До сих пор мы не обсуждали вопрос о выборе основных размерных категорий, считая, что они определяются некоторым естественным образом. В то же время из формулы (1.16) видно, что если их число можно увеличить, то тем самым

¹ Все остальные решения системы уравнений (1.10) можно выразить в виде линейной комбинации базисных векторов фундаментальной системы решений.

можно уменьшить размерность нового базиса модели. А можно ли это сделать и каково минимальное число безразмерных переменных? Ответ на эти вопросы содержится в модифицированной трактовке П-теоремы, из которой следует, что *число безразмерных комбинаций равно общему числу исходных переменных минус максимальное число этих переменных, не образующих безразмерные комбинации.*

При построении безразмерных комбинаций в ряде задач может быть полезно следующее дополнение к П-теореме. В его основе лежит исследование физической природы исходных размерных переменных (или функций), которое сводится к утверждению, что *одинаковые размерности можно сокращать только у функций, имеющих одинаковую физическую природу.* Так, в пространственной задаче, характеризуемой двумя размерами в направлении осей x и y , эти размеры нельзя отождествлять, так как их измерение производится в разных плоскостях.

§ 3. Выбор безразмерного базиса

Полученные в § 2 безразмерные координаты Π_1 и Π_2 нового базиса не являются единственно возможными при решении рассмотренной задачи. Например, если при решении системы уравнений (1.10) придавать различные значения не переменным k_4 и k_5 , как это было сделано, а каким-либо двум другим, то получим другие безразмерные комбинации. Поскольку по две переменных из пяти можно выбирать 10 различными способами, то из решения системы уравнений (1.10) можно получить 10 вариантов координат безразмерного базиса. Однако независимыми из них будут только пять¹

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= d \frac{dp}{dx} / (\rho v^2), \quad \Pi_2 = d\nu\rho/\mu, \\ \Pi_3 &= d^2 \frac{dp}{dx} / (\mu\nu), \quad \Pi_4 = \rho d^3 \frac{dp}{dx} / \mu^2, \\ \Pi_5 &= \mu \frac{dp}{dx} / (\rho^2 v^3).\end{aligned}\tag{1.17}$$

Остальные представлены этими же комбинациями, возведенными в некоторые степени. В силу того, что показатель степени определяется величиной, которую мы произвольно выбираем и присваиваем одной из свободных переменных, то по показателю степени безразмерные комбинации отличаться не могут.

В § 1 было сказано, что базовые безразмерные комбинации являются критериями подобия при моделировании и им часто

¹ Число пять получается как число возможных сочетаний по четыре переменные из пяти, так как одну переменную мы всегда полагаем равной нулю.

присваиваются собственные имена. Так, первые две комбинации в (1.17) известны как критерии (или числа) Эйлера и Рейнольдса Eu и Re ; третья и четвертая — критерии Пуазейля и Кармана P и K ; последнюю комбинацию называют D-критерием из-за того, что в отличие от первых четырех в нее не входит диаметр трубы d .

Между этими пятью величинами в силу их попарной зависимости возможны 10 функциональных равенств вида

$$f(\Pi_i, \Pi_j) = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1,5},\tag{1.18}$$

соответствующих 10 возможным безразмерным базисам. Все эти соотношения равноправны. Выбор одного из них может быть сделан только на основе дополнительной информации о физике процесса либо исходя из возможности получения максимальной точности измерения какой-то комбинации, либо из соображений наглядности физической трактовки комбинаций и т. д. Общей методики выбора «лучшего базиса» нет. Кроме того, различные области определения исследуемой зависимости могут описываться наиболее просто в разных системах координат.

Важность дополнительной информации о физике исследуемого процесса и области исследования покажем на примере определения вида функциональной зависимости $f_1(\Pi_1, \Pi_2) = 0$ при дополнительном условии, что исследуется область ламинарных течений. Подставляя в эту зависимость определения критериев Эйлера Π_1 и Рейнольдса Π_2 из (1.17), запишем ее в виде

$$f\left(d \frac{dp}{dx} / (\rho v^2), d\nu\rho/\mu\right) = 0.\tag{1.19}$$

Поскольку в области ламинарного течения в прямой трубе частицы жидкости движутся прямолинейно и без ускорения, то плотность ρ , характеризующая инерционность элементов жидкости при их ускорении, не должна входить в исследуемую зависимость. А это возможно только в том случае, если безразмерные переменные в уравнение (1.19) входят в такой комбинации, в которой величина ρ сокращается. Как видно из определений Π_1 и Π_2 , для этого они должны перемножаться.

Учитывая это уравнение, (1.19) преобразуем

$$f\left(d \frac{dp}{dx} / (\rho v^2), d\nu\rho/\mu\right) = f_1\left(d^2 \frac{dp}{dx} / (\mu\nu)\right) = 0.\tag{1.20}$$

Таким образом, осталась только одна безразмерная переменная, соответствующая критерию Пуазейля [см. (1.17)], которая полностью определяет исследуемое явление в ламинарной области течения. А какое уравнение мы получим вместо (1.20), если за исходную зависимость из (1.18) выбираем не $f(\Pi_1, \Pi_2) = 0$, а $f(\Pi_3, \Pi_4) = 0$.

Раскрывая обозначения Π_3 и Π_4 , получим

$$f\left(d^2 \frac{dp}{dx} / (\mu\nu), \rho d^3 \frac{dp}{dx} / \mu^2\right) = 0.\tag{1.21}$$

Мы знаем, что величина ρ не должна входить в отыскиваемую зависимость. А это можно реализовать только в случае, если критерий Кармана P ,

в уравнении (1.21), в которое входит ρ , возводится в нулевую степень. Учитывая это, получаем

$$f \left[d^2 \frac{dp}{dx} / (\mu v), \left(\rho d^3 \frac{dp}{dx} / \mu^2 \right)^0 \right] = f_1 \left(d^2 \frac{dp}{dx} / (\mu v) \right) = 0, \quad (1.22)$$

что совпадает с прежним результатом (1.20).

§ 4. Определение вида модели в безразмерном базисе

Сначала рассмотрим случай, когда математическая модель в безразмерном базисе зависит только от одной переменной и ее можно записать в виде

$$f(\Pi_1) = 0. \quad (1.23)$$

Решением этого уравнения является константа

$$\Pi_1 = \text{const}. \quad (1.24)$$

Таким образом, с точностью до константы запись (1.24) и определяет вид исследуемой зависимости (1.23).

В § 3 зависимость вида (1.23) была найдена при исследовании ламинарного потока вязкой жидкости в круглой горизонтальной трубе (1.20). Подставляя безразмерную переменную из (1.20) в решение (1.24), получаем

$$dp/dx = c v \mu / d^2, \quad (1.25)$$

где c — неизвестная константа. Вводя в правую часть этого уравнения критерий Рейнольдса и заменяя dp/dx на $(p_1 - p_2)/l$, где p_1 и p_2 — давления на концах прямой круглой трубы длиной l , перепишем его в виде, наиболее часто употребляемом¹:

$$(p_1 - p_2)/l = (c/\text{Re}) (\rho v^2/d). \quad (1.26)$$

Для определения величины c , очевидно, достаточно постановки одного эксперимента (из гидродинамики известно, что $c=32$).

Если модель зависит не от одной, а от двух безразмерных переменных, то ее функциональное уравнение $f(\Pi_1, \Pi_2) = 0$ задает некоторую кривую в пространстве с координатами (Π_1, Π_2) . Общего аналитического решения здесь уже не существует и определять вид модели можно либо путем аппроксимации экспериментального материала, либо используя дополнительную информацию об исследуемой зависимости и области ее определения, порядках величин безразмерных переменных, физическом смысле их комбинаций и т. д. Поясним это на примере построения модели для скорости осаждения капли воды в нефти. Будем полагать, что капля имеет форму шарика. Скорость осаждения капли v , очевидно, будет зависеть от радиуса капли R , плотности воды ρ_1 , плотности нефти ρ_2 , вязкости

¹ Правая часть этого уравнения не зависит от ρ , так как оно сокращается при раскрытии числа Re .

y	x													
	v	R	$\Delta\rho$	g	μ	$\Delta\rho/\mu$	v	R	g	$(\Delta\rho/\mu)^2 g$	v^2/g	R	$(\Delta\rho/\mu^2) g R^3$	$v^2/g R$
L	1	1	-3	1	-1	-2	1	1	1	-3	1	1	0	0
T	-1	0	0	-2	-1	1	-1	0	-2	0	0	0	0	0
M	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

нефти μ , ускорения свободного падения g — всего шесть исходных размерных переменных. Нетрудно прийти к выводу, что величины ρ_1 и ρ_2 должны входить в решение задачи в виде разности $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, так как они определяют вес капли в нефти. Составим таблицу размерностей. Поскольку перед нами не стоит задача найти все возможные безразмерные базисы, а требуется построить любой из них, воспользуемся методом поочередного исключения основных размерных категорий.

Из табл. 2 видно, что величины $\Delta\rho$ и μ могут входить в безразмерную комбинацию только в виде $\Delta\rho/\mu$ или $\mu/\Delta\rho$, так как только в этом случае можно исключить размерность массы. Принимая величину $\Delta\rho/\mu$ за новую переменную, составим таблицу размерностей, отделенную от исходной двумя вертикальными линиями. Из нее видно, что размерность времени можно исключить путем введения комплексов $(\Delta\rho)^2 g / \mu^2$ и v^2/g . Исключая на последнем этапе размерность длины, получаем два безразмерных комплекса:

$$\Pi_1 = (\Delta\rho/\mu)^2 g R^3 \text{ и } \Pi_2 = v^2/(gR). \quad (1.27)$$

Поскольку нас интересует зависимость скорости осаждения капли от остальных параметров, запишем следующую зависимость Π_2 от Π_1 :

$$v^2/(gR) = f(\Pi_1). \quad (1.28)$$

В качестве дополнительной информации, необходимой для раскрытия правой части этого равенства, воспользуемся соотношениями относительно области определения величины Π_1 . Из определения видно, что это положительно определенная величина, равная нулю при $\Delta\rho=0$. Ограничим наши исследования только областью малых значений Π_1 . Раскладывая правую часть (1.28) в ряд Тейлора и ограничиваясь линейными членами разложения, получаем

$$v^2/(gR) = f(0) + df/d\Pi_1 |_{\Pi_1=0} \cdot (\Delta\rho/\mu)^2 g R^3. \quad (1.29)$$

Так как при $\Delta\rho=0$ капля будет находиться во взвешенном состоянии и не будет оседать, $f(0)=0$. Таким образом, для скорости осаждения капли воды в нефти мы получили зависимость

$$v = c \Delta\rho g R^3 / \mu, \quad (1.30)$$

где c — неопределенная константа (можно показать, что $c=2/9$).

Таблица 3

y	x									
	F_T	v	R	μ	F_T/μ	v	R	$F_T/(\mu v)$	R	$F_T/(\mu v R)$
L	1	1	1	-1	2	1	1	1	1	0
T	-2	-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	0
M	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Рассмотрим другой подход к решению задачи. Проследим результаты использования дополнительной информации при определении вида модели в безразмерном базисе и рассмотрим опять задачу определения скорости осаждения капли воды в нефти. Только, перед тем как выбрать исходные размерные переменные, заметим, что на движущуюся каплю действуют две противоположно направленные силы: сила F_g , направленная вниз и численно равная весу капли в нефти, и сила трения капли о нефть F_T , направленная вверх. При равномерном движении капли эти силы уравниваются. Силу F_g легко вычислить на основании закона Архимеда:

$$F_g = 4/3\pi R^3 (\rho_1 - \rho_2) g. \quad (1.31)$$

О силе F_T известно, что она зависит от вязкости нефти, размера капли и скорости ее осаждения. Из теории подобия следует, что между этими переменными должно существовать следующее равенство:

$$f(F_T, v, R, \mu) = 0. \quad (1.32)$$

Для перехода к безразмерным переменным составим таблицу размерностей исходных переменных (табл. 3).

Используя тот же прием построения безразмерных комплексов, получаем, что из четырех исходных размерных переменных можно построить только одну безразмерную переменную. Поэтому равенство (1.32) можно переписать в виде

$$f(F_T/(\mu v R)) = 0. \quad (1.33)$$

Согласно формулам (1.23) и (1.24) решением этого уравнения будет константа, поэтому

$$F_T = c\mu v R. \quad (1.34)$$

Приравнявая F_T и F_g , получаем уравнение для определения v , решением которого будет

$$v = \frac{1}{c} \frac{3}{4} \pi \frac{\rho_1 - \rho_2}{\mu} g R^2. \quad (1.35)$$

Более глубокие теоретические исследования, основанные на решении уравнений гидродинамики, позволяют определить $c = 6\pi$.

Таблица 4

y	x					
	φ	φ_0	t	m	l	g
L	0	0	0	0	1	1
M	0	0	0	1	0	0
T	0	0	1	0	0	-2
φ	1	1	0	0	0	0

Рассмотрим задачу об исследовании колебаний математического маятника. Пусть мы пришли к выводу, что угол отклонения φ у математического маятника зависит от начального угла отклонения φ_0 , времени t , массы маятника m , длины нити подвески l и ускорения свободного падения g . Для построения безразмерного базиса составим таблицу размерностей исходных переменных, вводя размерность угла как основную размерную категорию (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что одна из безразмерных комбинаций получается из отношения искомого угла к начальному: $\Pi_1 = \varphi/\varphi_0$. Поскольку размерность массы имеется только у одной переменной, она не может войти ни в одну из безразмерных комбинаций, а это означает, что масса маятника должна быть исключена и из списка основных размерных переменных, определяющих его колебания.

Чтобы сократилась размерность длины, переменные l и g должны в безразмерной комбинации делиться одна на другую. Если возьмем их отношение g/l , то, умножая его на t^2 , получаем вторую безразмерную комбинацию: $\Pi_2 = gt^2/l$. В новых координатах, которых стало только две вместо шести исходных, запишем закон колебания маятника в виде

$$\varphi(t)/\varphi_0 = f(\Pi_2) = f(gt^2/l). \quad (1.36)$$

Если воспользоваться дополнительным соображением о гармоничности колебаний маятника во времени, то неизвестную функцию в правой части (1.36) можно аппроксимировать синусом или косинусом с неизвестными амплитудой и фазой. Заменяя, например, функцию в правой части (1.36) синусом, получаем

$$\varphi(t)/\varphi_0 = A \sin [(gt^2/l)^k + \psi], \quad (1.37)$$

где A , k и ψ — неизвестные параметры. Чтобы правая часть уравнения (1.37) была гармонической функцией по времени, последнее должно входить в нее линейно. Из этого условия получим $k = 1/2$. Из начальных условий

$$\varphi(0)/\varphi_0 = 1 \text{ и } d\varphi(t)/dt|_{t=0} = 0 \quad (1.38)$$

Таблица 5

y	x				
	α	v	g	l	m
L	0	1	1	1	1
m	0	0	0	0	1
T	0	-1	-2	0	1

получаем $A=1$ и $\psi=\pi/2$. Подставляя найденные константы в уравнение (1.37), получаем полностью определенную математическую модель колебаний маятника:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos(\sqrt{g/l} t). \quad (1.39)$$

Для иллюстрации применения важного методического приема теории размерностей — дополнения к П-теореме — рассмотрим известную в механике задачу о дальности полета тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью v . Под действием ускорения силы тяжести g тело упадет на землю на расстоянии l от точки бросания. Обозначая массу тела m , запишем искомую зависимость исходных переменных в виде

$$f(\alpha, v, g, l, m) = 0. \quad (1.40)$$

Составим таблицу размерностей.

Из табл. 5 видно, что масса тела не может входить в исследуемую зависимость, а из остальных переменных можно составить две безразмерные комбинации $\Pi_1 = \alpha$, $\Pi_2 = lg/v^2$. В безразмерном базисе нашу зависимость запишем в виде

$$f(\alpha, lg/v^2) = 0 \quad (1.41)$$

или

$$l = (v^2/g) f_1(\alpha), \quad (1.42)$$

где $f_1(\alpha)$ — неизвестная функция, для определения которой требуется дополнительная информация. Такую информацию можно получить из дополнения к П-теореме, если учесть, что брошенное тело движется в двух направлениях — горизонтальном (x) и вертикальном (y). Начальные скорости в этих направлениях будут равны $v_x = v \sin \alpha$ и $v_y = v \cos \alpha$. Поскольку эти скорости независимы, исходную зависимость в размерных переменных следует записать в виде

$$f(v_x, v_y, g, l) = 0. \quad (1.43)$$

Соответствующая этим переменным таблица размерностей будет иметь вид табл. 6.

Этой таблице соответствует только один безразмерный комплекс:

$$\Pi_1 = lg/(v_x v_y) = lg/(v^2 \sin \alpha \cos \alpha) = 2lg/(v^2 \sin 2\alpha) \quad (1.44)$$

Таблица 6

Размерность	Переменные			
	v_x	v_y	g	l
L_x	1	0	1	1
L_y	0	1	-1	0
T	-1	-1	-2	0

и, следовательно, исследуемая зависимость имеет вид

$$lg/(v^2 \sin 2\alpha) = c \text{ или } l = cv^2/g \sin 2\alpha, \quad (1.45)$$

где c — неопределенный множитель.

Помимо рассмотренных приемов анализа функциональных уравнений в безразмерном базисе в ряде задач удается добиться успеха путем разложения функционалов по малому параметру [23].

С увеличением размерности базиса возрастают и трудности определения и исследования искомых моделей. Так, в базисе, образованном тремя безразмерными комплексами, искомое уравнение их связи описывает трехмерную криволинейную поверхность. Сечения этой поверхности еще можно представить на плоском чертеже в виде параметрического графика. При размерности базиса четыре пропадает и эта возможность наглядного графического представления исследуемых зависимостей.

§ 5. Определение исходных переменных при построении модели

Согласно уравнению (1.16), определяющему вид математической модели исследуемого процесса, все исходные переменные связаны между собой и каждая из них может быть выражена через остальные. А что произойдет, если какая-либо одна или даже несколько исходных переменных не будут учтены? Однозначно на этот вопрос ответить нельзя, так как здесь возможны два случая. В одном из них исследуемая модель будет справедлива только в определенной области исходного полного пространства переменных, в другом — вообще нельзя считать взятые переменные взаимозависимыми. Рассмотрим это на примерах. Предположим, что при исследовании течения вязкой жидкости по трубам в исходных переменных не была учтена плотность жидкости ρ . Эта ситуация даст решение, соответствующее только ламинарной области течения. Другими словами, пропуск размерной переменной в этом случае приводит к уменьшению допустимой области применения исследуемой модели.

В список исходных переменных в предыдущих примерах мы включали не только истинно переменные величины, но и практически постоянные, такие как ускорение свободного падения. Посмотрим, к чему приведет пропуск ускорения свободного падения при исследовании колебания математического маятника. Из табл. 4 видно, что из остающихся величин, кроме φ и φ_0 , нельзя образовать безразмерную комбинацию, а это эквивалентно утверждению, что в такой постановке задачи колебания маятника не зависят от этих переменных, включая и время. Такой результат, очевидно, следует признать неверным.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда в список первичных переменных будет включена «лишняя» переменная. В этом слу-

чае также возможны различные ситуации. Лишняя переменная может быть автоматически исключена, как это было с массой в задаче о колебании маятника, в противном случае она послужит основой для образования дополнительных безразмерных комбинаций, существенно усложняющих последующий анализ изучаемого явления.

Итак, при определении списка основных переменных мы всегда находимся между двумя крайностями: при недостаточном числе переменных модель не будет полной или же ее совсем не удастся построить; при избыточном числе переменных модель может быть существенно усложнена. Однако, несмотря на то что обе ошибки при составлении списка исходных переменных опасны для процесса последующего моделирования, пропуск переменной следует признать наиболее серьезной из них.

§ 6. Применение теории размерностей при подготовке эксперимента и при анализе экспериментальных результатов

Получение исходных переменных и обоснование возможного параметрического вида модели являются ключевыми задачами этапа теоретической подготовки любого эксперимента. И здесь анализ размерностей незаменим. Рассмотрим это на примере подготовки эксперимента, направленного на построение статистической модели установки обезвоживания нефти. Процесс этот довольно сложен и зависит от большого числа технологических параметров, таких как особенности конструкции и производительность установки, на которой он реализуется, обводненность и дисперсность сырой нефти, плотности нефти и воды, температура подогрева нефти, качество и количество применяемого деэмульгатора и т. д. Для конкретизации задачи предположим, что требуется построить модель для отстойного аппарата с нижним вводом сырья. Такой аппарат представляет собой большую бочку объемом около 200 м³ (диаметр 3—3,5 м, длина $l \approx 20$ м), положенную на бок. Сырая нефть поступает в нижнюю часть отстойника и при помощи системы труб с отверстиями (нижний маточник) равномерно распределяется по горизонтальному сечению аппарата. Внутри аппарата нефть вертикально поднимается вверх и затем выводится из аппарата через распределительное устройство, по конструкции похожее на нижний маточник.

Любая капля воды из эмульсии сырой нефти объемом V находится внутри отстойника как бы в двух движениях. Поток нефти она увлекается вверх со скоростью v_n , а под действием силы тяжести она оседает со скоростью v_g . Будет ли капля вынесена из отстойника вместе с нефтью или осядет в нижнюю часть аппарата, зависит только от соотношения между этими скоростями. А если это так, то только эти две

скорости и определяют работу отстойника. Обозначая $w_{вх}$ и $w_{вых}$ обводненности сырой и подготовленной нефти и \bar{V} средний объем каплей эмульсии сырой нефти и полагая, что искомая модель должна быть справедлива для этого среднего объема запишем функциональный вид модели:

$$f(w_{вх}, w_{вых}, v_g(\bar{V}), v_n) = 0. \quad (1.46)$$

Из четырех исходных переменных можно составить две безразмерные комбинации $w_{вых}/w_{вх}$ и v_g/v_n . Выражая первую из них через вторую, получим

$$w_{вых}/w_{вх} = f_1(x); \quad x = v_g(\bar{V})/v_n. \quad (1.47)$$

Левая часть этого равенства положительно определена и изменяется в пределах от 1 (при очень высоких производительностях большие значения v_n) до нуля при $v_n \rightarrow 0$ (очень низкие производительности). Из функций, заданных на полупрямой, такой областью значений обладает показательная функция. Поэтому формулу (1.47) перепишем в виде

$$w_{вых}/w_{вх} = \exp\{f_2(x)\}. \quad (1.48)$$

Разложить экспоненту в ряд в окрестности нуля и ограничиться малым числом членов ряда не представляется возможным, так как в практических ситуациях отношение в левой части уравнения (1.48) имеет порядок одной десятой, поэтому показатель экспоненты должен иметь абсолютную величину порядка единицы. В то же время нам ничто не мешает представить в виде параметрического ряда функцию $f_2(x)$. Учитывая, что $f_2(0) = 0$, аппроксимируем ее квадратичной зависимостью вида

$$f_2(x) = \alpha x + \beta x^2. \quad (1.49)$$

Подставляя (1.49) в (1.48), получаем окончательный параметрический вид искомой модели отстойника:

$$w_{вых}/w_{вх} = \exp\{\alpha x + \beta x^2\}. \quad (1.50)$$

Простота полученного выражения кажущаяся. На самом деле мы учли большое число технологических параметров, которые в неявном виде вошли в v и v_n . Действительно, если Q — производительность отстойника по сырую, d — диаметр отстойника, а l — длина, то в сечении на середине высоты аппарата скорость нефти будет

$$v_n = Q(1 - w_{вх})/(ld). \quad (1.51)$$

Эта скорость для модели нам и нужна, так как в данном сечении она минимальна. Если какую-либо каплю пронесло потоком через это сечение наверх, то опуститься она уже не сможет. Пусть скорость осаждения каплей в средней части аппарата подчиняется закону Стокса:

$$v_g = kV^{2,3}; \quad k = 2\Delta\rho g/(9\mu)(4\pi/3)^{2,3}, \quad (1.52)$$

где $\Delta\rho$ — разность плотностей воды и нефти; μ — вязкость нефти.

Наша модель учитывает следующие параметры процесса: тип отстойника, его геометрические размеры и производительность по сырой нефти, обводненность сырой нефти, средний размер капель эмульсии, плотность воды и нефти, вязкость нефти. Всего девять параметров. Если вязкость выразить через вязкость нефти при низкой температуре и температуру подогрева сырья, то добавится еще один параметр. Без предварительного анализа размерностей такую модель построить невозможно. Как пример использования теории размерностей для анализа уже готовых моделей рассмотрим задачу анализа тарировочной кривой расходомера.

Для некоторого типа расходомера тарировочная кривая аппроксимирована уравнением

$$Q = 1,15h^{0,53}, \quad (1.53)$$

где h — высота подъема жидкости в мерной трубке. Величина h связана с перепадом давления на расходомере Δp и удельным весом жидкости $\gamma = \rho g$ равенством $\Delta p = \rho gh$. Из общих физических соображений следует также, что показания расходомера зависят от параметра его геометрии d , плотности измеряемой жидкости ρ , вязкости жидкости μ и перепада давления Δp .

Требуется выяснить область применения тарировочной кривой (1.53) и условия, при которых она может быть получена¹.

На основании теории размерностей мы можем утверждать, что для данного типа расходомера справедливо следующее функциональное равенство:

$$f(Q, d, \rho, \mu, \Delta p) = 0, \quad (1.54)$$

которое в безразмерных координатах можно привести к виду

$$f(\Pi_1, \Pi_2) = 0; \quad \Pi_1 = Q/d^2 (\rho/\Delta p)^{1/2}; \\ \Pi_2 = d/\mu (\rho \Delta p)^{1/2}. \quad (1.55)$$

Заменяя Δp через ρgh и выражая в явном виде Q , получаем

$$Q = d^2 (hg)^{1/2} f(d\rho/\mu (hg)^{1/2}). \quad (1.56)$$

Из сравнения формул (1.53) и (1.56) видно, что соотношения типа (1.53) мы получим, если предположим, что $f(x)$ является степенной функцией вида

$$f(x) = cx^{0,06}. \quad (1.57)$$

Раскрывая правую часть равенства (1.56) при условии (1.57), получим

$$Q = cd^{2,06} g^{0,53} (\rho/\mu)^{0,06} h^{0,53}. \quad (1.58)$$

¹ То, что эта тарировочная кривая не является универсальной, следует из нарушения равенства размерностей у правой и левой частей уравнения (1.53).

Сравнивая (1.58) и (1.53), видим, что числовой множитель в формуле (1.53) включает в себя не только параметр геометрии, но и величины ρ , g и μ в соответствующих степенях.

На основании проведенного разбора можно сделать следующий вывод. Если предположить, что функция $f(x)$ действительно имеет вид (1.57), то тарировочная кривая справедлива только при условии

$$d^{2,06} g^{0,53} (\rho/\mu)^{0,06} = \text{const.}$$

Если же $f(x)$ только хорошо аппроксимируется зависимостью вида (1.57) на множестве экспериментальных данных, то область применения тарировочной кривой может быть еще более ограниченной.

§ 7. Применение безразмерных переменных при обработке статистического материала

При обследовании технологических установок в режиме нормальной эксплуатации часто используют методы статистической аппроксимации данных, которые берутся из режимных листов. Номенклатурный перечень этих данных, как правило, довольно большой (порядка 10 и выше), а используемый статистический материал в силу размерности и возможной взаимозависимости трудно поддается обработке для установления его представительности, однородности и т. д. В такой ситуации методы теории размерностей незаменимы. Они не только позволяют уменьшить число переменных в задаче путем перехода к безразмерному базису, но и в некоторых случаях дают возможность оценить представительность обрабатываемого материала. Рассмотрим это на примере обработки данных нормальной эксплуатации установки по обессоливанию нефти.

На установку поступает нефть, содержащая $\omega_{вх}$ (%) воды $S_{вх}$ (мг/л) соли. В сырую нефть добавляется пресная промысловая вода $\omega_{пр}$ (%). На смешительном устройстве промысловая вода дробится на мелкие капли и перемешивается со входной водой. Затем водонефтяная эмульсия поступает в разделительный аппарат, где отделяется значительная часть воды. Нефть, содержащая $\omega_{вых}$ (%) остаточной воды и $S_{вых}$ (мг/л) остаточных солей, выходит из аппарата и считается товарной. При постоянной температуре и прочих равных условиях требуется установить количественную взаимосвязь между перечисленными параметрами на основе экспериментальных данных, приведенных в табл. 7. Из табл. 7 видно, что интересующие нас параметры изменяются в довольно широких пределах. Для того чтобы сократить число исходных переменных, обратим внимание на то, что входная и промысловая вода после введения в процесс и перемешивания неразличимы и поэтому разумно их объединить путем суммирования, а результат рассматривать как новую переменную, заменяющую две исходные.

$S_{вх}$	$w_{вх}$	$w_{пр}$	$w_{вых}$	$S_{вых}$	$w_{вх} + w_{пр}$	$S_{вх}/S_{вых}$	$(w_{вх} + w_{пр})/w_{вых}$
60	0,5	1,5	0,1	3	2	20	20
100	0,5	2,5	0,15	5	3	20	20
120	1	3	0,2	6	4	20	20
80	0,5	1,5	0,1	4	2	20	20
40	0,25	0,75	0,05	2	1	20	20
140	0,5	3,5	0,2	7	4	20	20
60	0,5	1,5	0,1	3	2	20	20
40	0,2	0,8	0,05	2	1	20	20
80	1	4	0,25	4	5	20	20
100	1	3	0,2	5	4	20	20

Итак, нам надо найти связь между четырьмя переменными $S_{вх}$, $S_{вых}$, $w_{вых}$, $w_{вх} + w_{пр}$. Из них можно образовать два безразмерных комплекса $S_{вх}/S_{вых}$ и $(w_{пр} + w_{вх})/w_{вых}$. Будем искать зависимость первого из них от второго, записав ее в виде

$$S_{вх}/S_{вых} = f((w_{вх} + w_{пр})/w_{вых}). \quad (1.59)$$

Для этого по экспериментальным данным построим график данной зависимости. Однако, проводя вычисления (см. табл. 7), обнаруживаем, что график содержит только одну точку с координатами (20, 20). Следовательно, зависимость вида (1.59) определить нельзя, так как интервал изменения независимой переменной оказался вырожденным в точку.

Материал для рассмотренного примера был специально подобран. Однако получение узкой области, в которую попадают экспериментальные данные в безразмерном базисе, является не редкостью при обработке статистического материала, снимаемого с технологической установки в режиме нормальной эксплуатации. И к этому надо быть готовыми.

Рассмотрим задачу нахождения стационарной зависимости качества разделения водонефтяной эмульсии в отстойном аппарате от температуры ведения процесса T , производительности аппарата Q и обводненности сырой нефти $w_{вх}$. Качество обезвоживания будем характеризовать остаточной водой в нефти на выходе аппарата $w_{вых}$. Функциональный вид искомой зависимости запишем в виде

$$f(w_{вх}, w_{вых}, T, Q) = 0. \quad (1.60)$$

Здесь нельзя перейти к безразмерному базису, используя рассмотренные ранее приемы построения базисных безразмерных комплексов. Из формулы (1.40) видно, что такой комплекс здесь единственный $\Pi = w_{вых}/w_{вх}$. Выражая Π в явном виде из (1.33), получаем

$$w_{вых}/w_{вх} = f(T, Q). \quad (1.61)$$

Левую часть этого уравнения можно трактовать как коэффициент усиления исследуемого отстойника.

Для перехода к безразмерным переменным в правой части (1.61) воспользуемся следующим приемом. Поскольку описываемая зависимость не учитывает всех физических параметров, влияющих на качество обезвоживания, мы можем надеяться на ее хорошее совпадение с экспериментальными данными только в ограниченной области изменения величин T и Q . Пусть эта область определяется неравенствами $T_1 \leq T \leq T_2$, $Q_1 \leq Q \leq Q_2$. Введем новые безразмерные переменные:

$$T^* = T/(T_2 - T_1); \quad Q^* = Q/(Q_2 - Q_1). \quad (1.62)$$

Такой способ приведения к безразмерному виду обычно называется нормировкой переменной на интервал ее изменения. Безразмерные величины T^* и Q^* изменяются в пределах (0,1).

Заменяя T и Q в (1.61) нормированными величинами, запишем искомую зависимость в безразмерных переменных:

$$w_{вых}/w_{вх} = f(T^*, Q^*). \quad (1.63)$$

Способ нормировки (1.62), очевидно, не единственный. Можно изменять масштаб нормирующего интервала и сдвигать его. Например, для того чтобы нормированные переменные изменялись в интервале $(-1,1)$, вместо формул (1.62) следует пользоваться равенствами

$$T^* = \frac{T - (T_2 - T_1)/2}{(T_2 - T_1)/2};$$

$$Q^* = \frac{Q - (Q_2 - Q_1)/2}{(Q_2 - Q_1)/2}. \quad (1.64)$$

Нормировка вида (1.64) широко применяется в теории планирования эксперимента (см. гл. 3).

§ 8. Приведение к безразмерному виду уравнений

Процедуру обезразмеривания рассмотрим на примере уравнений, описывающих стационарные процессы тепло- и массопереноса в однородной непрерывной среде. Поскольку эти уравнения совпадают с точностью до обозначений, для конкретизации задачи будем говорить о переносе массы.

В размерных переменных стационарное уравнение конвективной диффузии вещества имеет вид

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (1.65)$$

где C — концентрация вещества в окрестности точки с координатами (x, y, z) ; v_x, v_y, v_z — составляющие скорости в этой точке; D — коэффициент диффузии вещества.

Введем характерный размер L , на котором происходит основное изменение концентрации вещества, характерную скорость движения жидкости U и среднюю концентрацию веще-

ства C_0 . Домножив и разделив соответствующие члены уравнения (1.65) на эти величины, получим

$$\frac{UC_0}{L} \left[\frac{v_x}{U} \frac{\partial(C/C_0)}{\partial(x/L)} + \frac{v_y}{U} \frac{\partial(C/C_0)}{\partial(y/L)} + \frac{v_z}{U} \frac{\partial(C/C_0)}{\partial(z/L)} \right] = \frac{DC_0}{L^2} \left[\frac{\partial^2(C/C_0)}{\partial(x/L)^2} + \frac{\partial^2(C/C_0)}{\partial(y/L)^2} + \frac{\partial^2(C/C_0)}{\partial(z/L)^2} \right]. \quad (1.66)$$

Введя безразмерные величины

$$\begin{aligned} u_x &= v_x/U; \quad u_y = v_y/U; \\ u_z &= v_z/U; \quad C_* = C/C_0; \\ \text{Pe} &= UL/D; \quad x_* = x/L; \\ y_* &= y/L; \quad z_* = z/L, \end{aligned}$$

перейдем к следующей записи исходного уравнения в безразмерных координатах:

$$\begin{aligned} u_x \frac{\partial C_*}{\partial x_*} + u_y \frac{\partial C_*}{\partial y_*} + u_z \frac{\partial C_*}{\partial z_*} &= \\ &= \frac{1}{\text{Pe}} \left[\frac{\partial^2 C_*}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 C_*}{\partial y_*^2} + \frac{\partial^2 C_*}{\partial z_*^2} \right]. \end{aligned} \quad (1.67)$$

Левая часть этого уравнения характеризует конвективный перенос вещества потоком жидкости, а его правая часть соответствует переносу вещества за счет молекулярной диффузии.

При правильном выборе характерных величин, используемых при построении безразмерных переменных, левая часть уравнения и правая часть, заключенная в скобки, имеют один порядок. А соотношение между вкладом в перенос вещества за счет конвективного и диффузионного механизмов определяется безразмерным критерием Pe (число Пекле). Если число Pe мало, то правая часть уравнения будет значительно больше левой. Поэтому левой частью уравнения можно пренебречь, т. е. заменить ее нулем. Результирующее уравнение будет соответствовать диффузионному процессу переноса вещества. При больших числах Pe можно пренебречь правой частью уравнения, что будет соответствовать учету только конвективного механизма переноса вещества. Другие примеры применения безразмерных комплексов при построении математических моделей можно найти в литературе [31, 44].

ГЛАВА 2.

МЕТОДЫ ПРИБЛИЖЕНИЯ ФУНКЦИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

§ 9. Постановка задачи. Критерии приближения

Раскладывая функции в ряд, определяя численными методами величины интегралов или подбирая аналитические выражения для описания экспериментальных зависимостей, мы ре-

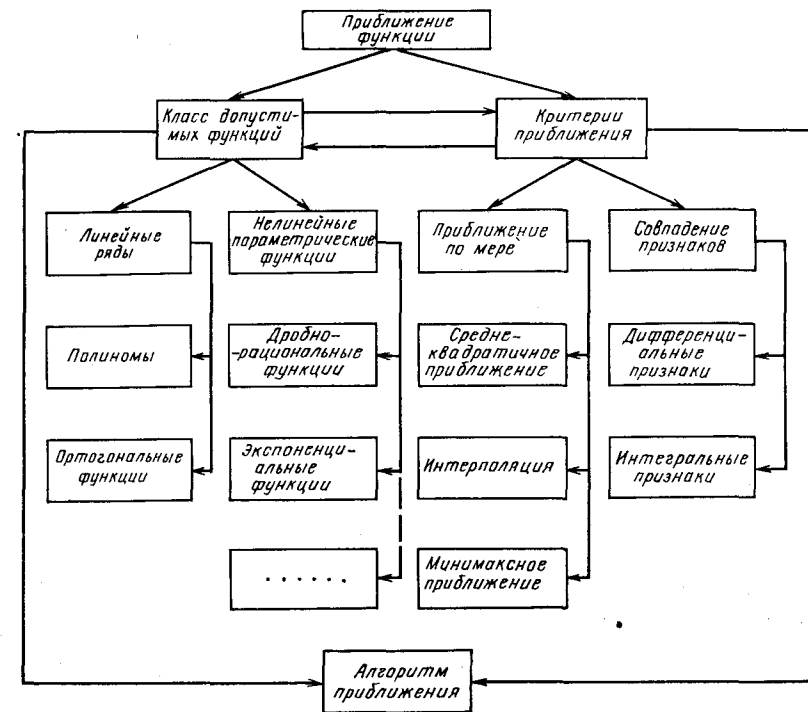


Рис. 1. Схема решения задачи приближения

шаем задачи приближения (или аппроксимации) одних функций другими, которые для нас более «удобны» по каким-либо критериям. Другими словами, при решении всех этих задач мы строим модели исходных зависимостей, которые сохраняют их основные свойства и в то же время они наиболее удобны для анализа и последующего применения.

Решение любой задачи приближения можно разделить на три этапа: выбор класса допустимых функций, в котором будет описываться модель; выбор критерия приближения; построение алгоритма приближения. Как правило, эти этапы не являются взаимонезависимыми, а объединяются негласным условием существования приемлемого вычислительного алгоритма отыскания в выбранном классе функции, наилучшей по выбранному критерию. Для наглядности представления взаимосвязей между этапами построения аппроксимирующей функции на рис. 1 приведена схема возможных вариантов решений этой задачи.

Класс допустимых функций для удобств последующих вычислений обычно задается в параметрическом виде. Обозначим его $g(x, \alpha)$, где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ — вектор неизвестных параметров, который требуется определить. Наиболее простые алго-

ритмы для вычисления параметров получаются, когда допустимый класс функций представим в виде ряда

$$g(x, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi_i(x), \quad (2.1)$$

линейного относительно искоемых параметров. Предполагается, что базисные функции разложения $\varphi_i(x)$ известны. В зависимости от решаемой задачи и требуемой точности приближения разложения функции (2.1) могут быть как конечными, так и бесконечными. В теоретическом плане наиболее полно на сегодняшний день разработаны случаи, когда в качестве $\varphi_i(x)$ используются полиномы повышающегося порядка и системы функций, ортогональные в интервале приближения.

Нелинейные параметрические функции в задачах аппроксимации используются гораздо реже. Причиной этого является не качество получаемого приближения, а недостаточность проработки теоретических вопросов приближения в подобных классах и отсутствие удовлетворительных вычислительных алгоритмов. Исключением из этого правила являются дробно-рациональные функции. Иногда используются ряды из экспоненциальных функций с неизвестными коэффициентами в показателях. Примеры приближения в различных классах функций рассматриваются в последующих параграфах.

Критерии приближения можно разделить на две группы. В первую отнесем критерии, основанные на мере сравнения двух функций, определенных на всем интервале приближения, а во вторую — критерии, базирующиеся на сравнении отдельных признаков функций.

Для построения критериев первой группы введем понятие ошибки приближения в точке x , которую определим как разность между приближаемой и приближающей функциями в этой точке

$$\Delta(x) = f(x) - g(x, \alpha). \quad (2.2)$$

За ошибку Δ назовем штраф, который отождествим с величиной функции штрафа $\Psi(\Delta)$. Естественно полагать, что эта функция является положительно определенной, не убывающей с ростом $|\Delta|$ и равной нулю при $\Delta=0$. В общем случае функция штрафа определяется спецификой решаемой задачи. В то же время исходя из удобства последующих вычислений на практике наиболее часто применяют функции штрафа, заданные в виде

$$\Psi(\Delta) = \Delta^2, \quad (2.3)$$

$$\Psi(\Delta) = |\Delta|, \quad (2.4)$$

называемые соответственно квадратичной функцией штрафа и функцией штрафа по модулю ошибки.

Если $f(x)$ — непрерывная функция, заданная на множестве Ω , то полный штраф за ошибки приближения будет

$$R = \int_{\Omega} \Psi(\Delta) dx = \int_{\Omega} \Psi[f(x) - g(x, \alpha)] dx. \quad (2.5)$$

Если Ω является дискретным множеством точек $x_i (i=1, \dots, m)$, то интеграл в правой части (2.5) естественно заменить суммой по этим точкам. В результате для этого случая получим

$$R = \sum_{i=1}^m \Psi[f(x_i) - g(x_i, \alpha)]. \quad (2.6)$$

Когда функция штрафа задается в виде (2.3), критерии (2.5) и (2.6) называются критериями среднеквадратичного приближения.

Наилучшая приближающая функция должна реализовать минимум суммарного штрафа (2.5) и (2.6) над множеством значений α . Поэтому задачи приближения сводятся к задачам минимизации функционалов штрафа:

$$\min_{\alpha} \int_{\Omega} \Psi[f(x) - g(x, \alpha)] dx; \quad (2.7)$$

$$\min_{\alpha} \sum_{i=1}^m \Psi[f(x_i) - g(x_i, \alpha)]. \quad (2.8)$$

Если допустимый класс функций $g(x, \alpha)$ в (2.8) будет включать функцию, которая проходит через все точки $f(x_i)$, то, очевидно, она и будет решением, так как во всех точках приближения штраф для нее равен нулю независимо от вида функции штрафа¹. В теории приближений этот случай выделяется особо и носит название *интерполяции функций*. Критерий задачи интерполяции обычно формулируют как требование совпадения функций $f(x)$ и $g(x, \alpha)$ во всех заданных точках.

Независимым от вида функции штрафа является еще один критерий приближения, впервые рассмотренный русским математиком П. Л. Чебышевым. Следуя принятой терминологии его можно ввести следующим образом. Назначим штраф только за максимальную по модулю ошибку приближения, а за меньшие ошибки штраф положим равным нулю. Тогда выражение для суммарного штрафа (2.5) приведем к виду

$$R = \Psi \left\{ \max_x |f(x) - g(x, \alpha)| \right\}. \quad (2.9)$$

В силу того, что его минимальное значение всегда реализуется на функции $g(x, \alpha)$, обеспечивающей минимальное значение максимальной ошибки независимо от функции $\Psi(\Delta)$, задачу приближения с таким критерием можно записать как задачу минимизации модуля максимальной ошибки приближения, т. е.

$$\min_{\alpha} \max_x |f(x) - g(x, \alpha)|. \quad (2.10)$$

Этот критерий обычно называется *минимаксным критерием* или *критерием равномерного приближения*, а соответствующие ему приближения — *Чебышевскими*.

¹ Для приближения непрерывных функций эта ситуация в общем случае не имеет смысла.

Сущность критериев, использующих совпадение признаков, следующая. У приближаемой функции $f(x)$ некоторым образом определяется набор качественных и количественных признаков. Эти же признаки определяются и у приближающей функции $g(x, \alpha)$. Последние, очевидно, будут зависеть от параметров α . Приравнивая количественные признаки $f(x)$ и $g(x, \alpha)$, при условии совпадения качественных признаков мы получим систему уравнений для определения неизвестных параметров α . Естественно, что набор признаков должен быть таким, чтобы результирующая система уравнений была разрешима.

Примерами качественных признаков функции $f(x)$ могут служить свойства симметрии относительно некоторой точки, положительности на интервале определения, ограниченность и т. д. Набор возможных количественных признаков более широк. Их можно разделить на две группы — дифференциальные (или локальные) и интегральные признаки. Первые из них определяют свойства приближаемой функции в одной или нескольких точках. В качестве таких свойств обычно используются значения функции и ее производных. Классическим примером использования набора дифференциальных признаков может служить разложение функции в ряд Тейлора в окрестности некоторой точки. В этой точке задаются функция $f(x)$ и набор ее производных. Коэффициенты приближающего ряда $g(x, \alpha)$ определяются из условий равенства этих признаков у $f(x)$ и $g(x, \alpha)$ *.

Интегральные признаки функции $f(x)$ обычно отождествляются с ее моментами. Момент порядка ν функции $f(x)$, заданной на множестве Ω , определяется равенством

$$m_\nu = \int_{\Omega} x^\nu f(x) dx. \quad (2.11)$$

Величина ν произвольна. Она должна удовлетворять только условию существования интеграла в (2.11). Однако наиболее часто употребляются моменты целочисленных порядков — нулевого, первого, второго и т. д.

Моменты (2.11) являются частным случаем моментов функции $f(x)$ относительно функции $\varphi(x)$, определяемых как

$$M(\varphi) = \int_{\Omega} \varphi(x) f(x) dx. \quad (2.12)$$

При $\varphi(x) = x^\nu$ получаем моменты (2.11).

В дальнейшем будет показано, что интерполяционный критерий и критерий среднеквадратического приближения эквивалентны соответственно критериям совпадения по локальным признакам.

До сих пор мы предполагали, что при аппроксимации функций, заданных в отдельных точках, сами эти точки заранее известны. Этот случай обычно называют приближением по дан-

* Критерий интерполяции также можно трактовать как критерий совпадения локальных признаков функций.

ным пассивного (т. е. заранее проведенного) эксперимента. При определении экспериментальных зависимостей возможны ситуации, когда эти точки можно выбирать исходя из каких-либо дополнительных предположений. Выбор таких точек называется планированием эксперимента, а задача приближения соответственно приближением по данным активного (или планированного) эксперимента.

§ 10. Интерполирование функций

Геометрическая интерпретация задачи интерполирования функции $y=f(x)$, заданной в отдельных точках интервала определения, представлена на рис. 2. Точки $x_i (i=0, n)$ называют узлами интерполирования. Требуется подобрать подходящую аналитическую функцию, которая совпадает с $f(x)$ во всех узлах интерполяции. В такой постановке задача интерполирования имеет бесконечное множество решений. Для получения единственного решения ограничим множество функций, из которого выбирается приближение, параметрическим классом $g(x, \alpha)$. Параметры α найдем из решения системы уравнений:

$$y_i = g(x_i, \alpha), \quad i = \overline{0, n}, \quad (2.13)$$

где y_i — значение функции $f(x)$ в точке x_i . Будем полагать, что решение этой системы единственное.

Полученную интерполяционную формулу обычно используют для приближенного вычисления функции $f(x)$ для значений x , отличных от узлов интерполирования. Эта операция называется *интерполированием*, если $x \in [x_0, x_n]$, и *экстраполированием* функции $f(x)$, если $x \notin [x_0, x_n]$. Часто такого различия не делают и независимо от положения точки x употребляют термин *интерполирование*.

Наиболее часто при решении задач интерполяции класс допустимых функций $g(x, \alpha)$ выбирается в виде ряда

$$g(x, \alpha) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \varphi_i(x), \quad (2.14)$$

линейного относительно неизвестных параметров α . Функции $\varphi_i(x)$ считаются известными.

Подставив (2.14) в (2.13), получим систему линейных уравнений относительно параметра α :

$$f(x_j) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \varphi_i(x_j). \quad (2.15)$$

Будем полагать, что детерминант этой системы отличен от нуля. Тогда она будет иметь единственное решение, что и определяет единственность интерполяционного полинома (2.14). Для случая, когда $\varphi_i(x)$ отождествляются с полиномами i -го порядка, условие единственности позволяет обойти формальную процедуру решения системы уравнений (2.15). Действительно, при таком выборе функций $\varphi_i(x)$ интерполирующая функция

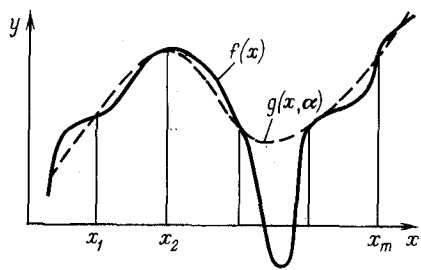


Рис. 2. Графики функции и ее интерполяционного приближения

$g(x, \alpha)$ будет полиномом порядка n , который можно записать в виде

$$g_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) L_i(x), \quad (2.16)$$

где $L_i(x)$ — полиномы n -го порядка. Если их выбирать так, чтобы они удовлетворяли условиям

$$L_i(x_k) = \begin{cases} 1 & \text{при } i = k; \\ 0 & \text{при } i \neq k, \end{cases} \quad (2.17)$$

функция (2.16) будет удовлетворять системе уравнений (2.13) и в силу единственности интерполяционного полинома будет решением нашей задачи.

Условиям (2.17) удовлетворяют функции вида

$$L_i(x) = C \prod_{j=0, j \neq i}^n (x - x_j); \quad \prod_{j=0, j \neq i}^n \equiv \prod_{j=0}^n. \quad (2.18)$$

Константу C определим из условия нормировки функции $L_i(x)$ на единицу в точках $x = x_i$:

$$C = \left[\prod_{j=0, j \neq i}^n (x_i - x_j) \right]^{-1}. \quad (2.19)$$

Подставив (2.18) и (2.19) в (2.16), получим

$$g_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) L_i(x); \quad (2.20)$$

$$L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}.$$

Полиномы такого вида называют *интерполяционными полиномами Лагранжа*, а функции $L_i(x)$ — *коэффициентами Лагранжа*. Поскольку при выводе формулы (2.20) было использовано только условие единственности приближающей функции и предположение, что $f_i(x)$ в (2.15) являются полиномами i -го порядка без конкретизации их вида, получим следующий вывод: *независимо от способа определения интерполяционных полиномов из класса полиномов порядка не выше n они будут тождественно равны интерполяционному полиному Лагранжа.*

Из условия единственности интерполяционного полинома следует также, что если $f(x)$ является полиномом k -го порядка и $n \geq k$, то интерполяционный полином будет совпадать с $f(x)$. Используя это свойство и полагая $f(x) = x^k$, из (2.20) получим

следующую систему условий, которой удовлетворяют коэффициенты Лагранжа:

$$x^k = \sum_{i=0}^n x_i^k L_i(x), \quad k = \overline{0, n}. \quad (2.21)$$

При $k=0$ получим

$$1 = \sum_{i=0}^n L_i(x). \quad (2.22)$$

Процедуру построения интерполяционного полинома Лагранжа можно распространить и на задачи, в которых требуется интерполировать функции, когда в узлах интерполяции известны не только их значения, но и величины производных. Подробно подобные задачи рассмотрены в [39].

Для аналитических функций можно решить задачу оценки ошибки приближения полиномом Лагранжа функции $f(x)$ в точке x . Предположив, что производная $f^{(n+1)}(x)$ непрерывна, получим

$$|f(x) - g_n(x)| \leq \max_{\xi} |f^{(n+1)}(\xi)| \frac{|\omega_{n+1}(x)|}{(n+1)!},$$

$$\xi \in [t_1, t_2], \quad \omega_{n+1}(x) = \prod_{i=0}^n (x - x_i);$$

$$t_1 = \min(x_0, x_1, \dots, x_n, x);$$

$$t_2 = \max(x_0, x_1, \dots, x_n, x). \quad (2.23)$$

Для равноотстоящих узлов интерполяции с шагом h неравенство (2.23) можно преобразовать

$$|f(x) - g_n(x)| \leq \max_{\xi} |f^{(n+1)}(\xi)| h^{n+1} \frac{|t(t-1) \dots (t-n)|}{(n+1)!};$$

$$t = \frac{x - x_0}{h}. \quad (2.24)$$

Поскольку в знаменателе правой части (2.24) стоит $(n+1)!$ может сложиться впечатление, что для «разумных» функций ошибки приближения становятся маленькими для достаточно большого n . К сожалению, это не так. Для большинства функций некоторые из производных более высокого порядка растут как $n!$. Даже у производных от многочленов есть тенденция расти до n -й производной, которая равна $a_0 n!$; после нее все производные становятся равными нулю. Поэтому не следует считать, что во всех случаях увеличение числа узловых точек должно приводить к повышению точности интерполяции. Примером для пояснения этого предостережения может служить

интерполяция функции $\ln x$. Ее производные определяются равенствами

$$y = \ln x; y^{(1)} = 1/x; \\ y^{(2)} = -1/x^2, \dots, y^{(n)} = (-1)^{n-1} (n-1)!/x^n. \quad (2.25)$$

Таким образом, несмотря на то что функция $\ln x$ выглядит достаточно гладкой в окрестности точки x , ее производные в этой точке при больших n растут и ведут себя как $n!$.

Ошибку интерполяции можно уменьшить специальным выбором узлов интерполяции, минимизирующих функцию $|\omega_{n+1}(x)|$ в (2.23). Так, очевидно, что если функция $f(x)$ определена на отрезке $[a, b]$, то для обеспечения минимальной ошибки интерполяции на всем этом отрезке при фиксированном числе узлов интерполяции надо их выбирать таким образом,

чтобы обеспечить минимальное значение полинома $\prod_{i=0}^n (x - x_i)$ *. Эта задача впервые была решена П. Л. Чебышевым, который показал, что наилучший выбор узлов интерполирования определяется равенством

$$x_i = (b+a)/2 + \xi_i (b-a)/2, \quad (2.26)$$

где $\xi_i = -\cos \frac{2i+1}{2n+2} \pi$, $i = \overline{0, n}$ являются нулями так называемого полинома Чебышева $T_{n+1}(x)$ [4, 40]. В этом случае абсолютная величина $\omega_{n+1}(x)$ удовлетворяет неравенству

$$|\omega_{n+1}(x)| \leq 2 \left(\frac{b-a}{4} \right)^{n+1}, \quad (2.27)$$

а ошибка интерполирования (2.23) определяется формулой

$$|f(x) - g_n(x)| \leq \max_x |f^{(n+1)}(x)| \frac{(b-a)^{n+1}}{(n+1)! 2^{n+1}}. \quad (2.28)$$

Можно показать, что получить оценку для ошибки интерполяции лучше, чем (2.28), невозможно

Интерполирование с выбором узловых точек по правилу (2.26) часто называют *чебышевским* или *минимаксным приближением*, поскольку оно позволяет обеспечить минимальное значение модуля максимума ошибки. Следует обратить внимание на то, что узлы интерполирования, определяемые согласно правилу (2.26), не являются равноотстоящими. Они сгущаются к концам отрезка. В то же время даже при таком оптимальном их выборе в общем случае нельзя гарантировать, что абсолютная величина ошибки будет сколь угодно малой при достаточно большом n .

* Полиномы, обладающие таким свойством, называют полиномами, наименее отклоняющимися от нуля.

Если функция $f(x)$ задана таблично и ее аналитическое выражение неизвестно, то оценку интерполяционного полинома в общем случае получить невозможно. Поскольку через заданные узлы интерполяции может проходить бесконечное множество функций, то всегда существует вероятность попасть на функцию с большим «выбросом» между узлами интерполирования (см. рис. 2). Поэтому при интерполировании в подобных ситуациях приходится только надеяться на определенную гладкость приближаемых функций. Несмотря на замечания по поводу точности интерполяционных формул, они находят широкое применение в вычислительной практике. Опыт показывает, что интерполяционные приближения многочленами во многих случаях дают хороший результат, когда точность приближения либо трудно оценить, либо оценки получаются довольно пессимистическими.

На решения интерполяционных задач и особенно задач экстраполяции могут накладываться дополнительные условия, которым трудно удовлетворить, используя приближающие функции полиномиального типа. Например, когда известно, что приближающая функция имеет постоянный знак или она выходит на асимптоту при больших значениях переменной величины и т. д. Для решения подобных задач используют параметрические классы функций в виде произведений, дробно-рациональные функции, многочлены, возведенные в степень, разложения по экспонентам и т. д. Теория приближения такими функциями, за исключением дробно-рациональных функций, развита гораздо слабее по сравнению с теорией многочленных приближений. Мы рассмотрим только первые два из названных классов функций.

Пусть функция $f(x)$ существенно положительна и известна в $(n+1)$ точках (x_0, x_1, \dots, x_n) . Методом интерполяции найдем приближающую функцию в классе

$$g(x, \alpha) = \prod_{i=0}^n (\alpha_i)^{\varphi_i(x)}, \quad (2.29)$$

где $\varphi_i(x)$ — полиномы порядка n ; α_i — константы. Подставляя (2.29) в (2.13), получаем следующую систему уравнений:

$$f(x_j) = \prod_{i=0}^n (\alpha_i)^{\varphi_i(x_j)}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (2.30)$$

В силу положительности $f(x)$ эти уравнения можно прологарифмировать и записать в виде

$$\ln f(x_j) = \sum_{i=0}^n \varphi_i(x_j) \ln \alpha_i, \quad j = \overline{0, n}. \quad (2.31)$$

Правые части этих уравнений являются полиномами n -го порядка относительно x , а по виду эти уравнения совпадают с уравнениями, которые можно записать для определения

параметров интерполяционного полинома для функции $\ln f(x)$. В силу единственности интерполяционного полинома Лагранжа $\varphi_i(x)$ и α_i должны определяться равенствами

$$\varphi_i(x) = L_i(x); \ln \alpha_i = \ln f(x_i). \quad (2.32)$$

Подставив (2.32) в (2.29), запишем искомую приближающую функцию в виде

$$g_n(x) = \prod_{i=0}^n [f(x_i)]^{L_i(x)}. \quad (2.33)$$

Этот результат можно получить проще, если сразу поставить задачу приближения $f(x)$ не в классе (2.29), а ее логарифма в классе полиномов. Для полученного результата будут справедливы все рассуждения и оценки точности интерполяции, если в них функцию $f(x)$ заменить $\ln f(x)$.

Хорошие результаты при решении интерполяционных задач получаются при выборе приближающей функции из класса дробно-линейных функций вида

$$g(x, \alpha, \beta) = \frac{\alpha_k x^k + \alpha_{k-1} x^{k-1} + \dots + \alpha_1 x + \alpha_0}{x^m + \beta_{m-1} x^{m-1} + \dots + \beta_1 x + \beta_0}. \quad (2.34)$$

Коэффициент при x^m всегда можно сделать равным единице путем деления числителя и знаменателя на первоначальный коэффициент.

Дробно-линейные функции обладают важными асимптотическими свойствами, необходимыми при аппроксимации некоторых физических зависимостей. Как видно из (2.34), при больших x они ведут себя как x^{k-m} . При $k > m$ их абсолютная величина растет с ростом x , при $k < m$ стремится к нулю, а при $k = m$ стремится к асимптотическому значению, определенному коэффициентом α_k .

Для определения параметров α и β подставляем (2.34) в (2.15) и, приводя результирующие уравнения к общему знаменателю, получаем следующую систему линейных уравнений относительно α и β .

$$\begin{aligned} f(x_i) [x_i^m + \beta_{m-1} x_i^{m-1} + \dots + \beta_1 x_i + \beta_0] = \\ = \alpha_k x_i^k + \alpha_{k-1} x_i^{k-1} + \dots + \alpha_1 x_i + \alpha_0, \quad i = \overline{0, n}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Для разрешимости этой системы, содержащей $k+m-1$ неизвестных, число узлов интерполяции должно удовлетворять условию $n = k+m-2$.

Приближение дробно-рациональными функциями сопряжено с одной опасностью. Возможны ситуации, когда у найденной интерполирующей функции знаменатель обращается в нуль в некоторых точках области приближения. Это приводит к бесконечно большим ошибкам в данных точках. Для устранения этого нежелательного эффекта следует всегда исследовать нули знаменателя у результирующей формулы.

§ 11. Конечные разности и их применение в задачах интерполяции

Понятие конечной разделенной разности первого порядка¹, взятой от функции $f(x)$ в точках x_i, x_{i+1} , определяется как

$$f(x_i, x_{i+1}) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (2.36)$$

и является аналогом понятия производной в математическом анализе. Действительно, из (2.36) видно, что если $f(x)$ непрерывна и удовлетворяет необходимым условиям гладкости, то

$$\lim_{x_{i+1} \rightarrow x_i} f(x_i, x_{i+1}) = \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i}. \quad (2.37)$$

Разделенную разность второго порядка — аналог второй производной — определим как

$$f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) = \frac{f(x_{i+1}, x_{i+2}) - f(x_i, x_{i+1})}{x_{i+2} - x_i}. \quad (2.38)$$

Продолжая этот процесс для k -й разделенной разности — аналога k -й производной, получаем формулу

$$\begin{aligned} f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+k}) = \\ = \frac{f(x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+k}) - f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+k-1})}{x_{i+k} - x_i}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Для разделенных разностей k -го порядка можно показать справедливость равенства

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{i=0}^k \frac{f(x_i)}{\omega_k'(x_i)}; \\ \omega_k(x_i) = \prod_{j \neq i} (x_i - x_j). \end{aligned} \quad (2.40)$$

С его помощью запишем интерполяционный полином Лагранжа (2.20) через разделенные разности. Приведем его сначала к виду

$$\begin{aligned} g_n(x) = g_1(x) + [g_2(x) - g_1(x)] + \\ + [g_3(x) - g_2(x)] + \dots + [g_n(x) - g_{n-1}(x)]. \end{aligned} \quad (2.41)$$

¹ Разделенные разности нулевого порядка совпадают со значениями самой функции.

Для любой скобки, содержащей разность полиномов $g_m(x)$ и $g_{m-1}(x)$, с учетом (2.20) выпишем следующую цепочку равенств:

$$\begin{aligned}
 g_m(x) - g_{m-1}(x) &= \sum_{i=0}^m f(x_i) \frac{(x-x_m) \omega_{m-1}(x)}{(x-x_i) \omega'_m(x_i)} - \\
 &- \sum_{i=0}^{m-1} f(x_i) \frac{\omega_{m-1}(x)}{(x-x_i) \omega'_{m-1}(x_i)} = \omega_{m-1}(x) \left\{ \frac{f(x_m)}{\omega'_m(x_i)} + \right. \\
 &+ \left. \sum_{i=0}^{m-1} f(x_i) \frac{1}{(x-x_i) \omega'_{m-1}(x_i)} \left[\frac{x-x_m}{x_i-x_m} - 1 \right] \right\} = \\
 &= \omega_{m-1}(x) \left\{ \frac{f(x_m)}{\omega'_m(x_i)} + \sum_{i=0}^{m-1} \frac{f(x_i)}{(x_i-x_m) \omega'_m(x_i)} \right\} = \\
 &= \omega_{m-1}(x) \sum_{i=0}^m \frac{f(x_i)}{\omega'_m(x_i)}. \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

Подставляя сюда (2.40), получаем

$$g_m(x) - g_{m-1}(x) = \omega_{m-1} f(x_1; x_2; \dots; x_m). \quad (2.43)$$

Заменяя в (2.41) квадратные скобки на основании равенства (2.43), запишем интерполяционный полином Лагранжа в виде

$$\begin{aligned}
 g_n(x) &= f(x_0) + f(x_0; x_1)(x-x_0) + \\
 &+ f(x_0; x_1; x_2)(x-x_0)(x-x_1) + \dots + \\
 &+ f(x_0; x_1; \dots; x_n)(x-x_0)(x-x_1) \dots (x-x_{n-1}). \quad (2.44)
 \end{aligned}$$

Эта формула записи интерполяционного многочлена называется интерполяционным полиномом Ньютона с разделенными разностями. Когда расстояние между соседними узлами интерполяции постоянно и равно h , формулу (2.44) можно упростить. Для этого случая первая разделенная разность будет

$$f(x; x+h) = \frac{1}{h} \Delta f(x); \quad \Delta f(x) = f(x+h) - f(x), \quad (2.45)$$

где Δ — оператор конечной разности, или просто оператор разности.

Вторая разделенная разность будет

$$f(x; x+h; x+2h) = \frac{1}{2h} \left[\frac{f(x+2h) - f(x+h)}{h} - \right.$$

$$\left. - \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \right] = \frac{f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x)}{2h^2} = \frac{1}{2h^2} \Delta^2 f(x). \quad (2.46)$$

Здесь Δ^2 обозначает повторное применение разностного оператора. Действительно,

$$\begin{aligned}
 \Delta^2 f(x) &= \Delta [\Delta f(x)] = f(x+2h) - f(x+h) - \\
 &- f(x+h) + f(x) = f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x). \quad (2.47)
 \end{aligned}$$

Продолжая эту процедуру, нетрудно показать, что разделенная разность n -го порядка в этом случае определяется равенством

$$f(x; x+h; \dots; x+nh) = \frac{1}{nh^n} \Delta^n f(x). \quad (2.48)$$

На основании (2.48) интерполяционный полином Ньютона (2.44) для случая равноотстоящих узлов интерполяции можно записать в конечных разностях

$$\begin{aligned}
 g_n(x) &= f(x_0) + \Delta f(x_0) \frac{t}{1!} + \Delta^2 f(x_0) \frac{t(t-1)}{2!} + \\
 &+ \dots + \Delta^n f(x_0) \frac{t(t-1)(t-2) \dots (t-n+1)}{n!}; \quad t = \frac{x-x_0}{h}. \quad (2.49)
 \end{aligned}$$

Формулу (2.49) называют интерполяционной формулой Ньютона для интерполирования вперед. В тех случаях, когда удобно считать разности не от начала, а от конца таблицы значений $f(x)$, обычно пользуются *интерполяционной формулой Ньютона для интерполирования назад*, которая имеет вид

$$\begin{aligned}
 g_n(x) &= f(x_n) + \Delta f(x_n) \frac{z}{1!} + \Delta^2 f(x_n) \frac{z(z+1)}{2!} + \\
 &+ \dots + \Delta^n f(x_n) \frac{z(z+1)(z+2) \dots (z+n-1)}{n!}; \quad z = \frac{x-x_n}{h}. \quad (2.50)
 \end{aligned}$$

Можно получить и другие формы записей интерполяционных полиномов [4, 40]. Однако в силу единственности интерполяционного полинома все они будут тождественно равны при неизменном выборе узлов интерполяции. При практическом использовании формулы (2.49) конечные разности различных поряд-

Таблица 8

x	$f(x)$	$\Delta f(x)$	$\Delta^2 f(x)$	$\Delta^3 f(x)$
x_0	$f(x_0)$	$\Delta f(x_0)$	$\Delta^2 f(x_0)$	$\Delta^3 f(x_0)$
x_1	$f(x_1)$	$\Delta f(x_1)$	$\Delta^2 f(x_1)$	$\Delta^3 f(x_1)$
x_2	$f(x_2)$	$\Delta f(x_2)$	$\Delta^2 f(x_2)$	$\Delta^3 f(x_2)$
x_3	$f(x_3)$	$\Delta f(x_3)$	$\Delta^2 f(x_3)$	\dots
x_4	$f(x_4)$	$\Delta f(x_4)$	\dots	\dots
x_5	$f(x_5)$	\dots	\dots	\dots
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots

x	$f(x)$	$\Delta f(x)$	$\Delta^2 f(x)$	$\Delta^3 f(x)$
x_0	$f(x_0)$	$\Delta f(x_0)$	$\Delta^2 f(x_0)$	$\Delta^3 f(x_0)$
x_1	$f(x_1)$	$\Delta f(x_1)$	$\Delta^2 f(x_1)$	$\Delta^3 f(x_1)$
x_2	$f(x_2)$	$\Delta f(x_2)$	$\Delta^2 f(x_2)$	$\Delta^3 f(x_2)$
x_3	$f(x_3)$	$\Delta f(x_3)$	$\Delta^2 f(x_3)$...
x_4	$f(x_4)$	$\Delta f(x_4)$
x_5	$f(x_5)$

ков удобно вычислять и записывать в виде табл. 8 или 9, в которых $x_i = x_0 + ih$.

Если порядок интерполяционного многочлена известен и его узловые точки заданы, то, используя данные таблицы разностей, не составляет труда вычислить правую часть формулы (2.49) или (2.50). Однако в практических ситуациях таких данных обычно не бывает. Как быть? Начнем с выяснения вопроса об оценке порядка интерполяционного полинома. Обратим внимание на то, что так же, как и операция взятия производной, применение разностного оператора к полиному понижает на единицу его порядок. Чтобы показать это, заметим, что в силу линейности разностного оператора операцию его применения

к многочлену $\sum_{i=0}^n \alpha_i x^i$ можно записать в виде

$$\Delta \left(\sum_{i=0}^n \alpha_i x^i \right) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \Delta(x^i). \quad (2.51)$$

Для разности Δx^i из определения (2.46) и правила разложения бинома получим

$$\begin{aligned} \Delta x^i &= (x+h)^i - x^i = \sum_{k=0}^i \binom{i}{k} x^{i-k} h^k - \\ &- x^i = ihx^{i-1} + \sum_{k=2}^i \binom{i}{k} x^{i-k} h^k. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Здесь $\binom{i}{k}$ — число сочетаний из i по k .

Таким образом, мы получили, что порядок каждого слагаемого в (2.51) уменьшается на единицу. Следовательно, порядок всего полинома также уменьшается на единицу, что и требовалось доказать. Кроме того, из (2.52) путем замены i на n получаем, что однократное применение разностного оператора к полиному n -й степени со старшим членом $\alpha_0 x^n$ порождает полином порядка $(n-1)$ со старшим членом $\alpha_0 n h x^{n-1}$. Повторяя эту операцию, на k -м шаге получим полином $(n-k)$ -го порядка со старшим членом $\alpha_0 n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1)h^k x^{n-k}$. При $k=$

x°	$f(x)$	$\Delta f \cdot 10^{-4}$	$\Delta^2 f \cdot 10^{-4}$	$\Delta^3 f \cdot 10^{-4}$
15	0,2588			
20	0,3420	832	-26	
25	0,4226	806	-32	-6
30	0,5000	774	-38	-6
35	0,5736	736	-44	-6
40	0,6428	692	-49	-5
45	0,7071	643		

$=n$, т. е. для n -й разности полинома n -й степени, получим константу $\alpha_n h^n n!$. Все разности более высоких порядков будут равны нулю. Этот результат является основой для оценки порядка интерполяционного полинома. По таблице разностей определяем столбец разностей, который с допустимой для нас точностью можем считать составленным из постоянных величин. Порядок разностей для этого столбца принимаем за порядок интерполяционного полинома. Выбрав порядок полинома, мы тем самым определим необходимое число узлов интерполяции. Если при этом есть свобода в выборе расположения узлов, то для обеспечения большей точности интерполяции [4, 40] их надо располагать по возможности симметрично относительно интерполируемой точки.

Пример. Рассмотрим задачу интерполирования функции $f(x) = \sin x$ в точке $x = 14^\circ$ по таблице ее значений (табл. 10).

Из табл. 10 видно, что столбец с третьей разностью можно считать практически постоянным. Поэтому выбираем полином третьего порядка, а в качестве узлов берем первые четыре значения x . Величина t в (2.49) определяется равенством

$$t = \frac{14^\circ - 15^\circ}{5^\circ} = -0,2^\circ.$$

Подставляя в (2.49) подчеркнутые значения из табл. 10, получаем

$$\begin{aligned} \sin 14^\circ &= 0,2588 + (-0,2) \cdot 832 \cdot 10^{-4} + \\ &+ \frac{(-0,2)(-1,2)}{2!} \cdot (26 \cdot 10^{-4}) + \frac{(-0,2)(-1,2)(-2,2)}{3!} \cdot (-6 \cdot 10^{-4}) = 0,24190. \end{aligned} \quad (2.53)$$

По табличным данным $\sin 14^\circ = 0,24192$.

Рассчитаем оценку ошибки полученного приближения. Учитывая, что при взятии производной от тригонометрических функций величины углов исчисляются в радианах, согласно (2.24) получим

$$\begin{aligned} |\sin 14^\circ - g_4(14^\circ)| &\leq \max_{\xi} |\cos \xi| (0,0436)^4 \frac{0,2 \cdot 1,2 \cdot 2,2 \cdot 3,2}{4!}, \\ &\xi \in [14^\circ, 30^\circ]. \end{aligned} \quad (2.54)$$

* При составлении таблиц разностей множитель (в нашем случае 10^{-4}) обычно не пишется ввиду его очевидности. Для проверки правильности вычисленных разностей можно пользоваться правилом: сумма элементов столбца и верхнего элемента левого соседнего столбца равна нижнему элементу левого соседнего столбца.

Таблица 11

n	S_n	ΔS_n	$\Delta^2 S_n$	$\Delta^3 S_n$
n	S_n			
$n+1$	S_{n+1}	$(n+1)^2$	$2(n+1)+1$	
$n+2$	S_{n+2}	$(n+2)^2$	$2(n+2)+1$	2
$n+3$	S_{n+3}	$(n+3)^2$	$2(n+3)+1$	2
$n+4$	S_{n+4}	$(n+4)^2$		

Максимальное значение $|\cos \xi|$ достигается при $\xi=14^\circ$. Оценивая $\cos 14^\circ$ через полученное значение синуса этого угла, вычислим правую часть (2.54):

$$|\sin 14^\circ - g_4(14^\circ)| \leq 0,00000027. \quad (2.55)$$

Сравнение этой оценки точности с табличным значением $\sin 14^\circ$ и с полученной оценкой его величины, показывает завышенную оценку для точности нашего приближения. Это объясняется только неточностью задания значений приближаемой функции в узлах интерполяции.

А что будет, если вместо полинома третьей степени мы будем использовать квадратичный интерполяционный полином? Вероятно, точность интерполяции должна уменьшаться. Действительно, без учета последнего слагаемого при расчете ряда (2.53), соответствующего члену третьего порядка интерполяционного ряда, получим $\sin 14^\circ = 0,2418$.

Определим порядок интерполяционного полинома, рассмотрим задачу вычисления суммы

$$S_n = \sum_{i=1}^n i^2.$$

Взяв первую разность от этой суммы, получим $\Delta S_n = S_{n+1} - S_n = (n+1)^2$, т. е. первая разность является полиномом второго порядка по переменной n . Поскольку применение разностного оператора понижает порядок полинома на единицу, получаем, что S_n является полиномом третьего порядка. К этому результату можно прийти из анализа разностей для S_n (табл. 11). Запишем S_n в параметрическом виде

$$S_n = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3. \quad (2.56)$$

Поскольку коэффициенты полинома не зависят от n , их можно найти путем сопоставления (2.56) с интерполяционной формулой для S_n при малых значениях n . Для интерполяции воспользуемся полиномом Ньютона. Вычислим первые три разности для начала ряда при $n=0, 1, 2$ и запишем их в табл. 12.

Таблица 12

n	S_n	ΔS_n	$\Delta^2 S_n$	$\Delta^3 S_n$
0	0			
1	1	1	3	
2	5	4	5	2
3	14	9	7	2
4	30	17		

Подставляя значения разностей из этой таблицы в (2.49) и приводя подобные члены, получаем

$$S_t = 0 + t + \frac{3}{2} t(t-1) + \frac{2}{6} t(t-1)(t-2) = \frac{1}{6} t + \frac{1}{2} t^2 + \frac{1}{3} t^3. \quad (2.57)$$

Из сравнения коэффициентов полиномов (2.56) и (2.57) получаем $a_0=0$, $a_1=1/6$, $a_2=1/2$, $a_3=1/3$. Подставив эти значения ко-

эффициентов в (2.56), получим окончательное выражение для искомой функции

$$S_n = \frac{1}{6} n + \frac{1}{2} n^2 + \frac{1}{3} n^3 = \frac{n(2n+1)(n+1)}{6}.$$

Другие примеры применения конечных разностей к суммированию рядов рассмотрены в монографии [40].

§ 12. Приближения по критерию совпадения признаков функций

Классическим примером построения приближающей функции по критерию совпадения локальных признаков может служить разложение приближаемой функции в ряд Тейлора. Действительно, пусть $f(x)$ — дифференцируемая функция, у которой в точке $x=a$ известны значения $(n+1)$ -х производных, начиная с нулевой¹. отождествим значения этих производных с $(n+1)$ -м признаком функции $f(x)$. Приближающую функцию $g(x, \alpha)$ будем выбирать так, чтобы признаки у $f(x)$ и у $g(x, \alpha)$ совпадали. Приравнявая выбранные признаки у $f(x)$ и у $g(x, \alpha)$, получим следующую систему уравнений для определения α :

$$f(a) = g(a, \alpha);$$

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=a} = \left. \frac{d}{dx} g(x, \alpha) \right|_{x=a}; \quad (2.58)$$

$$\dots \dots \dots \left. \frac{d^n f}{dx^n} \right|_{x=a} = \left. \frac{d^n}{dx^n} g(x, \alpha) \right|_{x=a},$$

$$\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n).$$

Рассмотрим случай, когда функция $g(x, \alpha)$ принадлежит к классу полиномов n -й степени, который для удобства определения коэффициентов α запишем в виде

$$g(x, \alpha) = \alpha_0 + \alpha_1(x-a) + \alpha_2(x-a)^2 + \dots + \alpha_n(x-a)^n. \quad (2.59)$$

Подставляя (2.59) в (2.58) и вычисля производные, получаем

$$f(a) = \alpha_0;$$

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=a} = 1! \alpha_1;$$

$$\left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=a} = 2! \alpha_2;$$

$$\dots \dots \dots \left. \frac{d^n f}{dx^n} \right|_{x=a} = n! \alpha_n$$

¹ Нулевая производная по определению совпадает с самой функцией.

или в общем виде

$$\alpha_i = \frac{1}{i!} f^{(i)}(x) \Big|_{x=a} \quad (2.60)$$

Таким образом, α_i для этого случая являются хорошо известными коэффициентами ряда Тейлора.

Если аппроксимируемая функция $f(x)$ будет обладать количественными локальными признаками, заданными не в одной точке, как в рассмотренном случае, а в разных, то общая схема определения параметров приближающей функции $g(x, \alpha)$ на основе решения системы уравнений вида (2.58), очевидно, сохраняется. Если в качестве признаков у $f(x)$ выбрать ее значения во всех известных точках ее определения, то мы придем к уже рассмотренной задаче интерполяции функции.

Помимо локальных признаков функций часто рассматривают интегральные признаки (или характеристики), которые в ряде задач кажутся более естественными. К таким характеристикам относятся моменты функций (см. § 9). Для общности постановки задачи будем считать, что приближаемая функция $f(x)$ определена на множестве Ω и известны ее моменты относительно некоторого множества функций $\Psi_i(x)$, $i=0, n$, вычисляемые по формулам

$$M_i = \int_{\Omega} \Psi_i(x) f(x) dx, \quad i=0, n. \quad (2.61)$$

Приравнивая эти моменты к соответствующим моментам приближающей функции $g(x, \alpha)$, получим систему уравнений для определения параметров α :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \Psi_0(x) g(x, \alpha) dx &= M_0; \\ \int_{\Omega} \Psi_1(x) g(x, \alpha) dx &= M_1; \\ &\dots \dots \dots \\ \int_{\Omega} \Psi_n(x) g(x, \alpha) dx &= M_n. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Наиболее часто приближающие функции выбираются из параметрического класса, линейного относительно неизвестных коэффициентов:

$$g(x, \alpha) = \alpha_0 \varphi_0(x) + \alpha_1 \varphi_1(x) + \dots + \alpha_n \varphi_n(x). \quad (2.63)$$

Подставляя (2.63) в (2.62), получаем

$$\begin{aligned} \alpha_0 \int_{\Omega} \Psi_0(x) \varphi_0(x) dx + \alpha_1 \int_{\Omega} \Psi_0(x) \varphi_1(x) dx + \dots + \\ + \alpha_n \int_{\Omega} \Psi_0(x) \varphi_n(x) dx &= M_0; \\ \alpha_0 \int_{\Omega} \Psi_1(x) \varphi_0(x) dx + \alpha_1 \int_{\Omega} \Psi_1(x) \varphi_1(x) dx + \dots + \\ + \alpha_n \int_{\Omega} \Psi_1(x) \varphi_n(x) dx &= M_1; \\ &\dots \dots \dots \\ \alpha_0 \int_{\Omega} \Psi_n(x) \varphi_0(x) dx + \alpha_1 \int_{\Omega} \Psi_n(x) \varphi_1(x) dx + \dots + \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$+ \alpha_n \int_{\Omega} \Psi_n(x) \varphi_n(x) dx = M_n.$$

Поскольку все интегралы в этих уравнениях при известных функциях $\varphi_i(x)$ и $\Psi_j(x)$ можно вычислить, система уравнений (2.64) является линейной системой уравнений относительно параметров α . Используя матричные обозначения, запишем (2.64) в более компактном виде

$$C\alpha = M, \quad (2.65)$$

где

$$C = \begin{pmatrix} \langle \Psi_0, \varphi_0 \rangle & \langle \Psi_0, \varphi_1 \rangle & \dots & \langle \Psi_0, \varphi_n \rangle \\ \langle \Psi_1, \varphi_0 \rangle & \langle \Psi_1, \varphi_1 \rangle & \dots & \langle \Psi_1, \varphi_n \rangle \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \langle \Psi_n, \varphi_0 \rangle & \langle \Psi_n, \varphi_1 \rangle & \dots & \langle \Psi_n, \varphi_n \rangle \end{pmatrix};$$

$$M = \begin{pmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \dots \\ M_n \end{pmatrix};$$

$$\langle \Psi_j, \varphi_i \rangle = \int_{\Omega} \Psi_j(x) \varphi_i(x) dx.$$

Вычисление скалярных произведений для произвольных функций φ_i и Ψ_j и решение системы (2.65) — задача довольно трудоемкая. Она может быть существенно упрощена, если система функций $\{\Psi_j\}$ на множестве Ω обладает свойством взаимной ортогональности с весом $^1 \eta(x)$, т. е.

$$\int_{\Omega} \eta(x) \Psi_i(x) \Psi_j(x) dx = \begin{cases} A_i, & \text{если } i=j, \\ 0, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \quad (2.66)$$

а функции $\varphi_j(x)$ и $\Psi_j(x)$ удовлетворяют равенству

$$\varphi_j(x) = \eta(x) \Psi_j(x). \quad (2.67)$$

В этом случае скалярные произведения, входящие в (2.65), можно записать в виде

$$\langle \Psi_j, \varphi_i \rangle = \int_{\Omega} \eta(x) \Psi_i(x) \Psi_j(x) dx = \begin{cases} A_i & \text{если } i=j, \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (2.68)$$

¹ Система функций $\Psi_i(x)$ называется ортонормированной, если все $A_i = 1$ ($i=0, n$).

Отсюда следует, что диагональные элементы матрицы $C_{ii} = A_i$, $i = \overline{0, n}$, а остальные ее элементы равны нулю¹. Решение системы уравнений с такой матрицей будет иметь вид

$$\alpha_i = \frac{1}{A_i} M_i = \frac{1}{A_i} \int_{\Omega} f(x) \Psi_i(x) dx, \quad i = \overline{0, n}. \quad (2.69)$$

Такое взаимно независимое вычисление коэффициентов α_i очень удобно при последовательном уточнении приближающей функции путем добавления членов ее ряда, если полученная точность приближения оказалась недостаточной.

При обработке результатов наблюдений обычно приходится аппроксимировать функции, заданные на дискретном множестве точек. Для распространения критерия приближения по интегральным характеристикам функций в этом случае надо операции интегрирования в определении моментов (2.61) и скалярных произведений (2.65) заменить операциями суммирования. Например, если $f(x)$ задана на конечном множестве точек x_k ($k = \overline{1, m}$), то моменты этой функции относительно функций $\Psi_j(x)$ и скалярные произведения функций $\varphi_i(x)$ и $\Psi_j(x)$ на этом множестве будут определяться равенствами

$$M_j = \sum_{k=1}^m \varphi_j(x_k) f(x_k);$$

$$\langle \Psi_j, \varphi_i \rangle = \sum_{k=1}^m \Psi_j(x_k) \varphi_i(x_k). \quad (2.70)$$

Определение ортогональности функций $\Psi_j(x)$ (2.66) также справедливо для конечного множества точек с учетом замены знака интеграла знаком суммы. Поэтому при решении задачи приближения функции, заданной на конечном множестве точек, будут справедливы все предыдущие рассуждения и результаты с учетом замены операций интегрирования операциями суммирования. Коэффициенты α_i для этого случая вместо формулы (2.69) будут определяться равенствами

$$\alpha_i = M_i/A_i = 1/A_i \sum_{k=1}^m f(x_k) \Psi_i(x_k),$$

$$i = \overline{0, n}. \quad (2.71)$$

Ортогональность — не «экзотическое» свойство функций. Известно большое число систем функций, обладающих этим свойством. Кроме того, из любого набора линейно-независимых функций $\{\xi_i(x)\}$ можно построить ортогональную систему функций. Общим для такого построения является метод ортогонализации Шмидта, состоящий в том, что i -я по порядку функция ортогональной системы представляется в виде линейной комбинации уже найденных функций $\Psi_j(x)$ ($j = \overline{0, i-1}$) и i -й функ-

¹ Такая матрица называется диагональной.

ции исходной системы. Запишем это правило вычисления очередной ортогональной функции $\Psi_i(x)$ в виде

$$\lambda_{ii} \Psi_i(x) = \xi_i(x) + \sum_{j=0}^{i-1} \lambda_{ij} \Psi_j(x). \quad (2.72)$$

Коэффициенты λ_{ij} определяются из условия ортогональности и нормировки¹ системы функций $\{\Psi_j(x)\}$. При этом для построения $\Psi_0(x)$ требуется определить только один нормировочный коэффициент λ_{00} , для построения $\Psi_1(x)$ требуется вычислять два коэффициента, для $\Psi_2(x)$ — три коэффициента и т. д. Таким образом, процедура ортогонализации Шмидта в общем случае усложняется с ростом порядкового номера определяемой функции из системы $\{\Psi_i(x)\}$.

Если функции $\Psi_i(x)$ являются полиномами порядка i , то их последовательное определение можно упростить за счет того, что любые три из них связаны рекуррентным соотношением:

$$\lambda_{i+1} \Psi_{i+1}(x) = x \Psi_i(x) + a_{i+1} \Psi_i(x) + b_{i+1} \Psi_{i-1}(x). \quad (2.73)$$

Коэффициенты λ_{i+1} , a_{i+1} и b_{i+1} определим из условий ортонормированности функций $\Psi_i(x)$.

Умножая последовательно (2.73) на $\Psi_i(x)$ и $\Psi_{i-1}(x)$ и интегрируя (или суммируя) по всему множеству Ω , на котором строится ортогональная система с учетом обозначений для скалярных произведений, получаем

$$\lambda_{i+1} \langle \Psi_{i+1}, \Psi_i \rangle = \langle x \Psi_i, \Psi_i \rangle + a_{i+1} \langle \Psi_i, \Psi_i \rangle + b_{i+1} \langle \Psi_{i-1}, \Psi_i \rangle;$$

$$\lambda_{i+1} \langle \Psi_{i+1}, \Psi_{i-1} \rangle = \langle x \Psi_i, \Psi_{i-1} \rangle + a_{i+1} \langle \Psi_i, \Psi_{i-1} \rangle + b_{i+1} \langle \Psi_{i-1}, \Psi_{i-1} \rangle.$$

Поскольку по условию ортогональности $\langle \Psi_i, \Psi_j \rangle = 0$, если $i \neq j$ и $\langle \Psi_i, \Psi_i \rangle = 1$, из (2.74) получим

$$a_{i+1} = -\langle x \Psi_i, \Psi_i \rangle; \quad b_{i+1} = -\langle x \Psi_i, \Psi_{i-1} \rangle. \quad (2.75)$$

Для определения нормировочного коэффициента λ_{i+1} возведем обе части (2.75) в квадрат и проинтегрируем (или просуммируем) по всему множеству Ω . В результате получим

$$\lambda_{i+1}^2 \langle \Psi_{i+1}, \Psi_{i+1} \rangle = \langle x \Psi_i, x \Psi_i \rangle + a_{i+1}^2 \langle \Psi_i, \Psi_i \rangle + b_{i+1}^2 \langle \Psi_{i-1}, \Psi_{i-1} \rangle + 2a_{i+1} \langle x \Psi_i, \Psi_i \rangle + 2b_{i+1} \langle x \Psi_i, \Psi_{i-1} \rangle + 2a_{i+1} b_{i+1} \langle \Psi_i, \Psi_{i-1} \rangle. \quad (2.76)$$

¹ Корень квадратный из скалярного умножения функции $\Psi(x)$ на саму себя называется нормой этой функции и обозначается как $\|\Psi\|$. Понятие нормы обобщает понятие абсолютной величины числа и понятие длины вектора. (При $\eta(x) = 1$ величина A_i в (2.66)) равна квадрату нормы функции $\Psi_i(x)$.)

Учитывая свойства ортогональности входящих сюда функций, а также равенства (2.75), приведем (2.76) к виду

$$\lambda_{i+1}^2 = \langle x\Psi_i, x\Psi_i \rangle - a_{i+1}^2 - b_{i+1}^2 \quad (2.77)$$

или

$$\lambda_{i+1} = [\langle x\Psi_i, x\Psi_i \rangle - a_{i+1}^2 - b_{i+1}^2]^{1/2}.$$

Начальную функцию системы $\Psi_0(x)$ можно выбирать произвольно, учитывая только условие ее нормировки. Пусть она пропорциональна некоторому полиному¹, который обозначим $v(x)$, т. е.

$$\Psi_0(x) = \lambda_0 v(x). \quad (2.78)$$

Условие нормировки этой функции запишем в виде равенства

$$\langle \Psi_0, \Psi_0 \rangle = \lambda_0^2 \langle v, v \rangle = 1. \quad (2.79)$$

Определяя отсюда λ_0 и подставляя в (2.78), получаем

$$\Psi_0 = \frac{v(x)}{\|v(x)\|}. \quad (2.80)$$

Функцию $\Psi_1(x)$ теперь можно определить из (2.72), полагая, что $\Psi_{-1}(x) = 0$ и т. д.

Построим три первых (начиная с нулевого) ортогональных полинома на множестве точек $x = (0, 1, 2, 3, 4)$. Из условия задачи полагаем $v(x) = c$. Тогда из (2.80) получаем

$$\Psi_0(x) = \frac{c}{\left[\sum_{i=1}^5 c^2\right]^{1/2}} = \frac{1}{\sqrt{5}}.$$

Согласно (2.72), вторая функция определяется равенством

$$\Psi_1(x) = \frac{1}{\lambda_1} [x\Psi_0(x) + a_1\Psi_0(x)].$$

Из (2.77) и (2.79) определяем a_1 и λ_0

$$a_1 = -\sum_{i=1}^5 x_i \Psi_0^2 = -\frac{1}{5} \sum x_i = -\frac{10}{5} = -2;$$

$$\lambda_1^2 = \sum_{i=1}^5 x_i^2 \Psi_0^2 - 4 = \frac{30}{5} - 4 = 2.$$

Подставляя эти значения в выражение для $\Psi_1(x)$, получаем

$$\Psi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{x}{\sqrt{5}} - \frac{2}{\sqrt{5}} \right] = \frac{1}{\sqrt{10}} (x-2).$$

Третья функция определяется равенством

$$\Psi_2(x) = \frac{1}{[\lambda_2]} [x\Psi_1'(x) + a_2\Psi_1(x) + b_2\Psi_0(x)].$$

¹ Обычно в качестве начальной функции выбирают полином нулевого порядка.

Из (2.77) и (2.79) определяем a_2 , b_2 и λ_2

$$a_2 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^5 (x_i - 2)^2 x_i = -\frac{20}{10} = -2;$$

$$b_2 = -\frac{1}{\sqrt{50}} \sum_{i=1}^5 (x_i - 2) x_i = -\frac{10}{\sqrt{50}} = -\sqrt{2};$$

$$\lambda_2^2 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^5 (x_i - 2)^2 x_i^2 - 4 - 2 = \frac{74}{10} - 6 = \frac{7}{5}.$$

Подставляя эти значения в выражение для $\Psi_2(x)$, получаем

$$\Psi_2(x) = \frac{1}{\sqrt{14}} [(x-2)^2 - 2].$$

Применение ортогональных функций в задачах аппроксимации по критерию совпадения признаков рассмотрим на примере приближения плотности распределения $p(x)$ рядом из полиномов Эрмита. Эти полиномы определены на всей вещественной оси и ортогональны с весом

$$\eta(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2.81)$$

и удовлетворяют условию нормировки¹:

$$\langle \eta(x) H_i, H_j \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(x) H_i(x) H_j(x) dx = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j, \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (2.82)$$

Первые пять полиномов имеют вид

$$\begin{aligned} H_0 &= 1; & H_1(x) &= x; & H_2(x) &= x^2 - 1; \\ H_3(x) &= x^3 - 3x; & H_4(x) &= x^4 - 6x^2 + 3. \end{aligned}$$

Любые три последовательных полинома Эрмита связаны рекуррентным соотношением

$$H_{i+1}(x) = xH_i(x) - iH_{i-1}(x) \quad (2.83)$$

Приближающий ряд запишем в виде

$$g(x, \alpha) = \sum_{i=0}^n \alpha_i H_i(x) \eta(x).$$

Коэффициенты этого ряда согласно (2.68) запишем в виде

$$\alpha_i = \frac{1}{i!} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) H_i(x) dx. \quad (2.84)$$

¹ Весовая функция $\eta(x)$ вводится для того, чтобы интеграл в правой части (2.82) имел конечное значение.

Поскольку $H_i(x)$ являются полиномами, величины α_i можно выразить через моменты плотности распределения $p(x)$. Так, первые пять коэффициентов будут

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1; & \alpha_1 &= \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx = m_1; \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2!} \int_{-\infty}^{+\infty} (x^2 - 1)p(x) dx = \frac{m_2 - 1}{2!}; & (2.85) \\ \alpha_3 &= \frac{1}{3!} (m_3 - 3m_1); & \alpha_4 &= \frac{1}{4!} (m_4 - 6m_2 + 3), \end{aligned}$$

где $m_i = \int_{-\infty}^{+\infty} x^i p(x) dx$ — i -й момент плотности распределения $p(x)$.

Подставив найденные значения α_i в приближающую функцию, запишем ее первые слагаемые в виде

$$\begin{aligned} g(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \left[1 + m_1 x + \frac{1}{2!} (m_2 - m_1^2) (x^2 - 1) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{3!} (m_3 - 3m_1) (x^3 - 3x) + \frac{1}{4!} (m_4 - 6m_2 + 3) (x^4 - 6x^2 + 3) + \dots \right]. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Применение других систем ортогональных функций в задачах аппроксимации плотностей распределений рассмотрено в монографии [19].

§ 13. Среднеквадратичное приближение

Для разбора процедуры отыскания приближения по этому критерию предположим, что нам надо определить статическую характеристику объекта, имеющего n входов $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и один выход y . Имеется m пар экспериментальных данных $(y_1, \mathbf{X}_1), (y_2, \mathbf{X}_2); \dots; (y_m, \mathbf{X}_m)$. Приближающую функцию будем искать в классе функций, линейных относительно неизвестных параметров:

$$g(\mathbf{X}, \alpha) = \sum_{j=0}^k \alpha_j \varphi_j(\mathbf{X}), \quad (2.87)$$

где $\varphi(\mathbf{X})$ — заданные функции. Критерий среднеквадратической ошибки запишем в виде

$$R = \sum_{i=1}^m [y_i - g(\mathbf{X}_i)]^2 = \sum_{i=1}^m \left[y_i - \sum_{j=0}^k \alpha_j \varphi_j(\mathbf{X}_i) \right]^2. \quad (2.88)$$

В силу того, что наилучшее приближение реализует минимум этого критерия, рассматриваемый способ приближения часто называют методом наименьших квадратов или сокращенно МНК.

Из записи среднеквадратичного критерия в виде (2.88) видно, что он является квадратичной функцией относительно неизвестных параметров, а поэтому имеет единственную минималь-

ную точку. При этом, если в точке минимума значение критерия равно нулю, соответствующая ему функция будет проходить через все экспериментальные точки и будет, по нашему определению, интерполяционной.

Минимальную точку квадратичного полинома R можно определить путем решения системы уравнений:

$$\partial R / \partial \alpha_j = 0; \quad j = 0, \bar{k}. \quad (2.89)$$

Для упрощения процедур взятия производных и последующего решения результирующих уравнений (2.89) воспользуемся матричной символикой. Введя векторы-столбцы $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)'$, $\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k)'$ и матрицу¹

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \varphi_0(\mathbf{X}_1) & \varphi_1(\mathbf{X}_1) & \dots & \varphi_k(\mathbf{X}_1) \\ \varphi_0(\mathbf{X}_2) & \varphi_1(\mathbf{X}_2) & \dots & \varphi_k(\mathbf{X}_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(\mathbf{X}_m) & \varphi_1(\mathbf{X}_m) & \dots & \varphi_k(\mathbf{X}_m) \end{pmatrix},$$

перепишем (2.88) в матричной форме²

$$R = (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha)' (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha). \quad (2.90)$$

Систему уравнений (2.89) из которой определяется вектор параметров α также запишем в матричной форме:

$$\frac{dR}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} [\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha]' (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha). \quad (2.91)$$

Производная от скалярного произведения по вектору-столбцу есть вектор-строка, т. е. если \mathbf{a} и \mathbf{b} — векторы-столбцы, то

$$\frac{d}{d\alpha} (\mathbf{a}\mathbf{b}) = \mathbf{a}' \frac{d\mathbf{b}}{d\alpha} + \mathbf{b}' \frac{d\mathbf{a}}{d\alpha}.$$

Учитывая это правило взятия производной по вектору, правую часть (2.91) приведем к виду

$$\begin{aligned} \frac{dR}{d\alpha} &= (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha)' \frac{d}{d\alpha} (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha) + (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha)' \times \\ &\times \frac{d}{d\alpha} (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha) = 2(\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha)' \frac{d}{d\alpha} (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha) = -2(\mathbf{Y} - \mathbf{A}\alpha)' \mathbf{A}. \end{aligned}$$

Сокращая константы и раскрывая скобки по правилам матричного умножения, получаем

$$\alpha' (\mathbf{A}'\mathbf{A}) = \mathbf{Y}'\mathbf{A}$$

или после транспонирования обеих частей этого равенства

$$\mathbf{C}\alpha = \mathbf{A}'\mathbf{Y}; \quad \mathbf{C} = \mathbf{A}'\mathbf{A}. \quad (2.92)$$

Эту систему уравнений обычно называют *системой нормальных уравнений* или *системой уравнений метода наименьших квадратов в нормальной форме*.

¹ Значок «'» означает транспонирование.

² Необходимый справочный материал по векторному дифференцированию дается в приложении.

Если количество различающихся экспериментальных точек больше числа определяемых коэффициентов α , то матрица C размером $(k+1) \times (k+1)$ всегда не вырожденная и имеет обратную матрицу B^{-1} . Умножая на нее правую и левую части (2.92) и опуская единичную матрицу $I = C^{-1} \cdot C$, получаем

$$\alpha = C^{-1} A' Y. \quad (2.93)$$

Процедуры определения обратных матриц очень трудоемки. Поэтому, если неизвестны никакие дополнительные свойства матрицы A , позволяющие упростить определение обратной матрицы, соотношение (2.93) обычно не применяется для определения вектора α . Как правило, его бывает легче найти путем решения исходной системы нормальных уравнений (2.92).

Учитывая определение матрицы A , запишем матрицу C и вектор $A'Y$, входящие в систему нормальных уравнений (2.92), в виде

$$C = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m \varphi_0^2(X_i) & \sum_{i=1}^m \varphi_0(X_i) \varphi_1(X_i) & \dots & \sum_{i=1}^m \varphi_0(X_i) \varphi_n(X_i) \\ \sum_{i=1}^m \varphi_1(X_i) \varphi_0(X_i) & \sum_{i=1}^m \varphi_1^2(X_i) & \dots & \sum_{i=1}^m \varphi_1(X_i) \varphi_n(X_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n \varphi_n(X_i) \varphi_0(X_i) & \sum_{i=1}^n \varphi_n(X_i) \varphi_1(X_i) & \dots & \sum_{i=1}^n \varphi_n^2(X_i) \end{pmatrix},$$

$$A'Y = \left(\sum_{i=1}^m y_i \varphi_0(X_i), \sum_{i=1}^m y_i \varphi_1(X_i), \dots, \sum_{i=1}^m y_i \varphi_n(X_i) \right). \quad (2.94)$$

Из этой записи и определения скалярного произведения на конечном множестве точек (2.69) видно, что элементы матрицы C и вектора $A'Y$ являются соответственно скалярными произведениями функций φ_i и φ_j и моментами функции $y(X)$ относительно функций $\varphi_i(X)$. Используя обозначение скалярных произведений и моментов, запишем систему нормальных уравнений (2.92) в виде

$$C\alpha = M;$$

$$C = \begin{pmatrix} \langle \varphi_0, \varphi_0 \rangle & \langle \varphi_0, \varphi_1 \rangle & \dots & \langle \varphi_0, \varphi_n \rangle \\ \langle \varphi_1, \varphi_0 \rangle & \langle \varphi_1, \varphi_1 \rangle & \dots & \langle \varphi_1, \varphi_n \rangle \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \langle \varphi_n, \varphi_0 \rangle & \langle \varphi_n, \varphi_1 \rangle & \dots & \langle \varphi_n, \varphi_n \rangle \end{pmatrix};$$

$$M = (M_0, M_1, \dots, M_n)'; \quad (2.95)$$

$$M_i = \sum_{k=1}^m \varphi_i(X_k) y_k.$$

Таблица 13

x_1	x_2	y	$g(X)$
-1	-2	1	1
0	-1	4	4,1
1	0	8	7,2
2	1	10	10,3
3	3	15	15

В такой записи система нормальных уравнений полностью совпадает с системой уравнений (2.65), полученной при решении задачи приближения по критерию совпадения интегральных признаков, при условии, что функции $\Psi_i(x)$ и $\varphi_i(x)$ тождественно равны при $i=0, n$. Отсюда следует, что метод среднеквадратичного приближения можно рассматривать как частный случай метода приближения по совпадению интегральных признаков функций. Поэтому все рассуждения о возможности упрощения вычислительной процедуры решения системы (2.65) справедливы и для системы уравнений (2.95).

Для случая ортонормированной системы функций $\{\varphi_i\}$, когда C будет единичной матрицей, решение системы (2.95) можно записать в виде

$$\alpha = M \text{ или } \alpha = A'Y \text{ или}$$

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^m y_i \varphi_j(x_i), \quad j = \overline{0, n}. \quad (2.96)$$

При исследовании зависимости выхода у некоторого технологического объекта от его входов x_1 и x_2 в стационарных условиях были получены данные, приведенные в табл. 13.

По МНК найдем наилучшую приближающую функцию для этой зависимости в классе $g(X, \alpha) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2$.

Переходя к использованному ранее обозначениям, получаем $\varphi_0(X) = 1$, $\varphi_1(X) = x_1$, $\varphi_2(X) = x_2$:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 3 \end{pmatrix}; \quad \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix};$$

$$Y = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 8 \\ 10 \\ 15 \end{pmatrix}.$$

Чтобы не выписывать транспонированную матрицу A' при определении матрицы C в (2.92), можно воспользоваться следующим правилом для вычисления ее элементов. Элементы первой строки матрицы C получаются как результат скалярного умножения первого столбца матрицы A на все ее столбцы начиная с первого, т. е. с самого себя. Для рассматриваемого при-

мера элементы первой строки, которые обозначим c_{11} , c_{12} , c_{13} , определяются на основании равенств

$$\begin{aligned}c_{11} &= 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 = 5; \\c_{12} &= 1 \cdot (-1) + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 = 5; \\c_{13} &= 1 \cdot (-2) + 1 \cdot (-1) + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 3 = 1.\end{aligned}$$

Элементы второй строки матрицы C получаются как результат скалярного умножения второго столбца матрицы A на все ее столбцы, начиная с первого. Поскольку умножение второго столбца на первый дает тот же результат, что умножение первого на второй, а это уже вычислено (элемент c_{12}), умножать второй столбец на все последующие надо начинать с него самого. Для нашего примера получим

$$\begin{aligned}c_{22} &= (-1) \cdot (-1) + 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 3 = 15; \\c_{23} &= (-1) \cdot (-2) + 0 \cdot (-1) + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 3 = 13.\end{aligned}$$

Аналогичным образом элементы третьей строки матрицы C получим как результат последовательного скалярного умножения третьего столбца матрицы A на все столбцы, начиная с первого. Но поскольку первый столбец на третий и второй на третий мы уже умножали, то здесь также надо умножать третий столбец на все остальные, начиная с третьего. Так, для нашего примера

$$c_{33} = (-2)^2 + (-1)^2 + 0^2 + 1^2 + 3^2 = 15.$$

Подставив вычисленные значения c_{ij} в матрицу C и определив недостающие элементы из условия симметрии матрицы ($c_{ij} = c_{ji}$), получим

$$C = \begin{pmatrix} 5 & 5 & 1 \\ 5 & 15 & 13 \\ 1 & 13 & 15 \end{pmatrix}.$$

Правая часть уравнений (2.95)

$$A'Y = (38, 72, 49)'$$

В матричной форме система нормальных уравнений для нашего примера имеет вид

$$\begin{pmatrix} 5 & 5 & 1 \\ 5 & 15 & 13 \\ 1 & 13 & 15 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 38 \\ 72 \\ 49 \end{pmatrix}.$$

Будем решать эту систему уравнений методом исключений. На первом шаге вычислений из матрицы C и столбца свободных членов составим расширенную матрицу:

$$B = \begin{pmatrix} 5 & 5 & 1 & 38 \\ 5 & 15 & 13 & 72 \\ 1 & 13 & 15 & 49 \end{pmatrix}.$$

Путем вычитания второй строки из первой, а третьей, после ее умножения на пять, из второй исключим первые два элемента в первом столбце расширенной матрицы B . Получим

$$\begin{pmatrix} 0 & -10 & -12 & -34 \\ 0 & -50 & -62 & -173 \\ 1 & 13 & 15 & 49 \end{pmatrix}$$

Домножая первую строку на (-5) и (1.3) и складывая результаты со второй и третьей строками соответственно, исключаем последние два элемента второго столбца:

$$\begin{pmatrix} 0 & -10 & -12 & -34 \\ 0 & 0 & -2 & -3 \\ 1 & 0 & -0,6 & 5,7 \end{pmatrix}.$$

Домножая вторую строку на (-6) и $(-0,3)$ и складывая результаты с первой и третьей строками соответственно, исключаем первый и третий элементы третьего столбца:

$$\begin{pmatrix} 0 & -10 & 0 & -16 \\ 0 & 0 & -2 & -3 \\ 1 & 0 & 0 & 5,7 \end{pmatrix}.$$

Отсюда получаем значения коэффициентов $\alpha_0 = 5,7$; $\alpha_1 = 1,5$; $\alpha_2 = 1,6$. Приближающую функцию теперь можно записать в виде

$$g(X) = 5,7 + 1,5x_1 + 1,6x_2.$$

Расчитанные с этими коэффициентами значения приближаемой функции приведены в табл. 13.

§ 14. Приближение в классе экспоненциальных функций

Выбор экспоненциального класса приближающих функций в ряде задач является довольно естественным и диктуется физикой исследуемых процессов или математическими законами построения решений. При решении этих задач, как правило, априорно известно, что приближаемая функция принадлежит к параметрическому классу:

$$g(x, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^k \alpha_i e^{\beta_i x} \quad (2.97)$$

или

$$g(x, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^k \alpha_i x^{\beta_i}, \quad x \geq 0, \quad (2.98)$$

где α и β — неизвестные параметры. Эти два класса функций эквивалентны и отличаются только формой записи. Действительно, введя новую переменную $\omega = \ln x$ (2.98), можно записать

$$g(\omega, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^k \alpha_i e^{\beta_i \omega}. \quad (2.99)$$

Совпадение (2.97) и (2.99) с точностью до обозначения переменной и доказывает наше утверждение об эквивалентности.

Если предположить, что величины β_i известны, то класс функций (2.97) становится частным случаем рассмотренных ранее представлений приближающих функций в виде рядов, линейных относительно неизвестных параметров. Сложнее

случай, когда неизвестны и α_i и β_i , всего $2k$ параметров. При этом половина из них входит в определяемую функцию нелинейно.

Величины α и β будем определять на основе значений приближаемой функции y_i ($i = \overline{1, m}$), измеренных (в или вычисленных) в точках x_i ($i = \overline{1, m}$). Приравнивая поочередно эти значения приближающей функции (2.97), получаем нелинейную систему уравнений относительно искоемых параметров:

$$\begin{aligned} y_1 &= \alpha_1 e^{\beta_1 x_1} + \alpha_2 e^{\beta_2 x_1} + \dots + \alpha_k e^{\beta_k x_1}; \\ y_2 &= \alpha_1 e^{\beta_1 x_2} + \alpha_2 e^{\beta_2 x_2} + \dots + \alpha_k e^{\beta_k x_2}; \\ &\dots \\ y_m &= \alpha_1 e^{\beta_1 x_m} + \alpha_2 e^{\beta_2 x_m} + \dots + \alpha_k e^{\beta_k x_m}. \end{aligned} \quad (2.100)$$

Если расстояние между соседними точками одинаково и равно Δ , то, заменяя x_i в (2.100) на основании равенства $x_i = x_1 + (i-1)\Delta$ и переходя к новым обозначениям, получаем

$$\begin{aligned} y_1 &= \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_k; \\ y_2 &= \rho_1 z_1 + \rho_2 z_2 + \dots + \rho_k z_k; \\ y_3 &= \rho_1 z_1^2 + \rho_2 z_2^2 + \dots + \rho_k z_k^2; \\ &\dots \\ y_m &= \rho_1 z_1^{m-1} + \rho_2 z_2^{m-1} + \dots + \rho_k z_k^{m-1}; \\ \rho_i &= \alpha_i e^{\beta_i x_1}; \quad z_i = e^{\beta_i \Delta}. \end{aligned} \quad (2.101)$$

Очевидно, для разрешимости этой системы величина m должна удовлетворять условию $m \geq 2k$, так как число неизвестных $2k$. Рассмотрим сначала случай, когда $m=2k$ и система уравнений (2.101) имеет единственное решение. Для определения этого решения введем вспомогательный характеристический многочлен

$$\pi(z) = \prod_{i=1}^k (z - z_i), \quad (2.102)$$

который будет равен нулю при $z = z_i$ ($i = \overline{1, k}$), где z_i — корни уравнения (2.101). Раскрывая произведение в правой части (2.102), приведем его к виду

$$\pi(z) = \sum_{i=0}^k c_i z^i, \quad c_k \equiv 1, \quad (2.103)$$

где c_j — постоянные коэффициенты.

Если каким-то образом определить все величины c_j , то, приравнивая правую часть (2.103) к нулю, получим уравнение, корни которого являются корнями системы (2.101). Решив это урав-

нение, подставим его корни в (2.101) и определим величины β_i и α_i .

Для определения коэффициентов c_j воспользуемся следующим приемом. Умножим первое уравнение системы (2.101) на c_0 , второе на c_1 и т. д., а $(k+1)$ -е уравнение — на c_k . Полученные результаты сложим. В результате получим

$$\sum_{j=0}^k c_j y_{j+1} = \rho_1 \sum_{i=0}^k c_i z_i^0 + \rho_2 \sum_{i=0}^k c_i z_i^1 + \dots + \rho_k \sum_{i=0}^k c_i z_i^k = \sum_{i=1}^k \rho_i \pi(z_i) = 0 \quad (2.104)$$

или

$$\sum_{j=0}^k c_j y_{j+1} = 0.$$

Сдвинем начало процедуры умножения уравнений (2.101) на c_j на одно уравнение вниз и повторим ее, начиная теперь со второго уравнения. В результате получим

$$\sum_{j=0}^k c_j y_{j+2} = \sum_{i=1}^k \rho_i z_i \pi(z_i) = 0. \quad (2.105)$$

Продолжая этот процесс, получаем следующую систему линейных уравнений для определения коэффициентов:

$$\sum_{j=0}^k c_j y_{j+i} = 0, \quad c_k \equiv 1, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.106)$$

Определяем отсюда c_j . Подставляя их в характеристическое уравнение (2.105) и решая его, определяем корни z_i ($i = \overline{1, k}$) системы уравнений (2.101). Из определения z_i находим

$$\beta_i = \frac{1}{\Delta} \ln z_i, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.107)$$

Будем пока считать, что все корни z_i действительные. Случай существования комплексных корней будет рассмотрен ниже. Подставляя z_i в (2.101), получаем систему уравнений для определения ρ_i , которую запишем в матричном виде:

$$A\rho = Y; \quad (2.108)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{2k-1} & z_2^{2k-1} & \dots & z_k^{2k-1} \end{pmatrix};$$

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_k \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{2k} \end{pmatrix}.$$

Таблица 14

t	$u(t)$	$\hat{u}(t)$
0	2,51	2,512
0,2	1,12	1,117
0,4	0,53	0,526
0,6	0,27	0,266

В силу предположения о разрешимости исходной системы уравнений величины ρ_i ($i = \overline{1, k}$) можно определить из любой подсистемы системы (2.108), содержащей k уравнений. Однако, так как величины z_i из-за неточности промежуточных вычислений могут быть найдены с погреш-

ностями, значения ρ_i в общем случае будут зависеть от выбора подсистемы уравнений для их определения. Чтобы устранить эту неоднозначность, решим систему (2.108) по методу наименьших квадратов¹.

Соответствующая (2.108) система нормальных уравнений имеет вид

$$B\rho = M; \quad B = A'A; \quad M = A'Y. \quad (2.109)$$

Элементы матрицы B легко вычисляются с учетом правила суммирования геометрической прогрессии. Ее элемент

$$b_{ij} = \frac{(z_i z_j)^{2k} - 1}{z_i z_j - 1}, \quad i, j = \overline{1, k}, \quad (2.110)$$

а элемент вектора M

$$m_j = \sum_{i=1}^{2k} y_i z_i^{j-1}. \quad (2.111)$$

Решив систему уравнений (2.109), найдем величину ρ_i , а затем из определения ρ_i получим

$$\alpha_i = \rho_i e^{-\beta_i x_1} = \rho_i z_i^{-x_1/\Delta}. \quad (2.112)$$

Рассмотрим задачу аппроксимации наблюдений выхода технологического объекта $y(t)$ при снятии его переходной характеристики. В табл. 14 приведены четыре значения $u(t) = h(\infty) - h(t)$, снятые через 0,2 ч.

Предположим, что исследуемый объект может быть отождествлен с линейным объектом второго порядка. Тогда данные табл. 14 должны аппроксимироваться выражением (см. § 21)

$$y(t) = \alpha_1 e^{\beta_1 t} + \alpha_2 e^{\beta_2 t}.$$

Согласно (2.106) коэффициенты характеристического уравнения в нашем случае будут определяться системой уравнений

$$2,51c_0 + 1,12c_1 = -0,53;$$

$$1,12c_0 + 0,53c_1 = -0,27,$$

решением которой являются

$$c_0 = 0,2833; \quad c_1 = -1,1080.$$

¹ Если число уравнений велико, то вычисление вектора M в (2.108) может быть довольно трудоемкой операцией. В этом случае разумнее прибегнуть к неоднозначности определения ρ_i и найти их из первых k уравнений (2.108).

Записывая характеристическое уравнение с этими коэффициентами, получаем

$$z^2 - 1,1080z + 0,2833 = 0.$$

Корнями этого уравнения будут

$$z_{1,2} = 0,554 \pm \sqrt{(0,554)^2 - 0,2833}; \quad z_1 = 0,7077;$$

$$z_2 = 0,4003.$$

Соответствующие этим корням величины β_i согласно (2.107)

$$\beta_1 = \frac{1}{0,2} \ln 0,7064 = -1,7287,$$

$$\beta_2 = \frac{1}{0,2} \ln 0,4016 = -4,5777.$$

Для определения величин ρ_i вычислим элементы матрицы нормальных уравнений b_{ij} и элементы вектора M по формулам (2.110) и (2.111). Получим

$$b_{11} = \frac{z_1^8 - 1}{z_1^2 - 1} = 1,8879; \quad b_{12} = \frac{(z_1 \cdot z_2)^4 - 1}{z_1 \cdot z_2 - 1} = 1,3863;$$

$$b_{21} = b_{12}; \quad b_{22} = \frac{z_2^8 - 1}{z_2^2 - 1} = 1,1900;$$

$$M = (3,6638, 3,0606)'$$

Система уравнений (2.109) с этими коэффициентами имеет вид

$$1,8869\rho_1 + 1,3863\rho_2 = 3,6638;$$

$$1,3863\rho_1 + 1,1900\rho_2 = 3,0606.$$

Решая ее, получаем $\rho_1 = 0,362$; $\rho_2 = 2,150$. Из (2.112) с учетом того, что x_1 в нашем случае равен нулю, найдем

$$\alpha_1 = \rho_1 = 0,362; \quad \alpha_2 = \rho_2 = 2,150.$$

Подставляя найденные коэффициенты в аппроксимирующую функцию, получаем

$$\hat{u}(t) = 0,362e^{-1,729t} + 2,150e^{-4,577t}.$$

Рассчитанные по этой формуле значения¹ \hat{u} приведены в табл. 14. Различие величин $u(t)$ и $\hat{u}(t)$ в данном случае можно объяснить недостаточной точностью промежуточных вычислений.

Рассмотрим теперь случай, когда среди корней характеристического уравнения есть комплексные. Как известно, число комплексных корней всегда четно, и их множество всегда можно разделить на взаимно сопряженные пары. Пусть такую пару образуют корни z_i и z_{i+1} равные

$$z_i = a + ib;$$

$$z_{i+1} = a - ib,$$

$$(2.113)$$

¹ Точность аппроксимации в исходных точках удобно проверять путем подстановки результатов в исходные уравнения вида (2.101).

где a и b — действительные числа, а $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица. Для вычислений удобно использовать показательную форму записи комплексных чисел:

$$z_i = R e^{i\varphi}; z_{i+1} = R e^{-i\varphi}, \quad (2.114)$$

где $R = \sqrt{a^2 + b^2}$ — модуль комплексного числа; $\varphi = \arctg(b/a)$ — аргумент комплексного числа. Соответствующие этим корням параметры β_i и β_{i+1} , связанные с ними равенством (2.106), также будут комплексными сопряженными величинами и их можно записать в виде

$$\beta_i = \frac{1}{\Delta} (\ln R + i\varphi); \beta_{i+1} = \frac{1}{\Delta} (\ln R - i\varphi). \quad (2.115)$$

Рассмотрим два слагаемых из правой части (2.97). Учитывая выражения для β_i и β_{i+1} и раскрывая показательные функции по формуле Эйлера ($e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$), получаем

$$\begin{aligned} \alpha_i e^{\beta_i x} + \alpha_{i+1} e^{\beta_{i+1} x} &= R^{x/\Delta} (\alpha_i e^{i\varphi x/\Delta} + \alpha_{i+1} e^{-i\varphi x/\Delta}) = \\ &= (\alpha_i + \alpha_{i+1}) R^{x/\Delta} \cos(\varphi x/\Delta) + i(\alpha_i - \alpha_{i+1}) R^{x/\Delta} \sin(\varphi x/\Delta). \end{aligned} \quad (2.116)$$

Поскольку эти суммы должны быть действительными числами, так как в левой части (2.97) стоит действительная функция, коэффициенты α_i и α_{i+1} будут комплексно сопряженными. Записывая их в виде

$$\alpha_i = \gamma_i + i\delta_i; \alpha_{i+1} = \gamma_i - i\delta_i \quad (2.117)$$

и подставляя в (2.116), получаем

$$\alpha_i e^{\beta_i x} + \alpha_{i+1} e^{\beta_{i+1} x} = 2\gamma_i R^{x/\Delta} \cos(\varphi x/\Delta) - 2\delta_i R^{x/\Delta} \sin(\varphi x/\Delta). \quad (2.118)$$

Отсюда видно, что при подстановке пары сопряженных корней в аппроксимирующую функцию (2.97) соответствующие им слагаемые можно заменить выражениями

$$\alpha_i R^{x/\Delta} \cos(\varphi x/\Delta) \text{ и } \alpha_{i+1} R^{x/\Delta} \sin(\varphi x/\Delta) \quad (2.119)$$

или в наиболее распространенной форме записи

$$\alpha_i e^{\lambda x/\Delta} \cos(\varphi x/\Delta) \text{ и } \alpha_{i+1} e^{\lambda x/\Delta} \sin(\varphi x/\Delta), \quad (2.120)$$

где $\lambda = \ln R$.

После такой замены коэффициенты α_i разложения (2.97) отыскиваются из системы уравнений (2.100), путем решения ее по методу наименьших квадратов.

В качестве примера, в котором встречаются комплексные корни характеристического уравнения, рассмотрим задачу подбора по данным табл. 15 приближающей функции вида

Таблица 15

x	y	\hat{y}
0	5,2	5,2
1	5,5	5,5
2	5,0	5,0
3	4,0	4,0

$$y = \alpha_1 e^{\beta_1 x} + \alpha_2 e^{\beta_2 x}.$$

Для определения коэффициентов характеристического уравнения составим систему уравнений

$$5,2c_0 + 5,5c_1 = -5,0;$$

$$5,5c_0 + 5,0c_1 = -4,0.$$

Ее решениями являются $c_0 = 0,705$; $c_1 = -1,576$. Этим коэффициентам соответ-

ствует характеристическое уравнение

$$z^2 - 1,576z + 0,705 = 0.$$

с комплексными сопряженными корнями $z_{1,2} = 0,788 \pm i0,290$, которые запишем в виде

$$z_{1,2} = e^{\lambda \pm i\varphi}; \lambda = \ln \sqrt{(0,788)^2 + (0,29)^2} = -0,175,$$

$$\varphi = \arctg \frac{0,29}{0,788} = 0,352.$$

Этим корням соответствуют комплексно сопряженные значения $\beta_{1,2}$:

$$\beta_{1,2} = -0,175 \pm i0,35.$$

Подставляя $\beta_{1,2}$ в аппроксимирующую функцию и заменяя комплексные слагаемые по правилу (2.120), получаем

$$y = \alpha_1 e^{-0,175x} \cos(0,352x) + \alpha_2 e^{0,175x} \sin(0,352x).$$

Подставляя сюда значения y и x , получаем четыре уравнения для определения α_1 и α_2 .

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,788 & 0,289 \\ 0,537 & 0,456 \\ 0,291 & 0,515 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5,2 \\ 5,5 \\ 5,0 \\ 4,0 \end{pmatrix}.$$

Будем решать эту систему по методу наименьших квадратов. Для этого построим систему нормальных уравнений

$$1,994\alpha_1 + 0,622\alpha_2 = 13,383;$$

$$0,622\alpha_1 + 0,556\alpha_2 = 5,929,$$

решением которой будет $\alpha_1 = 5,20$; $\alpha_2 = 4,85$. Подставив их в аппроксимирующую функцию, запишем ее в виде

$$\hat{y} = e^{-0,175x} [5,2 \cos(0,352x) + 4,85 \sin(0,352x)].$$

Значения \hat{y} , рассчитанные по этой формуле, приведены в табл. 15.

При решении практических задач исследователь обычно находится в ситуации, когда и в виде модели у него нет полной уверенности, и точность значений приближаемой функции также далека от идеала. Для компенсации ошибок наблюдений обычно берется избыточное число точек приближения, т. е. $m > 2k$. В этом случае система уравнений (2.101), как правило, не имеет точного решения и ее надо решать приближенно. Для этого воспользуемся следующим приемом. Разобьем все множество исходных значений y_i на $2k$ групп по l числу в каждой, к первой из них отнесем данные $y_i (i = \overline{1, l})$, ко второй — данные $y_i (i = \overline{l+1, 2l})$ и т. д. Пусть такое деление возможно, т. е. полагаем, что $m = 2kl$.

Из этих групп данных составим l систем уравнений по $2k$ числу в каждой. Причем первую систему уравнений образуем из данных, стоящих на первом месте в каждой из $2k$ групп и

имеющих в соответствии с нашей индексацией порядковые номера y_{1+i} ($i=0, 2k-1$), вторую систему уравнений образуем из данных, стоящих на втором месте в каждой из групп, т. е. с порядковыми номерами y_{2+i} ($i=0, 2k-1$) и т. д. Если исходные величины y_i были замерены через равные интервалы Δ по зависимой переменной x , то данные в каждой из систем уравнений также будут равноотстоящими, но уже с шагом Δl .

Аналогично тому, как мы записали систему уравнений (2.101), первую систему уравнений в данном случае запишем в виде

$$\begin{aligned} y_1 &= \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_k; \\ y_{1+l} &= \rho_1 z_1^l + \rho_2 z_2^l + \dots + \rho_k z_k^l; \\ &\dots \\ y_{1+(2k-1)l} &= \rho_1 z_1^{(2k-1)l} + \rho_2 z_2^{(2k-1)l} + \dots + \rho_k z_k^{(2k-1)l}; \\ \rho_i &= \alpha_i e^{\beta_i x}; \quad z_i = e^{\beta_i \Delta}. \end{aligned} \quad (2.121)$$

Для ее решения, как и раньше, введем понятие характеристического уравнения (2.104), только не относительно z_i , а относительно z_i^l . Используя прежний прием домножения на c_0 , c_1, \dots, c_k и последующего сложения уравнений (2.111), построим систему уравнений для определения коэффициентов характеристического уравнения:

$$\sum_{i=0}^k c_i y_{1+il} = 0, \quad c_k \equiv 1. \quad (2.122)$$

Аналогичным образом составим вторую систему уравнений

$$\sum_{i=0}^k c_i y_{2+il} = 0, \quad c_k \equiv 1. \quad (2.123)$$

Продолжая этот процесс, построим l эквивалентных систем уравнений для определения коэффициентов характеристического уравнения, которые объединим в общую систему вида

$$\sum_{i=0}^k c_i y_{j+il} = 0, \quad c_k \equiv 1, \quad j = \overline{1, lk}. \quad (2.124)$$

Эта система избыточна. Поскольку y_i известны приближенно, то, даже при условии правильности сходной модели, точного решения (2.117) мы получить не можем.

Для определения приближенных значений c_i воспользуемся приемом уменьшения числа уравнений за счет их суммирования¹. Сложив первые l уравнений ($j = \overline{1, l}$), затем вторую группу

¹ Использовать метод наименьших квадратов для решения (2.124) нецелесообразно. Коэффициенты этой системы уравнений содержат ошибки, поэтому получаемый по методу наименьших квадратов результат будет смещенным.

уравнений с индексом $j = \overline{l+1, 2l}$ и т. д., получим систему из k уравнений:

$$\sum_{i=0}^k c_i \bar{y}_{i+j} = 0, \quad j = \overline{1, k}, \quad (2.125)$$

где $\bar{y}_i = \sum_{j=l+1}^{il} y_j$ — сумма значений y -в в i -й группе, т. е.

$$\bar{y}_1 = \sum_{i=1}^l y_i, \quad \bar{y}_2 = \sum_{i=l+1}^{2l} y_i \text{ и т. д.}$$

Из уравнений (2.125) определяем c_i . Решая затем характеристическое уравнение

$$\sum_{i=0}^k c_i \omega^i = 0, \quad c_k \equiv 1 \quad (\omega = z_i^l),$$

находим $z_i = \omega_i^{1/l}$, а из определения z_i получаем

$$\beta_i = \frac{1}{l\Delta} \ln \omega_i. \quad (2.126)$$

Подставляя z_i в исходные системы уравнений (2.113), (2.115) и т. д., получаем линейную систему уравнений относительно ρ_i (всего $2kl$), которые удобно записать в виде

$$\begin{aligned} A\rho &= Y; \\ A &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{2kl-1} & z_2^{2kl-1} & \dots & z_k^{2kl-1} \end{pmatrix}; \quad \rho = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_k \end{pmatrix}; \\ Y &= \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{2kl} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.127)$$

С точностью до числа уравнений эта система совпадает с ранее полученной. Поэтому при решении (2.127) по методу наименьших квадратов соответствующая система нормальных уравнений в матричной записи будет иметь вид (2.109). Элементы матрицы B и вектора M будут определяться равенствами (2.110) с учетом того, что число уравнений в данном случае будет равно не $2k$, как раньше, а $2kl$. После определения ρ_i величины α_i вычислим по формуле (2.11).

Рассмотрим предыдущую задачу аппроксимации переходной характеристики технологического объекта. Только теперь будем аппроксимировать не 4, а 24 наблюдения (табл. 16), снятые через 3 мин (0,05 ч).

t	u	\hat{u}	t	u	\hat{u}	t	u	\hat{u}
0	2,51	2,503	0,40	0,53	0,534	0,80	0,15	0,148
0	2,04	2,042	0,45	0,45	0,447	0,85	0,13	0,129
0,10	1,67	1,671	0,50	0,38	0,376	0,90	0,11	0,112
0,15	1,37	1,370	0,55	0,32	0,318	0,95	0,10	0,099
0,20	1,12	1,127	0,60	0,27	0,270	1,00	0,09	0,087
0,25	0,93	0,930	0,65	0,23	0,230	1,05	0,08	0,077
0,30	0,77	0,770	0,70	0,20	0,198	1,10	0,07	0,069
0,35	0,64	0,640	0,75	0,17	0,170	1,15	0,06	0,061

Как и ранее, величину $u(t)$ будем аппроксимировать выражением

$$\hat{u}(t) = \alpha_1 e^{\beta_1 t} + \alpha_2 e^{\beta_2 t}$$

Для определения β_i разделим все множество значений u_i на четыре группы по шесть значений в каждой. В каждой группе эти значения просуммируем. Получим $\bar{u}_1=9,64$; $\bar{u}_2=3,09$; $\bar{u}_3=1,15$; $\bar{u}_4=0,51$. Согласно (2.118) запишем систему уравнений для определения коэффициентов характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} 9,64c_0 + 3,09c_1 + 1,15 &= 0; \\ 3,09c_0 + 1,15c_1 + 0,51 &= 0. \end{aligned}$$

Ее решениями являются $c_0=0,1640$; $c_1=-0,884$. Решая соответствующее характеристическое уравнение

$$\omega^2 - 0,8839\omega + 0,1640 = 0,$$

находим его корни $\omega_1=0,619$; $\omega_2=0,265$. Учитывая, что l в нашем случае равно 6, из (2.122) получаем

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -4,427; & \beta_2 &= -1,594; \\ z_1 &= 0,923; & z_2 &= 0,801. \end{aligned}$$

Для определения α_1 и α_2 запишем систему нормальных уравнений вида (2.109). Вычисляя элементы матрицы B и вектора M по формулам (2.110) и (2.111), получаем

$$\begin{pmatrix} 6,62 & 3,841 \\ 3,841 & 2,795 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10,455 \\ 7,314 \end{pmatrix}$$

Решением этой системы будут $\rho_1=0,302$ и $\rho_2=2,201$. Из (2.112), с учетом того, что x_1 в нашем случае равно нулю, получим $\alpha_1=\rho_1=0,302$; $\alpha_2=\rho_2=2,201$. Таким образом, аппроксимирующая функция имеет вид

$$\hat{u}(t) = 0,302e^{-4,43t} + 2,201e^{-1,59t}.$$

Рассчитанные по этой формуле значения $\hat{u}(t)$ в исходных точках приведены в табл. 16. Данные табл. 16 показывают, что приближение получилось хорошее. Однако не следует полагать, что оно соответствует истинной картине изучаемого явления. На самом деле данные, которые мы аппроксимировали, были рассчитаны по формуле

$$u(t) = 0,0951e^{-t} + 0,8607e^{-3t} + 1,5576e^{-5t},$$

которую можно трактовать как свободную составляющую переходной функции объекта третьего порядка.

Вопросы, связанные с чувствительностью процедур аппроксимации в классе экспоненциальных функций к ошибкам исходных данных, рассмотрены в [40].

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

§ 15. Неоднозначные функции и постановка задачи их приближения¹

Рассмотрим задачу построения стационарной зависимости выхода y одномерного технологического объекта от его входа x на основе экспериментальных данных.

Из-за неконтролируемых и неучтенных воздействий на объект, а также различного рода помех и погрешностей измерений данные будут иметь некоторый разброс, который условно ограничен «эллипсом рассеяния» (рис. 3). Мысленно увеличивая число экспериментов, нетрудно прийти к заключению, что в общем случае каждому значению x может соответствовать бесконечное число различных y . Какое из них надо приближать? Какое считать наилучшим?

Для ответа на эти вопросы предположим, что на допустимом множестве значений x и y существует условная плотность распределения $p(y/x)$. Отдельные ее сечения показаны на рис. 3. Для выбора наилучшей точки y в произвольном сечении x приведем следующее рассуждение. В процессе эксплуатации исследуемого объекта при фиксированном значении x с вероятностью $p(y/x)$ могут реализоваться любые значения y (рис. 4). Если по нашей модели будем предсказывать значение y_0 , то ошибка предсказания будет

$$\Delta = y - y_0. \quad (3.1)$$

Пусть в зависимости от величины и знака ошибки предсказания величины y приходится расплачиваться штрафом $\Psi(\Delta)$. За длительное время эксплуатации суммарная величина штрафа оценивается его математическим ожиданием:

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(\Delta) p(y/x) dy. \quad (3.2)$$

Определение величины y_0 из условия минимума суммарного штрафа (3.2) называется байесовским принципом определения наилучшей точки приближения. В общем случае выбор этой точки зависит от вида функции штрафа и плотности распределения $p(y/x)$ [7, 10].

При решении большей части практических задач, когда знак ошибки не является ее существенным признаком, а имеет значение только ее величина, в качестве функции штрафа удобно использовать квадратичную функцию ошибки вида

$$\Psi(\Delta) = \Delta^2. \quad (3.3)$$

¹ Задача приближения неоднозначных функций является частным случаем более общей задачи принятия статистических решений, изложение которой можно найти в работе [10].

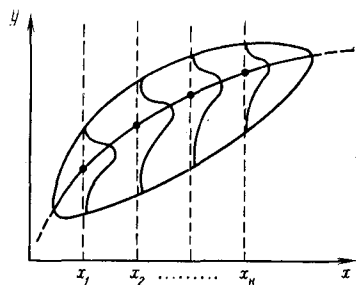


Рис. 3. График экспериментальных данных для неоднородной зависимости

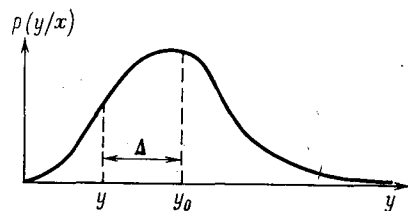


Рис. 4. График условной плотности распределения $p(y/x)$ в сечении $x = \text{const}$

При таком определении $\Psi(\Delta)$ суммарный штраф (3.2) можно записать в виде

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} (y - y_0)^2 p(y/x) dy = M(y^2/x) - 2y_0 M(y/x) + y_0^2. \quad (3.4)$$

Определяя минимум R по y_0 из условия равенства нулю первой производной от R по этой переменной, получаем

$$y_0 = M(y/x). \quad (3.5)$$

Таким образом, при квадратичной функции штрафа наилучшим значением величины y в сечении x , которое надо приближать, будет ее математическое ожидание (см. рис. 3).

Итак, для случая квадратичной функции штрафа наилучшая приближающая функция является геометрическим местом точек условных математических ожиданий величины y при любых значениях x . Следовательно, ее уравнение можно записать в виде

$$\hat{y} = M(y/x). \quad (3.6)$$

В статистике [12, 13] геометрическое место точек условных математических ожиданий называется линией регрессии, а соответствующее ей уравнение (3.6) — уравнением регрессии.

Поскольку в предыдущих рассуждениях мы нигде, кроме поясняющих графиков, не использовали предположений об одномерности объекта, то они останутся в силе, если объект исследования будет обладать не одним, а n входами $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Для того чтобы формулы (3.2) — (3.6) были справедливы для многомерного случая, в них надо произвести формальную замену x на \mathbf{X} . Сделав такую замену в (3.6), получим общее уравнение регрессии, характеризующее зависимость между n входами и одним выходом объекта исследования:

$$\hat{y} = M(y/\mathbf{X}). \quad (3.7)$$

Правая часть этого уравнения, являющаяся функцией только переменной \mathbf{X} , нам неизвестна и ее требуется определить на

основе экспериментальных данных. С подобной задачей мы уже встречались в гл. 2, где отмечалось, что для облегчения последующих вычислений неизвестную функцию удобно представлять в виде линейного параметрического ряда вида

$$M(y/\mathbf{X}) \approx \sum_{i=0}^n \alpha_i \varphi_i(\mathbf{X}), \quad (3.8)$$

где $\varphi_i(\mathbf{X})$ — известные базисные функции, а α_i — неизвестные коэффициенты.

Заменив правую часть в (3.7) на основании (3.8), запишем искомое приближение в виде

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^n \alpha_i \varphi_i(\mathbf{X}). \quad (3.9)$$

Определение коэффициентов α_i в (3.9) по методу наименьших квадратов положено в основу теории планирования эксперимента [39]. Для ее разбора потребуются статистические свойства оценок коэффициентов α и всей модели вида (3.9), которые рассматриваются в следующем параграфе.

§ 16. Статистические свойства метода наименьших квадратов

Вектор коэффициентов α в приближающей функции вида (3.9) при определении его по методу наименьших квадратов вычисляется по формуле

$$\alpha = (\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}'\mathbf{Y} \equiv \mathbf{C}\mathbf{Y}; \quad (3.10)$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}',$$

где матрица \mathbf{A} и вектор \mathbf{Y} определяются исходными данными (см. § 13).

Рассмотрим случай, когда наша модель, записанная в виде (3.9), является адекватной, т. е. существуют такие α_i , для которых справедливо равенство¹

$$M(y/\mathbf{X}) = \sum_{i=0}^k \alpha_i \varphi_i(x) \equiv \langle \alpha, \varphi \rangle \equiv \alpha' \varphi. \quad (3.11)$$

Кроме того, будем полагать, что дисперсия величины y не зависит от \mathbf{X} :

$$D[y(\mathbf{X})] = \sigma^2. \quad (3.12)$$

В силу случайности вектора y в (3.10), составленного из реализаций случайной функции, вектор α , определяемый формулой (3.10), также будет случайным. Его математическое ожидание определяется равенством

$$M_y \alpha = M_y [(\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}'\mathbf{Y}] = (\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}' M_y \mathbf{Y}. \quad (3.13)$$

¹ Знак (\equiv) обозначает тождественное равенство при введении другой формы записи.

Поскольку мы предположили, что наша модель адекватна и выполняется равенство (3.11), то

$$M_y Y \equiv M(y/x) = A\alpha. \quad (3.14)$$

Подставив (3.14) и (3.13), получим

$$M\alpha = (A'A)^{-1} A'M(A\alpha) = (A'A)^{-1} A'AM\alpha = I M\alpha = M\alpha = \bar{\alpha}. \quad (3.15)$$

Таким образом, для случая адекватной модели оценка вектора параметров α является несмещенной.

Ковариационная матрица¹ вектора α определяется равенством

$$\text{cov}(\alpha) = M[(\alpha - \bar{\alpha})(\alpha - \bar{\alpha})']. \quad (3.16)$$

Подставляя сюда α в виде (3.10) и проводя тождественные преобразования, получаем

$$\begin{aligned} \text{cov}(\alpha) &= M[CY(CY)' - CY(C\bar{Y})' - C\bar{Y}(CY)' + C\bar{Y}(C\bar{Y})'] = \\ &= M[CYCY' - CY\bar{Y}' - C\bar{Y}Y' + C\bar{Y}\bar{Y}'] = \\ &= M[C(Y\bar{Y}' - 2Y\bar{Y}' + Y\bar{Y}')C'] = M[C(Y - \bar{Y})(Y - \bar{Y})'C'] = \\ &= C\{M[(Y - \bar{Y})(Y - \bar{Y})']\}C' = C \cdot \text{cov}(Y) \cdot C'. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Ковариационную матрицу для вектора Y запишем в виде

$$\text{cov}(Y) = \begin{pmatrix} \text{cov}(y_1, y_1) & \text{cov}(y_1, y_2) & \dots & \text{cov}(y_1, y_m) \\ \text{cov}(y_2, y_1) & \text{cov}(y_2, y_2) & \dots & \text{cov}(y_2, y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(y_m, y_1) & \text{cov}(y_m, y_2) & \dots & \text{cov}(y_m, y_m) \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

Если величины y_i и y_j независимы при $i \neq j$, то $\text{cov}(y_i, y_j)$ при $i \neq j$ будет равна нулю, а при $i = j$ по определению $\text{cov}(y_i, y_i) = D(y_i) = \sigma^2$. Учитывая эти условия, а также соотношение (3.12), приводим (3.18) к виду

$$\text{cov}(Y) = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{pmatrix} = \sigma^2 I, \quad (3.19)$$

где I — единичная матрица.

¹ Часто она называется дисперсионной матрицей.

Подставляя (3.19) в соотношение (3.17), приведем его к виду

$$\begin{aligned} \text{cov} \alpha &= \sigma^2 (A'A)^{-1} A'IA(A'A)^{-1} = \sigma^2 (A'A)^{-1} (A'A) (A'A)^{-1} = \\ &= \sigma^2 I (A'A)^{-1} \equiv \sigma^2 B^{-1}, \quad B^{-1} = (A'A)^{-1}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Диагональные элементы ковариационной матрицы соответствуют дисперсиям компонент вектора коэффициентов α :

$$\sigma_{ii}^2 = \sigma^2 b_{ii}^{-1}. \quad (3.21)$$

Остальные ее элементы σ_{ij}^2 ($i, j = 0, k; i \neq j$) характеризуют взаимозависимость компонент α_i и α_j и связаны с коэффициентами их взаимной корреляции ρ_{ij} равенствами

$$\rho_{ij} = \frac{b_{ij}^{-1}}{\sqrt{b_{ii}^{-1} \cdot b_{jj}^{-1}}}. \quad (3.22)$$

Оценку вектора параметров α мы используем для расчета значений приближаемой функции по формуле

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^k \alpha_i \varphi_i(x) \equiv \varphi' \alpha. \quad (3.23)$$

В силу случайности вектора α значение \hat{y} также будет случайным со средним значением

$$M\hat{y} = (\varphi' M\alpha = \varphi' B^{-1} A' M Y = \varphi' (A'A)^{-1} A' A \alpha = \varphi' \alpha \quad (3.24)$$

и дисперсией

$$\begin{aligned} D\hat{y} &= M[\hat{y} - \bar{y}]^2 = M[\varphi' \hat{\alpha} - \varphi' \bar{\alpha}]^2 = M[\varphi' \hat{\alpha} \hat{\alpha}' \varphi + \varphi' \bar{\alpha} \bar{\alpha}' \varphi - \\ &- 2\varphi' \hat{\alpha} \bar{\alpha}' \varphi] = \varphi' M[(\hat{\alpha} - \bar{\alpha})(\hat{\alpha} - \bar{\alpha})'] \varphi = \varphi' \text{cov}(\alpha) \cdot \varphi. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Подставив сюда выражение для ковариации α из (3.20), получим

$$D\hat{y} = \varphi' B^{-1} \varphi \sigma^2 \quad (3.26)$$

Для расчета ковариационной матрицы коэффициентов модели (3.20) и дисперсии оценок приближаемой функции (3.26) необходимо знание величины σ^2 , которая обычно неизвестна. Однако ее можно оценить на основе имеющихся экспериментальных данных. Алгоритмы подобных оценок существенно зависят от предположения об адекватности нашей модели. Если известно, что модель адекватна, то дисперсию ошибок наблюдений можно оценить по формуле

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{S_R}{\eta}, \quad (3.27)$$

где

$$S_R = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad \eta = N - k - 1.$$

Здесь S_R — остаточная сумма квадратов ошибок, а η — число степеней свободы для случайной суммы S_R , между N слагаемыми которой существует $(k+1)$ -я линейная связь, задаваемая исходными уравнениями для определения α .

Подставив (3.27) в (3.21), получим оценку для дисперсии i -й компоненты вектора α :

$$\sigma_i^2 = \hat{\sigma}^2 b_{ii}^{-1}. \quad (3.28)$$

Если справедливо дополнительное предположение о нормальности закона распределения величины $y(\mathbf{X})$ независимо от \mathbf{X} , то величина

$$t = \frac{\alpha_i - \bar{\alpha}_i}{\sigma_i}, \quad (3.29)$$

подчиняется распределению Стьюдента с η степенями свободы.

Задавая доверительную вероятность \mathcal{P} (или уровень значимости α)

$$\mathcal{P} \{ |t_i| < \varepsilon \} = 1 - \alpha \quad (3.30)$$

и определяя величину ε , записываем доверительный интервал для истинного значения оцениваемой компоненты:

$$\hat{\alpha}_i - \varepsilon \hat{\sigma}_i < \bar{\alpha}_i < \hat{\alpha}_i + \varepsilon \hat{\sigma}_i. \quad (3.31)$$

Если значения правого и левого ограничений для α_i в (3.31) имеют одинаковые знаки, то с заданной доверительной вероятностью принимается гипотеза, что истинное значение α_i принадлежит интервалу, определяемому неравенством (3.31). Если значения правого и левого ограничений в (3.31) имеют разные знаки, то с заданной доверительной вероятностью принимается гипотеза, что истинное значение α_i незначимо отлично от нуля. Незначимый коэффициент может быть заменен нулем, что сокращает число слагаемых в модели.

Однако следует помнить, что в общем случае оценки величин α_i и их дисперсий могут быть сильно связаны друг с другом. Поэтому если какой-либо член исключается из уравнения из-за его незначимости, то все остальные оценки коэффициентов α_i необходимо пересчитывать заново. Очевидно, при этом будут изменяться и их доверительные интервалы в (3.31).

Поскольку в общем случае процедуры вычисления коэффициентов α довольно трудоемки, обычно стараются использовать систему функций $\varphi_i(\mathbf{X})$ в разложении (3.11), ортогональную на множестве экспериментальных точек (см. § 13).

Рассмотрим задачу построения статистической модели установки обессоливания нефтей, выход которой y , соответствующий остаточному содержанию солей в товарной нефти (в мг/л), зависит от температуры процесса T и производительности установки Q . Меняя температуру с шагом в 5°C и производительность с шагом $50 \text{ м}^3/\text{ч}$, провели четыре опыта в точках $t = (60 \pm 5)^\circ\text{C}$, $Q = (300 \pm 50) \text{ м}^3/\text{ч}$.

Перейдя к безразмерным переменным по формулам (1.51), запишем результаты экспериментов в виде табл. 17.

t	$z_1 = \frac{T-60}{5}$	$z_2 = \frac{Q-300}{50}$	y	\hat{y}_i
1	1	1	38	38,25
2	1	-1	33	32,75
3	-1	1	46	45,75
4	-1	-1	40	40,85

Будем строить линейную модель вида

$$\hat{y} = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2.$$

Для определения вектора коэффициентов α и его ковариационной матрицы по формулам (3.10) и (3.20) найдем

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix} \equiv 4\mathbf{I}_3; \quad \mathbf{B}^{-1} = \frac{1}{4} \mathbf{I}_3;$$

$$\mathbf{A}'\mathbf{Y} = (157, -15, 11)'; \quad \alpha = \frac{1}{4} \mathbf{I}_3 \mathbf{A}'\mathbf{Y} = (39, 25, -3, 75, 2, 75)';$$

$$\text{cov}(\alpha) = \frac{\sigma^2}{4} \mathbf{I}_3.$$

Полученные результаты позволяют заключить, что в силу ортогональности исходной системы базисных функций компоненты вектора α взаимно-независимы. Они обладают одинаковой дисперсией, равной $\sigma^2/4$.

Запишем искомую модель в виде

$$\hat{y} = 39, 25 - 3, 75z_1 + 2, 75z_2.$$

Рассчитанные значения \hat{y} приведены в табл. 17.

Для оценки величины σ^2 по формуле (3.27) рассчитаем

$$S_R = \sum_{i=1}^4 (y_i - \hat{y}_i)^2 = 4 \cdot (0, 25)^2 = 0, 25.$$

Учитывая, что в нашем случае $N=4$, а $\eta=4-2-1=1$, получаем $\hat{\sigma}^2 = S_R/\eta = 0, 25$.

Подставив $\hat{\sigma}^2$ в (3.28), найдем

$$\hat{\sigma}_i^2 = 0, 25 \cdot \frac{1}{4} = 0, 0625, \quad \sigma_i = 0, 25.$$

Для определения доверительных границ коэффициентов модели зададим доверительную вероятность $\mathcal{P}=0, 9$. При $\eta=1$ найдем $\varepsilon=6, 3$.

Таким образом, согласно (3.31) с вероятностью 0,9 истинное значение коэффициентов модели принадлежит интервалам

$$\alpha_0 \in (39 \pm 1, 6), \quad \alpha_1 \in (-4 \pm 1, 6), \quad \alpha_2 \in (2, 5 \pm 1, 6).$$

Поскольку доверительные интервалы не содержат нуля, принимаем гипотезу, что с вероятностью 0,9 все факторы значимы.

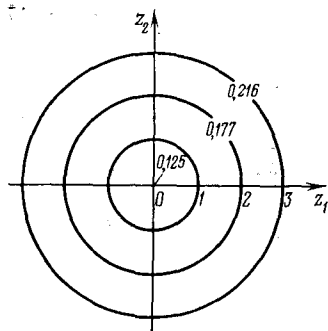


Рис. 5. График среднеквадратичного уклонения предсказания по модели

Дисперсию предсказания по нашей модели оценим по формуле (3.26). Подставляя туда $\hat{\sigma}^2$ и B^{-1} , получаем

$$\hat{D}\hat{y} = (1, z_1, z_2) \cdot \frac{1}{4} I_3 \cdot (1, z_1, z_2)' \times \\ \times 0,0625 = (0,25)^3 (1 + z_1^2 + z_2^2).$$

Отсюда видно, что дисперсия \hat{y} в координатах z_1, z_2 постоянна на окружностях с центром в начале координат. График подобных эквипотенциальных линий с одинаковым вдоль них среднеквадратичным уклонением представлен на рис. 5

Если предположение об адекватности нашей модели отсутствует, то возникает задача установления этого факта. Ее решение базируется на сопоставлении точностных характеристик модели и экспериментального материала. Точность эксперимента в каждой точке его постановки естественно связать с величиной разброса измерений в этой точке и характеризовать величиной дисперсии. Как правило, величины дисперсий измерений экспериментатору не известны и для их оценки необходимо провести в каждой точке по несколько экспериментов.

Предположим, что в каждой i -й точке эксперимент проведен v раз и получены результаты $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iv}$. Дисперсию измерений в i -й точке оценим по формуле

$$\hat{\sigma}_{y_i}^2 = \frac{1}{v-1} \sum_{j=1}^v (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad \bar{y}_i = \frac{1}{v} \sum_{j=1}^v y_{ij}. \quad (3.32)$$

Если предположить, что точностные характеристики измерений во всех точках одинаковы, то оценку для дисперсии измерений можно уточнить за счет усреднения (3.32) по всем экспериментальным точкам. Проведя операцию усреднения, получим

$$\hat{\sigma}_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_{y_i}^2 = \frac{1}{N(v-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^v (y_{ij} - \bar{y}_i)^2. \quad (3.33)$$

Модель будем строить, основываясь на средних значениях измерений в каждой точке, т. е. по данным

$$\bar{y}_i = \frac{1}{v} \sum_{j=1}^v y_{ij}.$$

Поскольку дисперсия одиночного измерения оценивается величиной $\hat{\sigma}_{y_i}^2$ (3.33), дисперсия величины \bar{y}_i будет в v раз меньше

$$\hat{\sigma}_{\bar{y}_i}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{y_i}^2}{v} \quad (3.34)$$

и в силу нашего предположения о равноточности измерений $\hat{\sigma}_{y_i}^2$ одинакова для всех y_i .

Пусть модель построена. Предположим, что она адекватна, и вычислим согласно (3.27) оценку для ее дисперсии, обозначив ее, как раньше, $\hat{\sigma}^2$:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-k-1} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 = \frac{S_R}{N-k-1}. \quad (3.35)$$

А теперь сравним дисперсии ошибок наблюдений, вычисленные по формулам (3.34) и (3.35). Составим их отношение

$$F = \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\sigma}_{\bar{y}_i}^2} v. \quad (3.36)$$

Из теории вероятностей известно, что величина F подчиняется распределению Фишера (F -распределение) с числом степеней свободы $\eta_1 = N-k-1$ и $\eta_2 = N(v-1)$. Задав доверительную вероятность

$$\mathcal{P}\{F < F_{кр}\} = 1 - \alpha \quad (3.37)$$

(или уровень значимости α) из таблиц распределения Фишера, найдем $F_{кр}$. Если величина F , рассчитанная по (3.36), удовлетворяет неравенству $F < F_{кр}$, то гипотеза об адекватности модели принимается. Если $F > F_{кр}$, то модель признается неадекватной.

§ 17. Постановка задачи планирования эксперимента. Критерии планирования

При анализе статистических свойств, рассчитываемых по методу наименьших квадратов, в предыдущем параграфе мы видели, что точности оценок параметров модели в общем случае зависят не только от числа, но и от расположения экспериментальных точек. Из этого замечания следует основная идея планирования эксперимента: так выбрать экспериментальные точки, чтобы наиболее полно удовлетворить целому набору условий, способствующих упрощению математических вычислений и анализа результатов, повышению их точности, сокращению количества экспериментальных точек и т. д. Поскольку не все подобные условия могут быть всегда совместимыми, в каждом отдельном случае критериальные условия выбираются так, чтобы они не были противоречивы и отвечали основным инженерным требованиям, предъявляемым к результату. Например, условие ортогональности базисных функций модели (см. § 16) существенно упрощает расчетные процедуры и последующий анализ точности и взаимозависимостей коэффициентов модели. Поэтому критерий ортогональности базисных функций (или планов) модели довольно естествен и его обычно стараются выполнить.

Условие ортогональности плана еще не определяет его однозначный выбор, а дает только ограничение на допустимое множество планов. На этом множестве можно дополнительно задать критерий выбора планов эксперимента.

Рассмотрим некоторые из наиболее употребляемых критериев.

Критерий рототабельности эквивалентен требованию сферической симметрии дисперсии модели относительно начала координат базисных функций модели. Если в качестве базисных функций выбираются полиномы в пространстве нормированных независимых переменных и метрика пространства считается евклидовой, то начало координат будет совпадать с точкой нулевого отсчета переменных. Критерий рототабельности обеспечивает геометрическую простоту и наглядность представления ошибок модели, но никак не связан с требованиями максимизации точности модели.

Критерий минимизации средней дисперсии оценок коэффициентов модели (или *A-критерий*) эквивалентен требованию выбора такого плана эксперимента, при котором сумма диагональных элементов матрицы \mathbf{B}^{-1} [см. формулу (3.26)], являющихся коэффициентами пропорциональности в формулах для дисперсий коэффициентов модели, была бы минимальной.

Критерий D-оптимальности минимизирует объем эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов модели и эквивалентен требованию выбора плана, минимизирующего величину определителя матрицы (или максимизирующего обратную ей величину определителя матрицы $\mathbf{B} = \mathbf{A}'\mathbf{A}$).

Критерий G-оптимальности эквивалентен требованию минимизации максимальной величины дисперсии модели в области эксперимента. Другими словами, это минимаксный критерий, который в отличие от предыдущих критериев оптимизирует точность определения целевой функции-модели, а не промежуточных величин — параметров модели.

Это далеко не полный перечень возможных критериев планирования. В литературе можно встретить критерии, основанные на других требованиях к точности модели [39]. Применение всех перечисленных критериев базируется на предположении, что вид модели известен. Очевидно, выполнить это условие на практике довольно трудно. Обычно модель неизвестна и исследователю приходится применять последовательную процедуру для ее определения. Сначала строится наиболее простая линейная модель и проверяется ее адекватность. Если она оказывается неадекватной, модель усложняется за счет введения в нее членов соответствующих парным взаимодействиям рассматриваемых факторов и т. д. Для новой модели требуется новый план. Для сокращения числа экспериментов его стараются строить таким образом, чтобы он включал в себя уже имеющиеся измерения на предыдущем этапе. Планы для квадратичных моделей, построенные путем добавления новых точек к плану линейной модели, носят название композиционных планов.

Если при построении плана модели по какому-либо критерию возникает неоднозначность его выбора, то обычно привлекают дополнительные критерии. Другими словами, стремятся к тому, чтобы один и тот же план удовлетворял сразу не-

скольким критериям. Например, ортогональный план для линейной модели всегда является рототабельным.

Действительно, согласно (3.26) дисперсия предсказания по модели в точке $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ для ортогонального плана линейной модели

$$\sigma_{\hat{y}}^2 = \Phi' \mathbf{B}^{-1} \Phi \sigma^2 = \Phi' \frac{1}{n} \mathbf{I} \Phi \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{n} (1, x_1, x_2, \dots, x_n) \times \\ \times (1, x_1, x_2, \dots, x_n)' = \frac{\sigma^2}{n} \left(1 + \sum_{i=1}^n x_i^2 \right).$$

Поскольку $\sum_{i=1}^n x_i^2$ в n -мерном пространстве является квадратом расстояния от начала координат, наше утверждение доказано.

Несмотря на то что критерии планирования диктуются требованиями конкретной задачи, при построении планов обычно стараются сохранить их свойство ортогональности. Это обусловливается желанием исследователя сократить объем вычислений при построении модели и ее последующей проверке.

§ 18. Планы для линейных моделей

Рассмотрим простейший случай построения плана для линейной модели одной переменной. Запишем ее в виде

$$\hat{y}(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x. \quad (3.38)$$

Для определения коэффициентов α_0 и α_1 потребуются минимум два эксперимента. Пусть величина x изменяется в пределах $[b_1, b_2]$. В каких точках x из этого интервала надо провести эксперименты, чтобы максимально точно определить коэффициенты модели? На этот вопрос легко ответить, используя наглядное графическое представление зависимости зоны неопределенности модели от расположения экспериментальных точек (рис. 6). Пусть мы провели два эксперимента в точках x_1 и x_2 и получили значения y_1 и y_2 .

В силу того, что величины y измеряются с погрешностью, для каждого значения y нарисуем его доверительный интервал, т. е. будем полагать, что истинное значение y_i , измеренное в точке x_i , принадлежит к некоторому интервалу $\hat{y}_i \pm \varepsilon$. Величина ε связана с погрешностями измерения y_i или его математического ожидания. Пусть величины ε не зависят от x_i . На основе доверительных интервалов легко построить доверительные границы для нашей модели. Такими границами будут прямые линии 1 и 2 (см. рис. 6). Область между этими линиями является областью неопределенности для модели. На рис. 6 видно, что чем дальше будут отстоять точки x_1 и x_2 друг от друга, тем меньше будет зона неопределенности. Так, при максимальном расстоянии между ними, когда $x_1 = b_1$, а $x_2 = b_2$, зона неопределенности для модели при тех же погрешностях измерения будет минимальной.

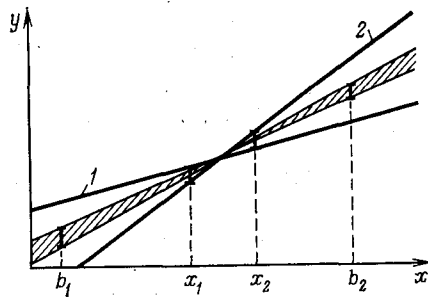


Рис. 6. Графики зон неопределенности линейной модели при различных расстояниях между точками экспериментов

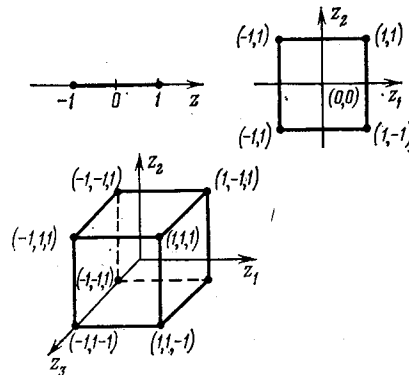


Рис. 7. Графики полных факторных планов линейных моделей различных размерностей

Таким образом, план, обеспечивающий максимальную точность определения модели, в рассматриваемом случае будет содержать две точки, расположенные на концах интервала изменения величины независимой переменной.

Для того чтобы коэффициенты модели не зависели от размерности величины x и чтобы наш план обладал свойством ортогональности, введем новую безразмерную переменную:

$$z = \frac{x - \frac{\max(x) + \min(x)}{2}}{\frac{\max(x) - \min(x)}{2}}. \quad (3.39)$$

Нетрудно проверить, что величина z изменяется от -1 до 1 (рис. 7), а точки нашего плана соответствуют значениям $z_1 = -1$ и $z_2 = 1$.

В новых переменных модель (3.37) будет иметь вид

$$y(z) = \alpha_0 + \alpha_1 z. \quad (3.40)$$

Приравнивая значения, рассчитанные по модели в точках плана, к измеренным значениям y в этих точках, получаем следующую систему уравнений:

$$A\alpha = Y; \quad A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}. \quad (3.41)$$

При непосредственной проверке легко убедиться, что столбцы матрицы A взаимно ортогональны, а следовательно, наш план является ортогональным. Поскольку скалярное произведение каждого столбца матрицы A самого на себя (его норма) равно 2, то

$$A'A = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = 2I; \quad (3.42)$$

$$(A'A)^{-1} = \frac{1}{2} I.$$

Согласно (3.10) решением системы (3.41) будет

$$\alpha = (A'A)^{-1} A'Y = \frac{1}{2} IA'Y = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} y_1 & -y_2 \\ y_1 & +y_2 \end{pmatrix}. \quad (3.43)$$

Рассуждая аналогично для случая двух переменных x_1 и x_2 , определенных на отрезках $[b_{11}, b_{12}]$ и $[b_{21}, b_{22}]$, придем к выводу, что при построении линейной модели

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (3.44)$$

наиболее точное определение ее коэффициентов будет достигнуто, если план эксперимента будет соответствовать точкам с координатами (b_{11}, b_{21}) , (b_{12}, b_{22}) , (b_{12}, b_{21}) и (b_{11}, b_{22}) . Перейдя к безразмерным переменным z_i ($i=1, 2$), путем преобразования исходных переменных по формуле (3.39) получим ортогональный план, точки эксперимента в котором расположены по углам квадрата в координатах z_1, z_2 (см. рис. 7) с длиной грани, равной 2.

В новых переменных модель (3.44) будет иметь вид

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2. \quad (3.45)$$

Аналогичным образом можно показать, что для линейной модели ортогональный план трех переменных будет соответствовать углам куба в координатах z_1, z_2, z_3 , ортогональный план четырех переменных — углам четырехмерного гиперкуба и т. д.

Координаты точек планов в пространстве безразмерных переменных легко перечисляются. Так, для $n=2$ и 3 ортогональные планы можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.46)$$

В ортогональности столбцов матрицы этих планов, а также в ортогональности каждого столбца первому из них, составленному из одних единиц, который соответствует коэффициентам при свободном члене модели, легко убедиться непосредственной проверкой.

Планы в n -мерном пространстве $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, соответствующие полному множеству вершин n -мерного куба, называются полными факторными планами порядка n . Число точек в таком плане равно 2^n и быстро растет с ростом n .

При больших n требуемое число экспериментов для таких планов оказывается неприемлемым для практики. Объем плана можно сократить, используя только часть входящих в него точек. Если точки отбираются таким образом, что у новых планов сохраняется свойство ортогональности, то такие планы называются *дробными факторными планами* (или дробными репликами). В основе процедуры построения дробных факторных планов лежит понятие генератора плана.

Пусть требуется сократить полный факторный план порядка 3. Обозначим безразмерные факторы плана z_1, z_2, z_3 . Для первых двух факторов построим полный факторный план, а изменения фактора z_3 отождествим с величиной произведения факторов z_1 и z_2 . В результате получим план

$$\begin{array}{ccc} z_1 & z_2 & z_3 = z_1 z_2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1, \end{array} \quad (3.47)$$

сохраняющий свойство ортогональности, однако имеющий в 2 раза меньший объем по сравнению с полным факторным планом порядка 3. Такой план называется полурепликой полного факторного плана или дробным планом порядка 2^{3-1} .

Выражение $z_1 z_2$ называется генератором плана для переменной z_3 . Очевидно, для плана третьего порядка можно построить всего три генератора плана, выбирая различные пары независимых переменных. Дальнейшее сокращение объема плана трехфакторного эксперимента невозможно, так как линейная модель в этом случае содержит четыре коэффициента, что равно числу уравнений, получаемых для их определения согласно плану 2^{3-1} .

Полный факторный эксперимент порядка 4 содержит 16 точек. Сократить его вдвое можно тем же приемом. Выберем как основные переменные z_1, z_2, z_3 и построим для них полный

факторный эксперимент. Закон изменения фактора z_4 отождествим с величинами любого из генераторов:

$$z_4 = \begin{cases} z_1 z_2 \\ z_1 z_3 \\ z_2 z_3 \\ z_1 z_2 z_3. \end{cases} \quad (3.48)$$

В отличие от предыдущего однозначного случая здесь мы видим уже четыре возможных варианта задания закона изменения «генерируемого» фактора. Каждый план содержит по $2^{4-1} = 8$ точек. Дальнейшее сокращение плана вдвое невозможно, так как для определения параметров линейной модели четырех переменных требуется план, содержащий не менее пяти точек.

Иная ситуация возникает при $n=5$. Здесь полный план содержит $2^5 = 32$ точки, а для определения параметров линейной модели можно обойтись планом из 6 точек. Поэтому полный план можно сократить в 4 раза, т. е. построить дробный план порядка 2^{5-2} (или четвертьреплику). Поступим, так же, как и прежде. За основу возьмем полный план, построенный для первых трех факторов z_1, z_2, z_3 , а изменения факторов z_4 и z_5 отождествим с величинами каких-либо двух из шести возможных генераторов:

$$z_4 = \begin{cases} z_1 z_2 \\ z_1 z_3 \\ z_1 z_2 z_3 \\ z_1 z_3 \\ z_1 z_3 \\ z_2 z_3 \end{cases}; \quad z_5 = \begin{cases} z_1 z_3 \\ z_2 z_3 \\ z_1 z_2 z_3 \\ z_2 z_3 \\ z_1 z_2 z_3 \\ z_1 z_2 z_3 \end{cases}, \quad (3.49)$$

которым соответствуют шесть возможных дробных планов. Еще шесть дробных планов можно получить, если поменять местами столбцы для факторов z_4 и z_5 .

Аналогичным образом можно строить дробные факторные планы порядка 2^{n-p} , которые будут иметь в 2^p раз меньший объем по сравнению с объемом полного факторного плана.

Можно показать, что дробные факторные планы, определяемые на вершинах гиперкуба с длиной грани 2, являются не только ортогональными, а удовлетворяют также критериям A , G и D -оптимальности [39].

При исследовании влияния на качество работы шарошечных долот различных технологических параметров их изготовления была поставлена задача построения модели проходки на долото, учитывающей технологию их изготов-

z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	\bar{y}	\hat{y}
1	1	1	1	1	1	53,0	53,57
1	1	1	-1	-1	1	57,2	56,685
1	1	-1	1	-1	-1	46,0	48,325
1	1	-1	-1	1	-1	45,3	42,975
-1	1	1	1	-1	-1	64,8	62,475
-1	1	1	-1	1	-1	54,8	57,225
-1	1	-1	1	1	1	48,1	47,525
-1	1	-1	-1	-1	-1	50,0	61,225
52,4	-2,025	5,05	0,575	-2,1	-0,325		

ления. Были выбраны пять существенных, с точки зрения исследователей, технологических параметров: время, температура закалки режущих частей, толщина цементационного слоя и т. д.

Предполагая, что модель линейна, поставили планированный эксперимент с дробным планом 2^{5-2} . В качестве генераторов были использованы комбинации $z_1z_2z_3$ и z_1z_2 , где z_i — безразмерные переменные. В каждой точке плана были проведены два эксперимента. Их средние значения приведены в табл. 18.

По этим данным были рассчитаны вектор коэффициентов модели α и величины \hat{y}_i .

Для проверки адекватности модели по формулам (3.34) и (3.35) были рассчитаны величины

$$\frac{1}{2} \hat{\sigma}_y^2 = \hat{\sigma}_y^2 = 3,62 \quad \text{и} \quad \hat{\sigma}^2 = 12,31.$$

Их отношение

$$F = \frac{12,31}{3,62} = 3,4.$$

Задаваясь уровнем значимости $\alpha=0,05$ (доверительная вероятность $\mathcal{P}(F < F_{кр}) = 1 - \alpha = 0,95$) и учитывая, что $\eta_1 = 8 - 5 - 1 = 2$ и $\eta_2 = 8(2 - 1) = 8$, из таблиц распределения Фишера найдем $F_{кр} = 4,46$. Поскольку $F < F_{кр}$, гипотезу об адекватности модели считаем правильной.

Для проверки гипотезы о значимости коэффициентов модели воспользуемся критерием Стьюдента в форме (3.31). Задаваясь уровнем значимости в (3.30) $\alpha=0,05$ и учитывая, что $\eta_2=8$, из таблиц распределения Стьюдента найдем $\varepsilon=2,31$. Поскольку $b_{ii}^{-1} = 1/8$ и $\hat{\sigma}_y^2 = 3,62$, то $\varepsilon \sqrt{b_{ii}^{-1} \hat{\sigma}_y^2} = 1,55$ и доверительные интервалы для коэффициентов модели запишем в виде

$$\alpha_i \in (\hat{\alpha}_i \pm 1,55).$$

Доверительные интервалы для α_3 и α_5 содержат нуль, поэтому принимаем гипотезу, что факторы α_3 и α_4 незначимы. Опуская незначимые факторы, получаем

$$\hat{y} = 52,4 - 2,025z_1 + 5,05z_2 - 2,1z_4.$$

§ 19. Дробные планы и эффект смешения факторов

При построении дробного плана 2^{3-1} для линейной модели в предыдущем параграфе значения фактора z_3 мы отождествили с генератором z_1z_2 . В результате получили план (3.47). Предположим, что мы ошиблись при выборе вида модели. Пусть истинная модель зависимости $y(z_1, z_2, z_3)$ является не линейной, как мы предполагали, а квадратичной:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_3 z_3 + \alpha_{11} z_1^2 + \alpha_{22} z_2^2 + \alpha_{33} z_3^2 + \alpha_{12} z_1 z_2 + \alpha_{13} z_1 z_3 + \alpha_{23} z_2 z_3. \quad (3.50)$$

Во всех точках плана (3.47) $z_i^2 = 1$, поэтому в модели (3.50) члены с z_i^2 можно объединить со свободным членом α_0 . Коэффициенты при α_3 и α_{12} совпадают по условию построения плана (3.47) ($z_1 z_2$ — генератор для z_3). Поэтому их также можно объединить. При непосредственной проверке можно убедиться, что коэффициенты будут совпадать при α_1 и α_{23} и при α_2 и α_{13} . Проводя группирование слагаемых с одинаковыми коэффициентами в (3.50), получим

$$y = (\alpha_0 + \alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}) + (\alpha_1 + \alpha_{23}) z_1 + (\alpha_2 + \alpha_{13}) z_2 + (\alpha_3 + \alpha_{12}) z_3. \quad (3.51)$$

Отсюда видно, что коэффициенты линейной модели, которые обозначим $\hat{\alpha}_i$ ($i = \overline{0,3}$), на самом деле будут суммами истинных значений этих коэффициентов и коэффициентов при неучтенных членах, соответствующих взаимодействию факторов, т. е.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_0 &= \alpha_0 + \alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}; \\ \hat{\alpha}_1 &= \alpha_1 + \alpha_{23}; \\ \hat{\alpha}_2 &= \alpha_2 + \alpha_{13}; \\ \hat{\alpha}_3 &= \alpha_3 + \alpha_{12}. \end{aligned} \quad (3.52)$$

Это явление называется эффектом смешения факторов.

Для формализации процедуры выявления смешиваемых факторов при построении дробных планов введем понятие определяющего контраста I , определяя его как произведение факторов, тождественно равное единице. Так, для дробного плана 2^{3-1} с генератором z_1z_2 определяющий контраст (или просто контраст)

$$I_3 = z_1 z_2 z_3. \quad (3.53)$$

Поскольку $z_3 = z_1 z_2$, то $I_3 = (z_1 z_2)^2 = 1$.

Для дробного плана 2^{4-1} с генератором $z_1 z_2 z_3$ контраст определяется равенством

$$I_4 = z_1 z_2 z_3 z_4. \quad (3.54)$$

Для выявления факторов, смешиваемых с фактором z_1 , надо умножить соответствующий контраст на этот фактор. Так, для дробного плана 2^{3-1} получим

$$\begin{aligned} I_3 z_1 &= z_1^2 z_2 z_3 = z_2 z_3; \\ I_3 z_2 &= z_1 z_2^2 z_3 = z_1 z_3; \\ I_3 z_3 &= z_1 z_2 z_3^2 = z_1 z_2, \end{aligned} \quad (3.55)$$

т. е. фактор z_1 смешивается с фактором $z_2 z_3$, z_2 — с фактором $z_1 z_3$ и z_3 — с фактором $z_1 z_2$, что совпадает с предыдущим результатом (3.52).

Поступив аналогичным образом для плана 2^{4-1} с контрастом (3.54), получим

$$\begin{aligned} I_4 z_1 &= z_2 z_3 z_4; & I_4 z_1 z_2 &= z_3 z_4; \\ I_4 z_2 &= z_1 z_3 z_4; & I_4 z_1 z_3 &= z_2 z_4; \\ I_4 z_3 &= z_1 z_2 z_4; & I_4 z_1 z_4 &= z_2 z_3; \\ I_4 z_4 &= z_1 z_2 z_3; & I_4 z_2 z_3 &= z_1 z_4; \\ I_4 z_3 z_4 &= z_1 z_2. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Отсюда видно, что факторы, входящие в модель линейно, для нашего плана смешиваются только с факторами, соответствующими тройным взаимодействиям. Порядок взаимодействия факторов, с которыми происходит смешение линейных составляющих модели, всегда на единицу меньше числа сомножителей в определяющем контрасте.

Таким образом, чем выше порядок генератора, тем выше порядок взаимодействия у смешиваемых факторов и тем больше оснований у исследователя считать эти взаимодействия несущественными при построении модели. Поэтому из множества возможных генераторов предпочтение при построении дробного плана отдается генераторам более высокого порядка.

При построении дробного плана 2^{5-2} у нас было два набора генераторов (3.49): один — для z_4 , другой — для z_5 . Пусть при построении плана были выбраны генераторы $z_4 = z_1 z_3$ и $z_5 = z_1 z_2 z_3$. Соответствующие им контрасты определяются равенствами

$$I_4 = z_1 z_3 z_4 \text{ и } I_5 = z_1 z_2 z_3 z_5. \quad (3.57)$$

Перемножив I_4 и I_5 , получим еще один дополнительный контраст:

$$I_4 I_5 = z_2 z_4 z_5. \quad (3.58)$$

Для определения эффектов взаимодействия в этом случае введем понятие обобщающего контраста, который определим

как совокупность найденных контрастов, объединенную в виде их равенства

$$I = z_1 z_3 z_4 = z_1 z_2 z_3 z_5 = z_2 z_4 z_5. \quad (3.59)$$

Умножив обобщающий контраст на факторы, смешение коэффициентов которых нас интересует, получим следующую систему взаимодействий:

$$\begin{aligned} z_1 &= z_3 z_4 = z_2 z_3 z_5 = z_1 z_2 z_4 z_5; \\ z_2 &= z_1 z_2 z_3 z_4 = z_1 z_3 z_5 = z_4 z_5; \\ z_3 &= z_1 z_4 = z_1 z_2 z_5 = z_2 z_3 z_4 z_5; \\ z_4 &= z_1 z_3 = z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 = z_2 z_5; \\ z_5 &= z_1 z_3 z_4 z_5 = z_1 z_2 z_3 = z_2 z_4; \\ z_1 z_2 &= z_2 z_3 z_4 = z_3 z_5 = z_1 z_4 z_5; \\ z_1 z_3 &= z_4 = z_2 z_5 = z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Отсюда видно, например, что за счет эффектов смешения коэффициент при z_1 , вычисленный в соответствии с построенным планом эксперимента, будет суммой коэффициентов:

$$\hat{\alpha}_1 = \alpha_1 + \alpha_{34} + \alpha_{235} + \alpha_{1245}. \quad (3.61)$$

Очевидно, что с увеличением числа исходных факторов число слагаемых в суммах вида (3.61) будет быстро возрастать. Однако эта закономерность чисто теоретическая. На практике, как правило, модели включают даже не все взаимодействия первого порядка (парные взаимодействия), лишь некоторые взаимодействия второго порядка (тройные взаимодействия) и почти не содержат взаимодействия выше третьего порядка.

Итак, мы рассмотрели вопрос о перечислении возможных смешений факторов при выборе того или иного плана. Но определить возможные смешения мало. Надо еще выяснить, какие из них реализуются на самом деле, чтобы затем подправить нашу модель. Для решения этой задачи еще раз вернемся к понятию адекватности модели. Согласно данному ранее определению заключение о неадекватности модели можно трактовать только как неправильный выбор исходного класса приближающих функций. В этом случае надо повторить построение модели в другом классе функций, более приемлемом для решаемой задачи. Чаще всего расширяют класс приближающих функций. Так, если неадекватной оказалась линейная модель, то строится квадратичная и т. д.

Другая ситуация возникает тогда, когда приходят к выводу, что модель адекватна. Казалось бы, на этом работа должна и закончиться. Однако при планировании эксперимента это не совсем так. Поскольку приближали искомую зависимость только в выбранных точках, не оговаривая качество приближения в их окрестностях, возможны ситуации, когда в этих точ-

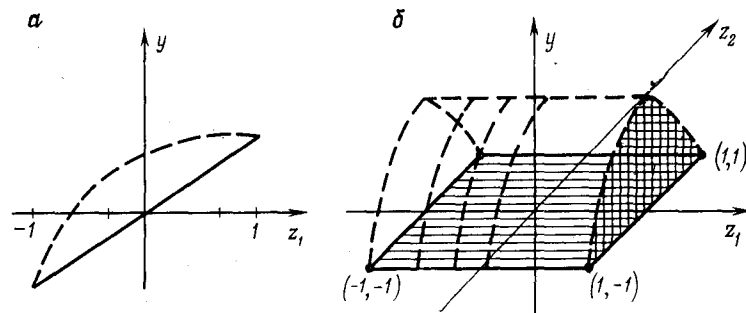


Рис. 8. Графики возможных истинных зависимостей (пунктир) и их линейная аппроксимация (сплошная линия)

как приближение будет хорошим, поэтому мы сделаем вывод, что модель адекватна, а на самом деле она будет иметь низкую точность внутри области приближения. Примеры подобных случаев приведены для одной на рис. 8, а и двух исходных переменных на рис. 8, б, где сплошной линией изображены линейные аппроксимации, построенные по данным полных факторных планов, для зависимостей, обозначенных пунктиром. Если для построения модели используется не полный факторный план, а его дробные реплики, то, очевидно, вероятность встретиться с аналогичной ситуацией возрастет.

Чтобы ее распознать, надо после проверки адекватности модели провести дополнительные эксперименты с целью выявления эффектов смещения в коэффициентах модели. Если такое смещение будет выявлено, следует построить другую модель, включающую в себя члены, соответствующие выявленному взаимодействию факторов.

Процедуру определения эффектов смещения рассмотрим на примере задачи построения трехфакторной модели, рассмотренной в начале параграфа.

Пусть по плану 2^{3-1} (3.47) построена линейная модель, которая при проверке оказалась адекватной. Если предположить, что истинная модель квадратична, то коэффициенты линейной модели будут суммами вида (3.51), что и характеризует эффект смещения. Для выявления значимости квадратичных взаимодействий факторов в модели проведем дополнительно m экспериментов в точке с координатами $(0, 0, 0)$. Среднее значение результата в этой точке обозначим \bar{y}_0 . Считая все измерения равноточными, дисперсно \bar{y}_0 оценим по формуле (3.34)

$$\sigma_{\bar{y}_0}^2 = \hat{\sigma}_y^2 / m. \quad (3.62)$$

В этой же точке линейная модель предсказывает значение \bar{y} , численно равное α_0 с дисперсией (3.26):

$$\sigma_{\alpha_0}^2 = b_{ii}^{-1} \sigma^2 = \frac{1}{N} \sigma_{y_i}^2 = \frac{1}{N} \frac{\hat{\sigma}_y^2}{v}. \quad (3.63)$$

Оценим статистическую значимость различия \bar{y}_0 и $\hat{\alpha}_0$. Если оно незначимо, то будем считать, что квадратичными эффектами взаимодействия факторов в модели можно пренебречь. При значимом различии между \bar{y}_0 и $\hat{\alpha}_0$ делаем вывод, что квадратичные взаимодействия существенны и их следует включить в модель, однако различить эти взаимодействия между собой еще нельзя.

Введем безразмерную величину

$$t = \frac{\bar{y}_0 - \hat{\alpha}_0}{[D(\bar{y}_0 - \hat{\alpha}_0)]^{1/2}}; \quad D(\bar{y}_0 - \hat{\alpha}_0) = \sigma_{\bar{y}_0}^2 + \sigma_{\alpha_0}^2 = \frac{\sigma_y^2}{v} \cdot \frac{m + vN}{mN}, \quad (3.64)$$

которая при выполнении предположения о нормальности распределения величин \bar{y} и $\hat{\alpha}_0$ будет подчиняться распределению Стьюдента [59] с $(N - k - 1)$ -ми степенями свободы.

Задавая уровень значимости (или доверительную вероятность) и определяя из таблиц распределения Стьюдента величину $t_{кр}$ в формуле (3.30), получаем следующий доверительный интервал для разности $\hat{\Delta} = \bar{y}_0 - \hat{\alpha}_0$:

$$\hat{\Delta} - \varepsilon \frac{\sigma_y^2}{v} \cdot \frac{m + vN}{mv} \leq \Delta \leq \hat{\Delta} + \varepsilon \frac{\sigma_y^2}{v} \cdot \frac{m + vN}{mv}. \quad (3.65)$$

Если доверительный интервал включает нуль, что эквивалентно выполнению условия

$$|\bar{y}_0 - \hat{\alpha}_0| < \varepsilon \frac{\sigma_y^2}{v} \cdot \frac{m + vN}{mv}, \quad (3.66)$$

то принимаем гипотезу, что величины \bar{y}_0 и $\hat{\alpha}_0$ не различны, а следовательно, квадратичные взаимодействия в модели являются несущественными и ими можно пренебречь.

Рассмотрим теперь случай, когда дополнительные эксперименты (также m штук) проведены не в начале координат, а в точке $(1, 0, 0)$. Вычислим среднее значение результатов экспериментов и их дисперсию (3.62). Среднее значение y по модели в этой точке будет $\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1$ с дисперсией (3.26)

$$\sigma_{\bar{y}_1}^2 = (1, 1, 0, 0) \mathbf{B}^{-1} (1, 1, 0, 0)' \sigma^2 = \frac{2}{N} \cdot \frac{\sigma_y^2}{v}. \quad (3.67)$$

Вычислим вспомогательную величину

$$t = \frac{\bar{y} - \hat{\alpha}_0 - \hat{\alpha}_1}{\left[\frac{\sigma_y^2}{v} \left(\frac{2m + vN}{mN} \right) \right]^{1/2}}, \quad (3.68)$$

которая распределена по закону Стьюдента с $N - k - 1$ степенями свободы. Задавая уровень значимости и определяя $t_{кр}$ аналогично (3.68), строим неравенство

$$|\bar{y}_1 - \hat{\alpha}_0 - \hat{\alpha}_1| < t_{кр} \left[\frac{\sigma_y^2}{v} \left(\frac{2m + vN}{mN} \right) \right]^{1/2}. \quad (3.69)$$

Если оно выполняется, то принимаем гипотезу, что различие между сравниваемыми величинами несущественно.

Поскольку при расчете по квадратичной модели в выбранной точке результат равен сумме $\alpha_0 + \alpha_{11} + \alpha_1$, а по линейной модели за счет взаимодействия — сумме $\alpha_0 + \alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33} + \alpha_1 + \alpha_{23}$ [см. (3.52)], то неразличимость проверяемых результатов эквивалентна утверждению о незначимости эффекта от парного взаимодействия факторов z_{22}^2 , z_{33}^2 и z_{23} .

Выбирая другие экспериментальные точки, аналогичным образом можно проверить значимость эффектов от учета в модели других типов взаимодействий.

§ 20. Ортогональный центральный композиционный план для квадратичных моделей

Рассмотрим задачу планирования эксперимента для определения коэффициентов квадратичной модели:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n + a_{11} x_1^2 + a_{12} x_1 x_2 + \dots + a_{nn} x_n^2. \quad (3.70)$$

На практике построение модели какого-либо объекта, как правило, начинается с попытки построить для него адекватную линейную модель, как наиболее простую. Если успеха при этом не достигается, переходят к построению квадратичной модели. Учитывая такую последовательность при построении моделей, естественно потребовать, чтобы план для квадратичной модели полностью включал в себя план линейной модели. Планы, обладающие таким свойством, называются композиционными.

Основой (или ядром) композиционного плана является полный факторный план или дробная реплика. К ядру плана добавляют одну точку в центре плана и $2n$ точек с координатами $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0) \dots (0, 0, \dots, \pm\alpha)$. Последние точки обычно называют звездными, а величину α — звездным плечом. Расположение звездных точек на квадратичных планах для двух и трех переменных показано на рис. 9, где они обозначены звездочками. Число точек в начале плана и звездное плечо выбираются из условий оптимальности, которым должен удовлетворять план.

При разборе эффекта смешения факторов при планировании эксперимента было установлено, что минимальный порядок смешения всегда на единицу меньше порядка генератора. Поэтому, чтобы не было эффектов смешения второго порядка в квадратичной модели, генератор должен иметь порядок не

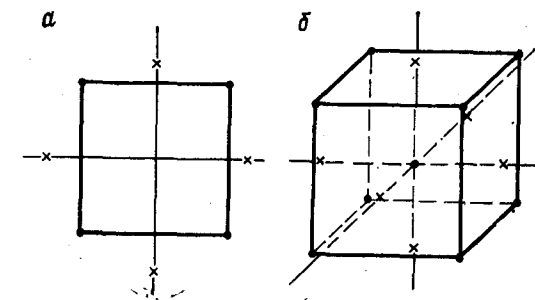


Рис. 9. Графики центральных композиционных планов для двух (а) и трехфакторных (б) моделей

менее четырех. А поскольку максимальный порядок генератора на единицу меньше числа исходных переменных n , то получаем, что ядром композиционного плана является полный факторный план 2^n при $n \leq 4$ или любая дробная реплика 2^{n-p} при условии $n - p \geq 4$.

Композиционный план для модели вида (3.70) не удовлетворяет условию ортогональности. Действительно, нетрудно проверить, что условие взаимной ортогональности не выполняется для любой пары квадратичных столбцов исходной матрицы плана, а также для всех пар из единичного столбца и квадратичного.

Для обеспечения условия ортогональности столбцов матрицы плана приведем правую часть (3.70) к виду

$$y = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + a_{11} (x_1^2 - \beta) + a_{22} x_1 x_2 + \dots + a_{22} (x_2^2 - \beta) + a_{23} x_2 x_3 + \dots + a_{nn} (x_n - \beta); \quad b_0 = a_0 - \beta \sum_{i=1}^n a_{ii}. \quad (3.71)$$

Приняв величины $x_{ii}^2 - \beta$ за новые переменные, запишем композиционный план для модели (3.71) в виде табл. 19. Для удобства анализа квадратичные столбцы в таблице поставлены сразу после линейных.

Из табл. 19 видно, что выполнение условия ортогональности между столбцами x_0 и $(x_i^2 - \beta)$, $(i = \overline{1, n})$, а также между столбцами $(x_i^2 - \beta)$ и $(x_j^2 - \beta)$, $(i \neq j, i, j = \overline{1, n})$ эквивалентно выполнению равенств

$$\sum_{k=1}^N (x_{ik}^2 - \beta) = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\sum_{k=1}^N (x_{ik}^2 - \beta) (x_{jk}^2 - \beta) = 0, \quad i \neq j, i, j = \overline{1, n}, \quad (3.72)$$

Таблица 19

N	x ₀	x ₁	...	x _n	x ₁ ² -β	x ₂ ² -β	...	x _n ² -β	x ₁ ² β	x ₂ ² β	...	x _n ² β	x ₁ ·x ₃	...	x _{n-1} ² x _n
1	1	+1		+1	1-β	1-β		1-β					+1		1
2	1	+1		+1	1-β	1-β		1-β					-1		1
3	1	+1		+1	1-β	1-β		1-β					+1		1
4	1	+1		+1	1-β	1-β		1-β					-1		1
...															
2 ^{n-p}	1	-1		-1	1-β	1-β		1-β					1		1
2 ^{n-p} +1	1	+α		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				0		0
2 ^{n-p} +2	1	-α		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				0		0
2 ^{n-p} +3	1	0		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				0		0
2 ^{n-p} +4	1	0		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				0		0
...															
2 ^{n-p} +2n	1	+α		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				α ² -β		0
		-α		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				α ² -β		0
		0		0	1-β	1-β		1-β	α ² -β				β		0

где $N = 2^{n-p} + 2n + 1$ — общее число точек в плане. Раскрывая эти уравнения, получаем систему из двух уравнений относительно α и β , которые не зависят от номеров переменных:

$$\begin{aligned} 2^{n-p} + 2\alpha^2 - \beta N &= 0; \\ 2^{n-p} - \beta \cdot 2(2^{n-p} + 2\alpha^2) + \beta^2 N &= 0. \end{aligned} \quad (3.73)$$

Определив из первого уравнения β и подставив во второе, получим

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2^{n-p} + 2\alpha^2}{N}; \\ (2^{n-p} + 2\alpha^2) &= 2^{n-p}N \end{aligned} \quad (3.74)$$

или

$$\alpha = \pm [(2^{n-p-2}N)^{1/2} - 2^{n-p-1}]^{1/2}.$$

Если величина N задана, то, рассчитав по этим формулам α и β , всегда можно выполнить условие ортогональности столбцов плана матрицы для модели (3.71).

Итак, пусть величина N и параметры α и β определены. Тогда систему нормальных уравнений для определения коэффициентов модели (3.71) по плану, представленному в табл. 19, можно записать в виде

$$\begin{aligned} A'A\alpha &= A'Y; \\ \alpha &= (a_0, a_1, \dots, a_n, a_{11}-\beta, a_{22}-\beta, \dots, a_{nn}-\beta, \dots, \\ &\dots, a_{n-1, n}); \\ Y &= (y_1, y_2, \dots, y_N). \end{aligned} \quad (3.75)$$

Поскольку столбцы матрицы A , соответствующей плану эксперимента, ортогональны, матрица $A'A$ будет диагональной. Записывая ее в клеточной форме, получаем

$$A'A = \begin{pmatrix} N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 I_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 I_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 I_{\binom{n}{2}} \end{pmatrix}, \quad (3.76)$$

где $m_1 = 2^{n-p} + 2\alpha^2$; $m_2 = 2^{n-p}(1-\beta) + 2(\alpha^2-\beta)^2 + (2n-1)\beta^2$; $m_3 = = 2^{n-p}$; I_n — единичная матрица размера n ; $\binom{n}{2}$ — число сочетаний из n по 2.

Решая систему (3.75) с учетом (3.76), получаем следующие соотношения для оценок коэффициентов модели:

$$\begin{aligned}\hat{b}_0 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j; \\ \hat{a}_i &= \frac{1}{m_1} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j, \quad i = \overline{1, n}; \\ \hat{a}_{ii} &= \frac{1}{m_2} \sum_{j=1}^N (x_{ij}^2 - \beta) y_j, \quad i = \overline{1, n}; \\ \hat{a}_{ik} &= \frac{1}{m_3} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{kj} y_j, \quad i \neq k, \quad i, k = \overline{1, n}.\end{aligned}\quad (3.77)$$

Дисперсия коэффициентов оценивается по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_0^2 &= \frac{\sigma^2}{N}; \\ \sigma_i^2 &= \frac{\sigma^2}{m_1}, \quad i = \overline{1, n}; \\ \sigma_{ii}^2 &= \frac{\sigma^2}{m_2}, \quad i = \overline{1, n}; \\ \sigma_{ik}^2 &= \frac{\sigma^2}{m_3}, \quad i \neq k, \quad i, k = \overline{1, n}.\end{aligned}\quad (3.78)$$

В силу независимости коэффициентов модели дисперсия для \hat{a}_0

$$\sigma_{a_0}^2 = \sigma_0^2 + \beta \sum_{i=1}^n \sigma_{ii}^2 = \sigma^2 \left(\frac{1}{N} + \beta^2 \frac{n}{m_2} \right).\quad (3.79)$$

Процедура проверки адекватности модели и значимости коэффициентов такая же, как и для линейной модели, которая была рассмотрена ранее. Подробно методы построения планов для квадратичных моделей изложены в работе [39].

ГЛАВА 4.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

§ 21. Общие сведения из теории автоматического управления

Из теории автоматического управления известно, что поведение линейного динамического объекта n -го порядка с запаздыванием τ , имеющего один выход $y(t)$ и один вход $x(t)$,

однозначно определяется решением дифференциального уравнения

$$\begin{aligned}a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t-\tau)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t-\tau)}{dt^{m-1}} + \dots \\ + b_1 \frac{dx(t-\tau)}{dt} + b_0 x(t-\tau), \quad m < n,\end{aligned}\quad (4.1)$$

с соответствующими начальными условиями. Для нулевых начальных условий это уравнение в изображениях по Лапласу имеет вид

$$Y(p) A(p) = X(p) B(p) e^{-p\tau},\quad (4.2)$$

где

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1;$$

$$B(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0;$$

$$Y(p) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt; \quad X(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt;$$

$$p = \sigma + j\omega.$$

Передаточная функция объекта

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{B(p)}{A(p)} e^{-p\tau}.\quad (4.3)$$

Решение уравнения (4.1) при нулевых начальных условиях может быть вычислено по формуле

$$y(t) = L^{-1} [W(p) X(p)] = L^{-1} \left[\frac{B(p)}{A(p)} e^{-p\tau} X(p) \right],\quad (4.4)$$

где L^{-1} — оператор обратного преобразования Лапласа.

Сигнал $h(t)$, получаемый на выходе объекта при подаче на его вход возмущающего сигнала в виде единичного скачка

$$x(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0, \end{cases}\quad (4.5)$$

называется *переходной функцией объекта*. Если корни характеристического уравнения

$$A(p) = 0\quad (4.6)$$

различны и равны p_i ($i=1, n$), переходную функцию после подстановки (4.5) в (4.4) и проведения обратного преобразования Лапласа при условии $m < n$ можно записать в виде¹

$$h(t) = \frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{B(p_i)}{p_i A'(p_i)} e^{p_i(t-\tau)}, \quad (4.7)$$

где

$$A'(p_i) = \left. \frac{d}{dp} A(p) \right|_{p=p_i}$$

Поскольку для устойчивых объектов, которые нас интересуют, действительные части всех корней отрицательны, при $t \rightarrow \infty$ установившееся значение переходной функции

$$h(\infty) = B'(0)/A'(0) = b_0. \quad (4.8)$$

Раскладывая полином $A(p)$ на множители, его можно выразить через корни характеристического уравнения:

$$A'(p) = \frac{\prod_{i=1}^n (p - p_i)}{(-1)^n \prod_{i=1}^n p_i}. \quad (4.9)$$

Учитывая это соотношение, величину $p_i A'(p_i)$ в знаменателе (4.7) можно вычислить по формуле

$$p_i A'(p_i) = p_i \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (p_i - p_j)}{(-1)^n \prod_{i=1}^n p_i}, \quad \prod_{i=1}^n p_i \equiv \prod_{j=1}^n p_{j+1}. \quad (4.10)$$

Свободная составляющая переходной функции определяется как разность

$$u(t) = h'(t) - h(\infty) = \sum_{i=1}^n \frac{B(p_i)}{p_i A'(p_i)} e^{p_i(t-\tau)}. \quad (4.11)$$

Сигнал, получаемый на выходе объекта при подаче на его вход в момент времени $t=0$ воздействия в виде дельта-функции, называется *импульсной переходной функцией* $\omega(t)$. Подставляя $x(t)$ в виде дельта-функции в (4.4) и производя вычисления, получаем

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} h(t). \quad (4.12)$$

¹ Формулы для кратных корней можно получить из (4.7) путем предельного перехода, устремляя к нулю разности между соответствующими корнями.

Подставив сюда $h(t)$ из (4.7), получим

$$\omega(t) = - \sum_{i=1}^n \frac{B(p_i)}{A'(p_i)} e^{-p_i(t-\tau)}. \quad (4.13)$$

Импульсная переходная функция связана с реакцией объекта на произвольное воздействие $x(t)$ равенством

$$y(t) = \int_0^t x(t-z) \omega(z) dz, \quad x(t) = 0 \text{ при } t < 0. \quad (4.14)$$

Пусть объект выведен из положения равновесия каким-то воздействием, поданным на его вход, и которое в момент времени t_1 было снято. Тогда, начиная с времени $t_1 + \tau$, объект будет находиться в свободном движении к положению равновесия. Закон этого движения определяется решением однородного дифференциального уравнения

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 0 \quad (4.15)$$

с соответствующими начальными условиями. Это уравнение получается из (4.1) путем замены нулем его правой части. Решение уравнения (4.15) в предположении различных корней характеристического уравнения (4.6) можно записать в виде

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{p_i(t-t_1-\tau)}. \quad (4.16)$$

Коэффициенты α_i определяются начальными условиями в момент времени $t=t_1$. Если в момент снятия возмущающего воздействия объект находился в положении равновесия, определяемого условиями $y(t_1) = y_0$, $y^{(i)}(t_1) = 0$, $i = 1, n-1$, коэффициенты α_i будут определяться равенством

$$\alpha_i = \frac{y_0}{p_i A'(p_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.17)$$

Для этого случая уравнения свободного движения объекта (4.14) запишем в виде

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \frac{y_0}{p_i A'(p_i)} e^{-p_i(t-t_1-\tau)}. \quad (4.18)$$

Из сравнения (4.18) и (4.11) видно, что переходный процесс при свободном движении объекта совпадает со свободной составляющей переходной функции объекта при $B(p_i) = y_0$.

При отождествлении величины p в преобразовании Лапласа с чисто мнимой величиной $j\omega$ из передаточной функции объекта

(4.3) получим комплексную амплитудно-фазовую характеристику:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (4.19)$$

Функции $X(j\omega)$ и $Y(j\omega)$ являются преобразованиями Фурье входного и выходного сигналов. Выделяя из комплексной функции $W(j\omega)$ действительную часть $P(\omega)$ и мнимую часть $Q(\omega)$, (4.19) можно записать

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (4.20)$$

или

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (4.21)$$

где

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}.$$

Функции $P(\omega)$, $Q(\omega)$ и $A(\omega)$ называют соответственно вещественной, мнимой и амплитудно-частотной характеристиками, а $\varphi(\omega)$ — фазово-частотной характеристикой объекта.

При подаче на вход объекта синусоидального возмущения

$$x(t) = x_0 \sin \omega_0 t \quad (4.22)$$

значение выходной переменной после окончания переходного процесса будет изменяться по закону

$$y(t) = y_0 \sin(\omega_0 t + \Psi). \quad (4.23)$$

Значения частотных характеристик при этом определяются формулами

$$\begin{aligned} A(\omega_0) &= \frac{y_0}{x_0}; & \varphi(\omega_0) &= \Psi; \\ P(\omega_0) &= A \cos \Psi; & Q(\omega_0) &= A \sin \Psi. \end{aligned} \quad (4.24)$$

§ 22. Постановка задачи идентификации

Чтобы управлять любым объектом, будь то технологический процесс, космический корабль или автомобиль, необходимо знать его реакцию на управляющие воздействия. Совокупность этих реакций и правила их связи с управляющими воздействиями, которые могут быть выражены в виде математических соотношений, таблиц, графиков, в навыке оператора или водителя, отождествляются с моделью объекта управления.

Приступая к построению модели конкретного объекта, мы всегда располагаем некоторой априорной информацией о классе его возможных реакций на то или иное воздействие. Так, начиная осваивать управление автомобилем, мы знаем, что

при повороте руля автомобиль должен поворачивать, а не двигаться назад или тормозить, при нажатии на педаль тормоза он должен замедлять движение, а не ускорять его и т. д. Однако мы еще не знаем, насколько круто он будет поворачивать и как резко будет тормозить. В процессе обучения происходит замена качественных связей количественными. Тем самым класс возможных зависимостей между реакциями автомобиля и управляющими воздействиями сужается, исходная качественная модель уточняется и все более отождествляется с конкретным автомобилем.

Процесс такого отождествления — постановки во взаимно-однозначное соответствие модели и объекта — называется идентификацией. На основании этого определения задачу идентификации модели объекта управления можно сформулировать как задачу уточнения некоторой априорной модели с целью обеспечения возможности отождествления реакций модели и объекта на одинаковые управляющие воздействия.

Для линейного динамического объекта возможный класс моделей можно записать в виде дифференциального уравнения (4.1) или порождаемых этим уравнением и эквивалентных ему классов моделей для передаточной функции объекта (4.3), его переходной функции (4.12) или его частотных характеристик (4.24). Интегральную форму модели (4.14), вероятно, следует рассматривать как разновидность записи класса моделей, определяемых импульсной переходной функцией.

Выбор конкретного класса моделей для последующей идентификации существенно зависит от вида возмущающего воздействия при снятии экспериментальных характеристик объекта и от желания исследователя использовать тот или иной вычислительный метод для отбора наилучшей модели. Например, если выходной сигнал объекта — отклик на возмущения синусоидальными сигналами различной частоты, то, как правило, в качестве модели объекта используются его частотные характеристики; если возмущающее воздействие имеет вид единичного скачка, то наиболее часто используют классы моделей вида (4.1) или (4.7); если $y(t)$ является реакцией объекта на возмущение в виде случайного процесса, то используется интегральный класс моделей (4.14) и т. д.

По типу вычислительных алгоритмов идентификации их можно разделить на три класса — аналитические, графические и графоаналитические. Последние два из них обычно применяются при ручной обработке экспериментального материала и часто позволяют довольно просто и быстро получить ответ. Однако, как правило, платой за скорость и простоту является точность получаемой модели.

Так как графические и графоаналитические методы достаточно подробно изложены в литературе, основное внимание в настоящей главе уделяется аналитическим методам идентификации. Такому отбору методов способствовала также боль-

шая общность аналитических методов. Длительность и трудоемкость вычислительных процедур в настоящее время уже не играют существенной роли, так как при надлежащем их алгоритмическом оформлении с ними легко справиться при помощи вычислительной техники.

§ 23. Идентификация переходной функции объекта на основе методов аппроксимации в классе экспоненциальных функций

Запишем переходную функцию в параметрическом виде

$$h(t) = b_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{p_i(t-\tau)}. \quad (4.25)$$

При ее идентификации на основе измерений $h(t)$ надо определить $2n+2$ параметров¹ (n — число коэффициентов α_i , n — число корней характеристического уравнения p_i время задержки τ и коэффициент усиления b_0). Между величинами α_i , b_0 и p_i существует $n+1$ дополнительных связей; n из них непосредственно следуют из начальных условий: при $t=\tau$ величины n первых производных от переходной функции, начиная с нулевой, равны нулю. Поэтому

$$h(\tau) = b_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0;$$

$$\left. \frac{\partial^k h(t)}{\partial t^k} \right|_{t=\tau} = \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i^k = 0, \quad k = \overline{1, n-1}. \quad (4.26)$$

Еще одно условие следует из асимптотического свойства переходной функции для устойчивых объектов: с ростом t величина $h(t)$ стремится к b_0 . Поскольку величина b_0 легко может быть определена из экспериментальных данных, будем полагать, что b_0 известно.

Процедуру идентификации начнем с определения корней характеристического уравнения. Выделяя из переходной функции свободную составляющую, запишем ее в виде

$$u(t) = h_1(t) - b_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i e^{p_i t}; \quad \beta_i = \alpha_i e^{-p_i \tau}. \quad (4.27)$$

Из сравнения (4.27) и (2.96) видно, что задача определения параметров p_i совпадает с задачей аппроксимации в классе экспоненциальных функций. Алгоритм ее решения был рассмотрен в § 14, и здесь мы воспользуемся полученными результатами.

¹ Последующий переход от этих величин к параметрам дифференциальной модели объекта уравнения (4.1) или его переходной функции является самостоятельной задачей.

Берем $2n$ равноотстоящих значений свободной составляющей переходной функции u_i , измеренных в моменты t_i ($i=1, 2n$). Составляем характеристическое уравнение:

$$z^n + \sum_{j=0}^{n-1} c_j z^j = 0, \quad (4.28)$$

коэффициенты которого c_j определяются из решения системы линейных уравнений

$$\sum_{j=0}^{n-1} c_j u_{j+1} = -u_{n+i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.29)$$

Решив эти уравнения, а затем уравнение (4.28), найдем n значений z_i , которые связаны с отыскиваемыми величинами p_i равенствами¹

$$p_i = \frac{1}{h} \ln z_i; \quad h = t_{i+1} - t_i \quad (4.30)$$

Подставив найденные значения p_i в (4.26), получим систему линейных уравнений относительно величин α_i . Решим ее, а величины α_i , p_i подставим в (4.25) при $t=t^*$. Получим уравнение для определения времени запаздывания τ :

$$u^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{p_i t^*} e^{-p_i \tau}. \quad (4.31)$$

Выбор величины t^* произволен. Надо только, чтобы для него была известна величина u^* .

В общем случае величину τ из этого уравнения надо определять численными методами. Начальное приближение для τ обычно известно, или его легко определить из имеющегося материала. Обозначим его τ_0 . Раскладывая экспоненты в правой части (4.31) в ряд Тейлора в окрестности точки τ_0 и ограничиваясь линейными членами разложения, получаем

$$u^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{p_i t^*} [e^{-p_i \tau_0} - p_i e^{-p_i \tau_0} (\tau - \tau_0)]. \quad (4.32)$$

Решив это уравнение относительно τ , найдем

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i e^{p_i t^*} (t^* - \tau_0) - u^*}{\sum_{i=1}^n p_i \alpha_i e^{p_i t^*} (t^* - \tau_0)}. \quad (4.33)$$

Подставляя найденную величину в (4.31), проверяем выполнение этого равенства. Если результат неудовлетворителен, то,

¹ Если z_i — комплексная величина $z_i = a + jb$, то, записав ее в показательной форме, получим $z_i = R \exp(j\varphi)$, где $R = \sqrt{a^2 + b^2}$; $\varphi = \arctg b/a$. Тогда $p_i = 1/h (\ln R + j\varphi)$.

t	$h(t)$	$u(t)$	$\hat{h}(t)$	t	$h(t)$	$u(t)$	$\hat{h}(t)$
0,35	0	-3,5	0	2,10	1,83	-1,17	1,89
0,60	0,095	-3,405	0,085	2,35	2,09	-1,41	2,133
0,85	0,325	-3,175	0,331	2,60	2,3	-1,2	2,34
1,10	0,619	-2,881	0,651	2,85	2,5	-1	2,519
1,35	0,941	-2,259	0,989	3,10	2,65	-0,85	2,67
1,60	1,26	-2,24	1,318	∞	3,5	0	3,5
1,85	1,57	-1,93	1,62				

обозначая найденное приближение t_0 по формуле (4.33), вычисляем следующее приближение для времени запаздывания. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не достигнуто удовлетворительное решение уравнения (4.31).

После того как переходная функция в виде (4.26) идентифицирована, от нее легко перейти к параметрам дифференциального уравнения системы или ее передаточной функции. Действительно, полином $A(p)$ можно вычислить по формуле (4.9). Для определения полинома $B(p)$ раскроем величины α_i согласно их определению (4.7):

$$\alpha_i = \frac{B(p_i)}{p_i A'(p_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.34)$$

Подставив сюда значения p_i , получим линейную систему уравнений для определения коэффициентов b_j в полиноме $B(p)$:

$$b_m p_i^m + b_{m-1} p_i^{m-1} + \dots + b_1 p_i = G_i, \quad i = \overline{1, n};$$

$$G_i = \alpha_i p_i A'(p_i) - b_0. \quad (4.35)$$

Если порядок полинома $B(p)$ неизвестен, то эту систему уравнений надо решать сначала при $m=0$. Если при этом значения m решения не существует, то величина m увеличивается на единицу, вновь делается попытка решить систему (4.35) и так до тех пор, пока не будет получено решение системы (4.35).

В заключение рассмотрим ситуацию, когда для повышения помехоустойчивости нашего алгоритма мы хотим использовать не $2n$, а большее число экспериментальных точек. Для этого берем $2nl$ равноотстоящих данных, разбиваем их на $2n$ групп по l измерений в каждой группе. Суммы данных в каждой группе¹ принимаем за новые измерения, проведенные с шагом $h = lh_0$, где h_0 — шаг между исходными данными.

Рассмотренные процедуры идентификации применимы для объектов как с апериодической, так и с колебательной реакцией на единичное возмущение на входе.

§ 24. Частные случаи идентификации переходных функций

В настоящем параграфе рассматриваются примеры применения изложенного алгоритма идентификации к системам различных порядков.

Объект первого порядка. Свободную составляющую переходной функции объекта первого порядка запишем в виде

$$u(t) = \alpha_1 e^{p_1(t-\tau)}. \quad (4.36)$$

¹ Если суммы выражаются большими числами, то каждую из них делим на l , другими словами, переходим к средним значениям.

Пусть значения этой функции при t_1 и t_2 равны соответственно u_1 и u_2 .

Коэффициент характеристического уравнения (4.28) в данном случае определяется из уравнения

$$u_1 c_0 = -u_2. \quad (4.37)$$

Определяем c_0 и подставляем его в характеристическое уравнение

$$z + c_0 = 0. \quad (4.38)$$

Из его решения следует

$$z_1 = u_2/u_1; \quad p_1 = 1/h \ln(u_2/u_1); \quad h = t_2 - t_1. \quad (4.39)$$

Из системы уравнений (4.26) (в нашем случае одно уравнение — первое) получаем

$$\alpha_1 = -b_0. \quad (4.40)$$

Пусть $t^* = t_1$, подставляя α_1 и p_1 в (4.35), при $t^* = t_1$ получим уравнение для определения τ :

$$u_1 = \alpha_1 e^{p_1 t} e^{p_1 \tau}. \quad (4.41)$$

Отсюда получаем

$$\tau = t_1 + \frac{1}{p_1} \ln(-b_0/u_1). \quad (4.42)$$

Объект второго порядка с апериодической реакцией. Требуется идентифицировать переходную функцию объекта по данным, приведенным в табл. 20, в предположении, что это объект второго порядка. Отождествив величину b_0 с асимптотическим значением переходной функции, получим $b_0 = 3,5$. Вычисляем значения свободной составляющей переходной функции $u(t)$. Для упрощения счета воспользуемся только четырьмя значениями $t = 0,85; 1,35; 1,85; 2,35$.

Для определения параметров p_1 и p_2 , входящих в аналитическую запись исходной функции

$$h(t) = b_0 + \alpha_1 e^{p_1(t-\tau)} + \alpha_2 e^{p_2(t-\tau)}, \quad (4.43)$$

¹ Вопрос использования большего числа измерений для идентификации был рассмотрен в § 23.

составим вспомогательное характеристическое уравнение

$$z^2 + c_1 z + c_0 = 0 \quad (4.44)$$

и систему линейных уравнений для определения c_1 и c_0

$$\begin{aligned} c_0 u_1 + c_1 u_2 &= -u_3; \\ c_0 u_2 + c_1 u_3 &= -u_4. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Из этих уравнений и уравнения связи между величинами p_i и корнями уравнения (4.44) получим

$$c_0 = \frac{u_2 u_4 - u_3^2}{u_1 u_3 - u_2^2} = 0,2774; \quad c_1 = \frac{u_2 u_3 - u_1 u_4}{u_1 u_3 - u_2^2} = -1,0984;$$

$$\begin{aligned} z_{1,2} &= -\frac{c_1}{2} \pm \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0} = 0,5492 \pm 0,1556; \\ z_1 &= 0,7047; \quad z_2 = 0,3936; \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$p_1 = \frac{1}{0,5} \ln z_1 = -0,6997; \quad p_2 = \frac{1}{0,5} \ln z_2 = -1,8648.$$

Для определения параметров α_1 и α_2 составим систему уравнений (4.26)

$$\alpha_1 + \alpha_2 = -b_0; \quad p_1 \alpha_1 + p_2 \alpha_2 = 0. \quad (4.47)$$

Решив эти уравнения, получим

$$\alpha_1 = \frac{-b_0 p_2}{p_2 - p_1} = -5,601; \quad \alpha_2 = \frac{b_0 p_1}{p_2 - p_1} = 2,101. \quad (4.48)$$

Как начальное приближение для τ выберем $\tau_0 = 0,35$, а величину t^* отождествим с $t = 0,85$. Подставив эти данные в формулу (4.32), вычислим уточненное значение τ :

$$\tau = \frac{\alpha_1 e^{0,5 p_1} + \alpha_2 e^{0,5 p_2} + 3,175}{p_1 \alpha_1 (e^{0,5 p_1} - e^{0,5 p_2})} + \tau_0 = 0,39. \quad (4.49)$$

Подставив α_i , p_i и τ в (4.32), получим

$$\alpha_1 e^{0,46 p_1} + \alpha_2 e^{0,46 p_2} - u_* = 0,006. \quad (4.50)$$

Считая достигнутую точность решения удовлетворительной, принимаем $\tau = 0,39$. В табл. 20 в столбце $\hat{h}(t)$ приведены рассчитанные по формуле (4.43) значения идентифицированной переходной функции. Для определения передаточной функции идентифицируемого объекта сначала по формуле (4.9) вычислим полином

$$A(p) = \frac{(p - p_1)(p - p_2)}{p_1 p_2} = 0,766 p^2 + 1,965 p + 1 \quad (4.51)$$

и величины

$$p_1 A'(p_1) = -0,6247; \quad p_2 A'(p_2) = 1,6652. \quad (4.52)$$

t	$h(t)$	$u(t)$	$\hat{h}(t)$	t	$h(t)$	$u(t)$	$\hat{h}(t)$
0,2	0	-4	-4	1,4	2,62	-1,38	2,624
0,4	0,06	-3,94	0,059	1,6	3,02	-0,98	3,025
0,6	0,43	-3,57	0,433	1,8	3,34	-0,66	3,339
0,8	0,98	-3,02	0,983	2,0	3,57	-0,43	3,575
1,0	1,57	-2,43	1,576	∞	4	0	4
1,2	2,13	-1,87	2,137				

Из (4.34) видно, что при $m=0$ должны выполняться равенства

$$\alpha_1 = \frac{b_0}{p_1 A'(p_1)}; \quad \alpha_2 = \frac{b_0}{p_2 A'(p_2)}. \quad (4.53)$$

Проверяя их, получаем

$$\frac{b_0}{p_1 A'(p_1)} = -5,601; \quad \frac{b_0}{p_2 A'(p_2)} = 2,101. \quad (4.54)$$

Из сравнения этих цифр со значениями α_1 и α_2 получаем, что равенства (4.52) выполняются. Следовательно, полином $B(p)$ имеет нулевой порядок, а передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{3,5}{0,766 p^2 + 1,965 p + 1}.$$

Объект второго порядка с колебательной реакцией. Требуется идентифицировать переходную функцию объекта по данным, приведенным в табл. 21, в предположении, что это объект второго порядка.

От значений $h(t)$ перейдем к значениям свободной составляющей переходной функции $u(t)$. Отбросив два первых измерения, разобьем оставшиеся значения на четыре группы. Суммируя значения в каждой группе, получаем коэффициенты системы уравнений типа (4.45) для определения параметров вспомогательного характеристического уравнения:

$$-6,59 c_0 - 4,3 c_1 = 2,36;$$

$$-4,3 c_0 - 2,36 c_1 = 1,09.$$

По формулам (4.46) находим $c_0 = 0,3$, $c_1 = -1,01$ и формулируем вспомогательное характеристическое уравнение типа (4.44). Но, так как мы работаем с усредненными данными, применим другие обозначения:

$$\omega^2 - 1,01 \omega + 0,3 = 0;$$

$$\omega_{1,2} = 0,505 \pm j 0,212 = R e^{\pm i \varphi};$$

$$R = 0,5477; \quad \varphi = 0,3975,$$

а затем по формуле (2.126) определим

$$p_1 = \frac{1}{2 \cdot 0,2} \ln \omega_1 = 2,5 \ln R + j \cdot 2,5\varphi = -1,505 + j \cdot 0,9936;$$

$$p_2 = \frac{1}{2 \cdot 0,2} \ln \omega_2 = -1,505 - j \cdot 0,9936.$$

По формуле (4.48) вычисляем

$$\alpha_1 = -4 \frac{2,5 (\ln R - j\omega)}{2,5 (-2 \cdot j\omega)} = -2 - j \frac{2,5}{\varphi} \ln R = -2 + j \cdot 3,029;$$

$$\alpha_2 = -2 - j \cdot 3,029.$$

Подставляя эти данные в (4.27), получим следующее выражение для свободной составляющей:

$$u(t) = -2e^{-1,505(t-\tau)} [2 \cos(0,994(t-\tau)) + 3,029 \sin(0,994(t-\tau))]. \quad (4.55)$$

Для определения τ потребуем совпадения аппроксимирующей и приближаемой зависимости при $t=0,8$. За начальное приближение возьмем $\tau_0=0,3$. Вычисляя значение $u(0,8)$ при $\tau=\tau_0$, получаем $u(t)=-3,017$. Считая результат удовлетворительным, остановимся на этом приближении.

Округлив коэффициенты в (4.55), получим следующее выражение для аппроксимации переходной функции:

$$\hat{h}(t) = 4 - e^{-1,5(t-0,3)} [4 \cos(t-0,3) + 6 \sin(t-0,3)].$$

Расчетные значения $\hat{h}(t)$ приведены в табл. 21.

§ 25. Идентификация дифференциальной модели на основе метода приближения по критерию совпадения моментов

В § 12 был рассмотрен критерий приближения, основанный на совпадении моментов у приближающей и приближаемой функций. Воспользуемся этим критерием для определения параметров дифференциальной модели. Основой этого критерия является известное утверждение, что равенство двух функций влечет за собой и равенство моментов этих функций. Если это простое соображение о равенстве моментов применить к любому уравнению, у которого есть правая и левая части, то легко сформулировать следующее утверждение: любой момент правой части уравнения всегда равен соответствующему моменту его левой части. На этом утверждении и базируется метод идентификации, разбираемый в настоящем параграфе.

Как и ранее (§ 12), момент функции $f(x)$, заданной на множестве Ω , относительно функции $\varphi_j(x)$ будем определять равенством

$$m_j = \int_{\Omega} \varphi_j(x) f(x) dx. \quad (4.56)$$

Следуя этому определению, равенство моментов правой и левой частей уравнения (4.1), вычисленных относительно функции $\varphi_j(t)$ на интервале $[0, T]$, запишем в виде

$$\sum_{i=0}^n a_i \int_0^T \varphi_j(t) y^{(i)}(t) dt = \sum_{i=0}^m b_i \int_0^T \varphi_j(t) x^{(i)}(t-\tau) dt, \quad a_0 = 1 \quad (4.57)$$

или в более компактной форме

$$\sum_{i=0}^n a_i m_{ij} = \sum_{i=0}^m b_i m_{ij}^*, \quad a_0 = 1;$$

$$m_{ij} = \int_0^T \varphi_j(t) y^{(i)}(t) dt;$$

$$m_{ij}^* = \int_0^T \varphi_j(t) x^{(i)}(t-\tau) dt. \quad (4.58)$$

Предположим, что мы умеем вычислять моменты m_{ij} и m_{ij}^* . Тогда, выбирая $n+m+1$ различных функций $\varphi_j(t)$, получаем линейную систему уравнений вида (4.58) относительно неизвестных параметров $a_i (i=1, n)$ и $b_i (i=0, m)$ дифференциальной модели. Поскольку решать такие системы мы умеем, основные трудности рассматриваемого метода идентификации связаны с вычислением моментов m_{ij} и m_{ij}^* . При этом если величина τ и функция $x(t)$ известны, то моменты m_{ij}^* можно вычислить с любой степенью точности. Несколько труднее вычисление момента m_{ij} . Возьмем i раз по частям интеграл, стоящий в определении момента m_{ij} . Получим

$$m_{ij} = \int_0^T \varphi_j(t) y^{(i)}(t) dt = \sum_{k=0}^{i-1} (-1)^k \frac{d^{(k)} \varphi_j(t)}{dt^k} \frac{d^{(i-k-1)} y(t)}{dt^{(i-k-1)}} \Big|_{t=0}^{t=T} + (-1)^i \int_0^T \frac{d^{(i)} \varphi_j(t)}{dt^{(i)}} \bar{y}(t) dt. \quad (4.59)$$

Если функцию $\varphi_j(t)$ или длину интегрирования совместно с условиями снятия кривой $y(t)$ выбрать так, чтобы выражение, объединяемое знаком суммы, обращалось в нуль, то процедура вычисления моментов может быть существенно упрощена. Рассмотрим различные варианты, как это можно сделать. Пусть перед подачей возмущающего воздействия объект находился в состоянии покоя, что эквивалентно выполнению условий $y^{(k)}(0)=0, k=0, n-1$, а $\varphi_j^{(k)}(t), k=0, i$ — ограниченные функции при $t \in [0, T]$. В качестве возмущающего воздействия возьмем такое, при котором величина $y(t)$ выходит на асимптотическое значение при $t \rightarrow \infty$. Тогда, если T достаточно большая вели-

чина, переходный процесс можно считать законченным и принять $y^{(k)}(T)=0$, $k=1, \dots, n$, $y(T)=y(\infty)$. Очевидно, что $y(\infty)$ также может быть равно нулю. Это зависит от формы возмущающего воздействия. Если $x(t)$ и T удовлетворяют перечисленным условиям, то все слагаемые в квадратных скобках правой части выражения (4.59), кроме, может быть, последнего, обратятся в нуль. Поэтому

$$m_{ij} = (-1)^{i-1} \frac{d^{(i-1)}\varphi_i(t)}{dt^{(i-1)}} y(t) \Big|_{t=T} + (-1)^i \int_0^T \frac{d^{(i)}\varphi_j(t)}{dt^{(i)}} y(t) dt. \quad (4.60)$$

Правую часть этого выражения уже можно вычислить для любой дифференцируемой функции $\varphi_j(t)$ на основе реализации выхода объекта $y(t)$.

Частный случай рассматриваемого метода, когда в качестве $x(t)$ выбирается единичный ступенчатый сигнал, а весовые функции $\varphi_j(t)$ отождествляются с t^j ($\varphi_0=1$), часто называют методом Симою¹. Для этого случая формулы для вычисления моментов m_{ij} и m_{ij}^* можно упростить. Так, для $j \leq 2$, полагая b_0 известной величиной, получим

$$\begin{aligned} m_{00} &= \int_0^T y(t) dt; \\ m_{10} &= \int_0^T y^{(1)}(t) dt = y(t) \Big|_0^T = y(T) - y(0) = b_0; \\ m_{i0} &= \int_0^T y^{(i)}(t) dt = y^{(i-1)}(t) \Big|_0^T = 0 \quad \text{при } i > 1; \\ m_{01} &= \int_0^T ty(t) dt; \\ m_{11} &= \int_0^T ty^{(1)}(t) dt = ty(t) \Big|_0^T - \int_0^T y(t) dt = Tb_0 - m_{00}; \\ m_{21} &= \int_0^T ty^{(2)}(t) dt = ty^{(1)}(t) \Big|_0^T - \int_0^T y^{(1)}(t) dt = -b_0; \\ m_{i1} &= \int_0^T ty^{(i)}(t) dt = -y^{(i-2)}(t) \Big|_0^T = 0 \quad \text{при } i > 2; \\ m_{02} &= \int_0^T t^2 y(t) dt. \end{aligned} \quad (4.61)$$

¹ Доказательство своего метода Симою строил при помощи аппарата преобразования Лапласа.

$$m_{12} = \int_0^T t^2 y^{(1)}(t) dt = T^2 b_0 - 2m_{01};$$

$$m_{22} = \int_0^T t^2 y^{(2)}(t) dt = -2m_{11};$$

$$m_{32} = \int_0^T t^2 y^{(3)}(t) dt = 2b_0;$$

$$m_{i2} = \int_0^T t^2 y^{(i)}(t) dt = 0 \quad \text{при } i > 3.$$

Аналогичным образом можно вычислить величины m_{ij} для произвольных значений индексов. Обобщив эти результаты, их можно представить в виде

$$m_{0j} = \int_0^T y(t) t^j dt;$$

$$m_{ij} = \begin{cases} (-1)^{j-i} \frac{j!}{(j-i+1)!} [b_0 T^{j-i+1} - (j-i+1) m_{0, j-i}], & j \geq i, \\ (-1)^{i+1} j! b_0, & j = i-1, \\ 0, & j \leq i-1. \end{cases} \quad (4.62)$$

Аналогичным образом для моментов m_{ij}^* в этом случае получим

$$m_{0j}^* = \frac{1}{j+1} [T^{j+1} - \tau^{j+1}];$$

$$m_{ij}^* = \begin{cases} (-1)^{i+1} \frac{\tau^{j-i+1}}{j(j-1) \dots (j-i+1)}, & j > i-1, \\ 0, & j \leq i-1. \end{cases} \quad (4.63)$$

К недостаткам рассмотренного метода следует отнести необходимость предварительного определения времени задержки τ и трудоемкость вычисления моментов m_{ij} . Поскольку переходная характеристика обычно задана в виде таблицы, интегралы при расчете моментов приходится брать численно. А это приводит к ошибкам вычислений, возрастающих с увеличением порядков оцениваемых моментов. Поэтому при использовании этого метода идентификации следует обращать внимание на точность применяемых процедур численного интегрирования.

Привести общие формулы для вычисления моментов m_{ij} к виду (4.60) можно еще путем специального выбора весовых функций $\varphi_j(t)$. Пусть эти функции таковы, что их значения и все их производные до $(n-1)$ -го порядка включительно в моменты времени $t=0$ и $t=T$ обращаются в нуль. Метод идентификации, основанный на вычислении моментов относительно таких функций, называется методом моделирующих функций.

Примером моделирующей функции может быть функция вида

$$\varphi(t) = A(t) e^{\frac{B(t)}{t(T-t)}}, \quad (4.64)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ — непрерывные функции на интервале $[0, T]$, при этом $B(0) < 0$, $B(T) < 0$. В частном случае, полагая $B(t) = -1$, а $A(t) = t^i$, получим

$$\varphi(t) = t^i e^{-\frac{1}{t(T-t)}}. \quad (4.65)$$

Метод моделирующих функций, очевидно, будет иметь те же недостатки, что и метод Симою.

§ 26. Идентификация импульсной переходной функции на основе метода корреляционных функций

В отличие от рассмотренных методов идентификации этот метод основан не на детерминированном, а на случайном возмущающем сигнале $x(t)$. Рассмотрим случай, когда $x(t)$ является белым шумом (т. е. некоррелированным случайным процессом, имеющим бесконечный и равномерный спектр частот и нулевое математическое ожидание). Хотя в реальных условиях реализовать такой сигнал невозможно, для него можно подобрать подходящую аппроксимацию, пригодную для идентификации по методу корреляционных функций. Если при этом амплитуда тестового сигнала $x(t)$ будет небольшой, его можно наложить на рабочий входной сигнал объекта и проводить исследования в условиях, приближенных к условиям нормальной эксплуатации объекта.

Для вычисления корреляционных функций $R_{y,x}(\theta)$ и $R_{x,x}(\theta)$, которые определяются равенствами

$$R_{yx}(\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y'(t) x(t-\theta) dt; \quad (4.66)$$

$$R_{xx}(\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) x(t-\theta) dt, \quad (4.67)$$

требуется обработка входного и выходного сигнала на большом (теоретически бесконечном) отрезке времени. Поэтому в методе корреляционных функций процессы предполагаются стационарными.

Если $w(t)$ — импульсная переходная функция объекта (см. § 25), ее выход $y(t)$ связан со входом $x(t)$ следующим интегралом свертки:

$$y(t) = \int_0^{\infty} w(\theta) x(t-\theta) d\theta. \quad (4.68)$$

Заменяя в (4.66) $y(t)$ на основании этого равенства, получаем

$$R_{yx}(\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left[x(t-\theta) \int_0^{\infty} w(\tau) x(t-\tau) d\tau \right] dt. \quad (4.69)$$

Поскольку t и θ не зависят от τ , меняя порядок интегрирования, получаем

$$R_{yx}(\theta) = \int_0^{\infty} w(\tau) \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t-\theta) x(t-\tau) dt \right] d\tau. \quad (4.70)$$

Согласно определению автокорреляционной функции R_{xx} , выражение в квадратных скобках можно привести к виду

$$\begin{aligned} & \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t-\theta) x(t-\tau) dt = \\ & = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t') x(t'-\theta') dt' = R_{xx}(\theta') = R_{xx}(\theta-\tau), \\ & t' = t-\tau, \quad \theta' = \theta-\tau. \end{aligned} \quad (4.71)$$

Заменяя выражение в квадратных скобках в (4.70) на основании этого равенства, получаем

$$R_{yx}(\theta) = \int_0^{\infty} w(\tau) R_{xx}(\theta-\tau) d\tau. \quad (4.72)$$

Таким образом, взаимную корреляционную функцию $R_{yx}(\theta)$ можно рассматривать как реакцию объекта с импульсной переходной функцией $w(\tau)$, если на его вход подан возмущающий сигнал в виде автокорреляционной функции $R_{xx}(\theta)$.

Пусть входной сигнал $x(t)$ — белый шум. В силу некоррелированности соседних значений его автокорреляционная функция является дельта-функцией:

$$R_{xx}(\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) x(t-\theta) dt = \delta(\theta). \quad (4.73)$$

Подставляя (4.73) в (4.72), получаем, что взаимная корреляционная функция в этом случае

$$R_{yx}(\theta) = \int_0^{\infty} w(\tau) \delta(\theta-\tau) d\tau = w(\tau). \quad (4.74)$$

Таким образом, при подаче на вход объекта белого шума взаимная корреляционная функция совпадает с его импульсной переходной функцией.

Практически реализовать возмущающий сигнал в виде белого шума не представляется возможным, но создавать такой сигнал и не надо. Из (4.72) видно, что если основное значение автокорреляционной функции сосредоточено на интер-

вале $[-\varepsilon, \varepsilon]$, на котором функция $\omega(\tau)$ почти постоянна, равенство (4.72) приближенно можно написать в виде

$$R_{yx}(\theta) \approx \int_{\theta-\varepsilon}^{\theta+\varepsilon} \omega(\tau) R_{xx}(\theta-\tau) d\tau \approx \omega(\theta) \int_{\theta-\varepsilon}^{\theta+\varepsilon} R_{xx}(\theta-\tau) d\tau = \omega(\theta) A,$$

$$A = \int_{\theta-\varepsilon}^{\theta+\varepsilon} R_{xx}(\theta-\tau) d\tau = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} R_{xx}(\xi) d\xi, \quad (4.75)$$

где A — нормировочная константа.

Таким образом, для идентификации реальных объектов вместо идеализированного случайного процесса — белого шума можно обойтись случайным процессом, автокорреляционная функция которого сосредоточена на интервале такой длины, что импульсную переходную функцию на любом таком интервале можно считать практически постоянной. Описание методов формирования таких сигналов можно найти в [11].

§ 27. Идентификация параметров дифференциальной модели на основе регрессионных методов

В основе этих методов лежит переход от непрерывной дифференциальной модели в виде (4.1) к конечно-разностной аппроксимации производных.

Выбирая достаточно малый интервал времени h , заменяем производную $dy(t)/dt$ согласно правилу

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y(t) - y(t-h)}{h} = \frac{(1-\Delta)y(t)}{h}, \quad (4.76)$$

где Δ — оператор сдвига.

Аналогичным образом для следующих производных

$$\frac{d^2y}{dt^2} \approx \frac{y'(t) - y'(t-h)}{h} = \frac{1}{h} \left[\frac{(1-\Delta)y(t)}{h} - \frac{(1-\Delta)y(t-h)}{h} \right] =$$

$$= \frac{1}{h} (1-\Delta) \frac{y(t) - y(t-h)}{h} = \frac{(1-\Delta)^2 y(t)}{h^2};$$

$$\frac{d^3y}{dt^3} = \frac{y''(t) - y''(t-h)}{h} = \frac{(1-\Delta)^2}{h^2} \left[\frac{y(t) - y(t-h)}{h} \right] =$$

$$= \frac{(1-\Delta)^3 y(t)}{h^3};$$

.....

$$\frac{d^{(n)}y}{dt^n} = \frac{(1-\Delta)^n y(t)}{h^n}.$$

Заменяя на основании этих соотношений производные в левой части (4.1), приведем ее к виду

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) =$$

$$= a_n \frac{(1-\Delta)^n y(t)}{h^n} + \dots + a_1 \frac{(1-\Delta)y(t)}{h} + y(t) =$$

$$= [\alpha_n \Delta^n + \alpha_{n-1} \Delta^{n-1} + \dots + \alpha_1 \Delta + \alpha_0] y(t);$$

$$\alpha_n = (-1)^n \frac{a_n}{h^n}; \quad (4.78)$$

$$\alpha_{n-1} = (-1)^{n-1} \frac{a_n}{h^n} C_n^1 + (-1)^{n-2} \frac{a_{n-1}}{h^{n-1}};$$

$$\alpha_0 = \frac{a_n}{h^n} + \frac{a_{n-1}}{h^{n-1}} + \dots + \frac{a_1}{h} + 1.$$

Делая аналогичную аппроксимацию правой части уравнения (4.1) и полагая, что время запаздывания τ является кратной величиной выбранного шага дискретности h и равно $\tau = kh$, получаем

$$b_m \frac{d^m x(t-\tau)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t-\tau)}{dt^{m-1}} + \dots$$

$$+ b_1 \frac{dx(t-\tau)}{dt} + b_0 x(t-\tau) = \Delta^k [\beta_m \Delta^m + \beta_{m-1} \Delta^{m-1} + \dots$$

$$+ \beta_1 \Delta + \beta_0] x(t);$$

$$\beta_1 = (-1)^m \frac{b_m}{h^m};$$

$$\beta_2 = (-1)^{m-1} \frac{b_m}{h^m} C_m^1 + (-1)^{m-2} \frac{b_{m-1}}{h^{m-1}}; \quad (4.79)$$

$$\beta_0 = \frac{b_m}{h^m} + \frac{b_{m-1}}{h^{m-1}} + \dots + \frac{b_1}{h} + b_0.$$

Таким образом, дискретный аналог исходной дифференциальной модели можно записать в виде

$$(\alpha_n \Delta^n + \alpha_{n-1} \Delta^{n-1} + \dots + \alpha_1 \Delta + \alpha_0) y(t) =$$

$$= \Delta^k (\beta_m \Delta^m + \beta_{m-1} \Delta^{m-1} + \dots + \beta_1 \Delta + \beta_0) x(t). \quad (4.80)$$

Если в нашем распоряжении есть реализации $y(t)$ и $x(t)$, из которых можно составить N конечно-разностных уравнений вида (4.80) при условии $N \geq n+m+2$, то, решая эти уравнения

в общем случае по методу наименьших квадратов, мы определим коэффициенты α_i ($i=0, n$) и β_j ($j=0, m$). Затем из определения α_i и β_j в виде (4.78) и (4.79) найдем оценки для параметров дифференциальной модели. Чтобы проследить связи величин α_i и β_j с корреляционными функциями, рассмотрим простой пример, когда конечно-разностная модель имеет вид

$$(\alpha_2 \Delta^2 + \alpha_1 \Delta + \alpha_0) y(t) = b_0 \Delta^k x(t). \quad (4.81)$$

Выбирая значения t , кратные величине h , запишем следующую систему уравнений для определения параметров этой модели:

$$\alpha_2 y_{i-2} + \alpha_1 y_{i-1} + \alpha_0 y_i - b_0 x_{i-k} = -y_i, \\ i = \overline{1, N},$$

где

$$y_{i-j} = y((i-j)h); \quad \alpha'_0 = \alpha_0 - 1. \quad (4.82)$$

Для решения этой системы по методу наименьших квадратов, построим систему нормальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N y_{i-2}^2 & \sum_{i=1}^N y_{i-2} y_{i-1} & \sum_{i=1}^N y_{i-2} y_i & \sum_{i=1}^N y_{i-2} x_{i-k} \\ \sum_{i=1}^N y_{i-1} y_{i-2} & \sum_{i=1}^N y_{i-1}^2 & \sum_{i=1}^N y_{i-1} y_i & \sum_{i=1}^N y_{i-1} x_{i-k} \\ \sum_{i=1}^N y_{i-2} y_i & \sum_{i=1}^N y_{i-1} y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i x_{i-k} \\ \sum_{i=1}^N y_{i-2} x_{i-k} & \sum_{i=1}^N y_{i-1} x_{i-k} & \sum_{i=1}^N y_i x_{i-k} & \sum_{i=1}^N x_{i-k}^2 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_1 \\ \alpha'_0 \\ -b_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^N y_{i-2} y_i \\ -\sum_{i=1}^N y_{i-2} y_i \\ -\sum_{i=1}^N y_i^2 \\ -\sum_{i=1}^N x_{i-k} y_i \end{pmatrix}. \quad (4.83)$$

Если $x(t)$ и $y(t)$ являются реализациями стационарного случайного процесса, а N достаточно велико, то элементы мат-

рицы нормальных уравнений будут пропорциональны значениям автокорреляционной и взаимокорреляционной функциям. Действительно, так как по определению

$$R_{yy}(h) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T y(t) y(t-h) dt \approx \\ \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(ih) y((i-1)h); \\ R_{yx}(h) \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y((i-1)h) x(ih), \quad (4.84)$$

то, разделив каждое уравнение системы (4.83) на N , запишем ее в виде

$$\begin{pmatrix} R_{yy}(0) & R_{yy}(h) & R_{yy}(2h) & R_{yx}((k-2)h) \\ R_{yy}(h) & R_{yy}(0) & R_{yy}(h) & R_{yx}((k-1)h) \\ R_{yy}(2h) & R_{yy}(h) & R_{yy}(0) & R_{yx}(kh) \\ R_{yx}((k-2)h) & R_{yx}((k-1)h) & R_{yx}(kh) & R_{xx}(kh) \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha'_0 \\ -b_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_{yy}(2h) \\ -R_{yy}(h) \\ -R_{yy}(0) \\ R_{yx}(kh) \end{pmatrix}. \quad (4.85)$$

Последующая процедура определения параметров модели очевидна.

ГЛАВА 5.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

§ 28. Аналитические модели в задачах автоматического регулирования и оптимизации

Решение любой задачи автоматизации и оптимизации технологического процесса начинается с его теоретического и экспериментального изучения с целью построения адекватной математической модели. Процедуру построения модели можно разделить на три последовательных этапа. На первом из них определяется допустимый параметрический класс моделей, на втором — проводится идентификация параметров, а на третьем — оценивается адекватность построенной модели.

Логически самым трудным является первый этап. Существуют два принципиально различных подхода к его выполне-

нию. Первый из них базируется на концепции «черного ящика», т. е. постулируется, что внутренняя структура объекта неизвестна, да и вообще не должна интересовать исследователя. Вся информация получается только в результате наблюдений за объектом при пассивном и активном экспериментах.

Допустимые классы моделей в этом случае обычно выбираются в виде линейных, относительно идентифицируемых параметров, рядов по какой-либо удобной системе функций. Получаемые таким образом модели будем называть эмпирическими.

Второй подход основан на выборе моделей с учетом основных физико-химических закономерностей, определяющих течение исследуемого процесса. Такие модели будем называть аналитическими моделями процесса. Поскольку эти модели обычно строятся при некоторых упрощающих предположениях, то они определяют процесс с точностью до группы параметров, значения которых зависят от конкретной его реализации.

В соответствии с названиями моделей, на которых строятся последующие методы управления и оптимизации технологических процессов, назовем их эмпирическими и аналитическими. Между ними существуют принципиальные различия как по их информативности, так и по области применения.

Аналитические модели и методы обычно используются на стадии проектирования технологического процесса для его расчета, оценки допустимой области изменения технологических параметров, разработки структурных схем взаимосвязанного регулирования, а также для выявления причин низкой эффективности действующих установок, обусловливаемых какими-либо конструктивными недоработками.

Эмпирические методы приспособлены только для автоматизации и оптимизации конкретных действующих установок.

Аналитические методы позволяют проводить идеализированную оптимизацию процесса и оценивать потенциальные возможности процесса без учета его конструктивной реализации. Эмпирические методы позволяют осуществить только условную оптимизацию, определяемую конструкцией установки. При этом они не дают возможности оценить, насколько далек найденный оптимум от потенциально возможного для этого процесса. В то же время аналитические методы легко решают последнюю задачу путем сравнения потенциальных возможностей процесса с данными его реальной эксплуатации.

Общность аналитических методов по сравнению с эмпирическими и фундаментальность результатов, получаемых с их помощью, не даются даром. Они гораздо сложнее эмпирических методов. Причем существенные трудности возникают уже на этапе построения аналитических моделей.

Построение любой математической модели, обеспечивающей удовлетворительное предсказание поведения исследуемого процесса, всегда является трудной задачей. Однако если для опи-

сания объекта в виде «черного ящика» часто можно обойтись довольно узкими разделами знаний из области статистики и теории автоматического регулирования, то для создания аналитических моделей требуется привлечение более разнообразного математического аппарата и знаний из различных областей физики, химии, гидродинамики и т. д.

В то же время все эти трудности полностью окупаются той огромной информационной емкостью и прогностической силой, которой обладают аналитические модели.

В настоящей главе рассматриваются основные физические законы, лежащие в основе построения таких моделей для процессов добычи, сбора и подготовки нефти и газа. Модели конкретных процессов рассматриваются в следующей главе.

§ 29. Общие принципы построения аналитических моделей

Основная технология нефтегазодобывающей промышленности базируется на физических процессах, элементарными составляющими которых являются:

- 1) механические процессы (механическая обработка твердых материалов, в частности разрушение породы при бурении);
- 2) гидродинамические процессы (транспорт жидкости и газа, разделение жидкостных и газовых дисперсных систем);
- 3) тепловые процессы (нагревание и охлаждение);
- 4) массообменные процессы (абсорбция-десорбция, испарение и конденсация, растворение и кристаллизация, экстракционные процессы и т. д.).

Закономерности протекания всех этих процессов тесно связаны с условиями движения среды, в которой они происходят и которые, в свою очередь, определяются законами гидродинамики (газодинамики).

Последние три группы процессов объединяет еще то, что они базируются на элементарных процессах переноса вещества и энергии между отдельными частями системы. Закономерности такого переноса носят название термодинамических.

Таким образом, за исключением группы механических процессов, общей теоретической основой для моделирования большей части технологических процессов в нефтегазодобывающей промышленности являются гидро- и термодинамика.

Изучение механических процессов первой группы базируется на законах теории упругости и механики твердого тела.

Общность научных основ элементарных стадий технологических процессов определяет и общность принципов их анализа и последующего построения допустимого класса их моделей.

Сначала анализируются физические основы процесса в целом и отдельные его звенья. Сложные процессы разделяются на элементарные составляющие. Для последних строятся качественные описания их течения и прослеживается логическая взаимосвязь этих описаний для выявления возможных ошибок

в исходных предположениях. Если подобных не обнаружено, то на основе законов сохранения и переноса вещества и энергии строятся полные системы уравнений (дифференциальных, интегральных, алгебраических и т. д.), которые и определяют количественное задание допустимого класса моделей для последующей идентификации.

Прежде чем приступить к построению (или анализу готовой) аналитической модели технологического процесса, необходимо иметь четкие представления об основных законах сохранения и переноса вещества и энергии и знать их математические формулировки.

§ 30. Закон сохранения массы

Этот основной закон классической механики гласит: масса любой части материальной системы, находящейся в движении, не зависит от времени и является величиной постоянной. Поскольку скорость изменения постоянной величины равна нулю, полная производная по времени от массы любой части рассматриваемой системы будет также равна нулю. Математически это утверждение запишем в виде

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho(\mathbf{X}) dV = 0, \quad (5.1)$$

где $\rho(\mathbf{X})$ — плотность вещества; $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3)$ — координаты точки Евклидова пространства; Ω — произвольный объем системы; $dV = dx_1 dx_2 dx_3$ — дифференциал объема. Равенство (5.1) называют интегральной формой закона сохранения массы. Для решения задач гидро- и газодинамики гораздо удобнее другая форма записи закона сохранения, которую можно получить из (5.1) при помощи тождественных преобразований.

Сначала вспомним, что движение системы можно задавать тремя функциями

$$x_i = g_i(x_1^0, x_2^0, x_3^0), \quad i = 1, 2, 3, \quad (5.2)$$

определяющими в момент t координаты той точки, которая при $t = t_0$ занимала положение (x_1^0, x_2^0, x_3^0) .

По определению, зависимости (5.2) обладают свойством взаимной однозначности, что позволяет в любой момент выразить начальные координаты x_i^0 через текущие. Другими словами, система уравнений (5.2) имеет единственное решение относительно x_i^0 , которое можно записать в виде

$$x_i^0 = h_i(x_1, x_2, x_3, t). \quad (5.3)$$

Обозначим Ω^0 исходное множество точек, которое занимало Ω в (5.1) при $t = t_0$ и перейдем от координат x_1, x_2, x_3 к коорди-

натам x_1^0, x_2^0, x_3^0 путем замены переменных по правилу (5.2). Получим

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho(x_1, x_2, x_3) dV = \frac{d}{dt} \int_{\Omega^{(0)}} \rho(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}) J dV, \quad (5.4)$$

где J — якобиан преобразования, который равен определителю матрицы вида

$$J = \frac{D(x_1, x_2, x_3)}{D(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial x_1^{(0)}} & \frac{\partial x_1}{\partial x_2^{(0)}} & \frac{\partial x_1}{\partial x_3^{(0)}} \\ \frac{\partial x_2}{\partial x_1^{(0)}} & \frac{\partial x_2}{\partial x_2^{(0)}} & \frac{\partial x_2}{\partial x_3^{(0)}} \\ \frac{\partial x_3}{\partial x_1^{(0)}} & \frac{\partial x_3}{\partial x_2^{(0)}} & \frac{\partial x_3}{\partial x_3^{(0)}} \end{vmatrix}, \quad (5.5)$$

где

$$\frac{\partial x_i}{\partial x_j^{(0)}} = \frac{\partial g_j(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})}{\partial x_j^{(0)}}, \quad j, i = 1, 2, 3.$$

Внося в правой части (5.4) знак дифференциала под интеграл, а затем делая обратный переход от переменных $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}$ к переменным x_1, x_2, x_3 получаем¹

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\Omega^{(0)}} J \rho(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}) dV &= \int_{\Omega^{(0)}} \frac{d}{dt} [J \rho(x^{(0)})] dV = \\ &= \int_{\Omega} \frac{1}{J} \frac{d}{dt} [J \rho(x)] dV = \int_{\Omega} \frac{1}{J} \left[J \frac{d\rho}{dt} + \frac{dJ}{dt} \rho \right] dV. \end{aligned} \quad (5.6)$$

По правилу дифференцирования определителей, которое следует из теоремы о дифференцировании сложной функции, получим

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dt} &= \frac{D(u_1, x_2, x_3)}{D(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})} + \frac{D(x_1, u_2, x_3)}{D(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})} + \\ &+ \frac{D(x_1, x_2, u_3)}{D(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})}, \quad u_i = \frac{dx_i}{dt}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Из равенства (5.7) и определения якобиана непосредственно следует

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{dJ}{dt} &= \frac{D(u_1, x_2, x_3)}{D(x_1, x_2, x_3)} + \frac{D(x_1, u_2, x_3)}{D(x_1, x_2, x_3)} + \frac{D(x_1, x_2, u_3)}{D(x_1, x_2, x_3)} = \\ &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \equiv \text{div } \mathbf{U}, \quad \mathbf{U} = (u_1, u_2, u_3). \end{aligned} \quad (5.8)$$

¹ Если якобиан преобразования к новым переменным J , то якобиан обратного преобразования (от новых переменных к старым) всегда равен $1/J$.

С учетом этого равенства уравнение (5.6) приведем к виду

$$\int_{\Omega} \left(\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{U} \right) dV = 0. \quad (5.9)$$

Раскрывая полную производную по времени в подынтегральном выражении по правилу

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_1} u_1 + \frac{\partial \rho}{\partial x_2} u_2 + \frac{\partial \rho}{\partial x_3} u_3, \quad (5.10)$$

$$u_i = \frac{dx_i}{dt},$$

приведем (5.9) к виду¹

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{U}) \right] dV = 0. \quad (5.11)$$

В силу произвольности выбора множества Ω из (5.9) следует, что подынтегральное выражение должно быть равно нулю, т. е.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{U}) = 0. \quad (5.12)$$

Эта форма записи закона сохранения массы называется дифференциальной. В механике сплошных сред уравнение (5.12) обычно называют уравнением неразрывности. Для одномерного течения жидкости (или газа) уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (u_1 \rho)}{\partial x_1} = 0. \quad (5.13)$$

Для несжимаемых сред, для которых величина ρ не зависит от времени и постоянна, в уравнении неразрывности (5.12) пропадает производная от плотности по времени, поэтому

$$\operatorname{div} \mathbf{U} = 0. \quad (5.14)$$

§ 31. Закон сохранения количества движения

Этот закон классической механики гласит: скорость изменения количества движения любой части материальной системы, находящейся в движении, равна сумме всех внешних

¹ Полученный результат можно обобщить и сформулировать в виде следующего правила взятия полной производной от интеграла по объему. Если функция R определяется равенством

$$R = \int_{\Omega} \varphi(x_1, x_2, x_3) dV,$$

где Ω — движущаяся область, то

$$\frac{dR}{dt} = \int_{\Omega} [\partial \varphi / \partial t + \operatorname{div} (\varphi \mathbf{U})] dV.$$

сил. Количество движения элемента системы массы m , движущегося со скоростью \mathbf{U} , есть вектор $m\mathbf{U}$.

В математической формулировке закон сохранения количества движения некоторого объема Ω движущейся системы, на который действует сумма внешних сил \mathbf{F} , можно записать в виде уравнения

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} (\rho \mathbf{U}) dV = \mathbf{F}. \quad (5.15)$$

Разделим внешние силы на две группы. К первой из них, сумму которой обозначим \mathbf{F}_V , отнесем силы, обусловленные внешними силовыми полями (гравитационным, электрическим, магнитным) и действующие на единицу массы объема Ω . Во вторую группу объединим силы, действующие на единицу поверхности объема Ω , и обозначим их сумму \mathbf{F}_S . Согласно этому делению величину \mathbf{F} в (5.15) запишем в виде

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega} \mathbf{F}_V dV + \int_S \mathbf{F}_S dS. \quad (5.16)$$

Подставив (5.16) в (5.15), получим интегральную форму записи закона сохранения количества движения:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} (\rho \mathbf{U}) dV = \int_{\Omega} \mathbf{F}_V dV + \int_S \mathbf{F}_S dS. \quad (5.17)$$

Это векторное уравнение эквивалентно системе из трех скалярных уравнений, отражающих закон сохранения количества движения по каждой из координат x_1 , x_2 и x_3 :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} (\rho u_i) dV = \int_{\Omega} \mathbf{F}_{V_i} dV + \int_S \mathbf{F}_{S_i} dS,$$

$$u_i = \frac{dx_i}{dt}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5.18)$$

Пользуясь правилами дифференцирования интеграла, взятого по изменяющемуся объему (см. § 30), и объединяя первые два слагаемых в (5.18), получаем

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho u_i \mathbf{U}) - \mathbf{F}_{V_i} \right] dV = \int_S \mathbf{F}_{S_i} dS. \quad (5.19)$$

Если воспользоваться теоремой Остроградского — Гаусса для преобразования интеграла по поверхности в (5.19) в интеграл по объему, то от интегральной формы записи закона сохране-

ния количества движения можно перейти к дифференциальной форме записи. Действительно, учитывая, что

$$\int_S \mathbf{F}_{S_i} dS = \int_{\Omega} \operatorname{div} \mathbf{F}_{S_i} dV, \quad (5.20)$$

приведем (5.19) к виду

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_i \mathbf{U}) - \mathbf{F}_{V_i} - \operatorname{div} \mathbf{F}_{S_i} \right] dV = 0. \quad (5.21)$$

Поскольку это равенство справедливо при произвольном объеме, подынтегральное выражение в (5.21) должно быть равно нулю, т. е.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_i \mathbf{U}) = \mathbf{F}_{V_i} + \operatorname{div} \mathbf{F}_{S_i}. \quad (5.22)$$

Это и есть дифференциальная форма записи закона сохранения количества движения.

Для одномерного случая, когда все составляющие сил и скоростей по всем направлениям, кроме оси x_1 , равны нулю, уравнения (5.11) и (5.22) преобразуются к виду

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial(\rho u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1^2)}{\partial x_1} - \mathbf{F}_{V_1} \right] dV = \int_S \mathbf{F}_{S_1} dS; \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial(\rho u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1^2)}{\partial x_1} = \mathbf{F}_{V_1} + \frac{\partial \mathbf{F}_{S_1}}{\partial x_1}. \quad (5.24)$$

Пример расшифровки обозначений поверхностных и объемных сил в полученных уравнениях дан в гл. 6 при построении модели линейной части трубопровода.

§ 32. Закон переноса массы и энергии

Обозначим $C(\mathbf{X}, t)$ распределение концентрации некоторого вещества в непрерывной движущейся среде. Мысленно выделим некоторый объем среды Ω и запишем для него уравнение баланса количества вещества. Общее количество вещества в этом объеме в любой момент t будет

$$M_{\Omega}(t) = \int_{\Omega} C(\mathbf{X}, t) dV, \quad \mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3). \quad (5.25)$$

Скорость изменения величины M , которая определяется полной производной dM_{Ω}/dt , будет равна изменению количества вещества в объеме Ω в единицу времени, обусловленного различными стоками и источниками вещества, расположенными в этом объеме. Поэтому можно записать

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} C(\mathbf{X}, t) dV = \int_{\Omega} j(\mathbf{X}, t) dV. \quad (5.26)$$

Разделим все источники и стоки вещества на две группы. В первую из них объединим поверхностные источники¹, интенсивность которых обозначим $j_S(\mathbf{X}, t)$, а во вторую — объемные источники, интенсивность которых обозначим $j_V(\mathbf{X}, t)$. Учитывая такое деление в (5.26), получаем

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} C(\mathbf{X}, t) dV = \int_{\Omega} j_V(\mathbf{X}, t) dV + \int_S j_S(\mathbf{X}, t) dS. \quad (5.27)$$

Нетрудно заметить, что само понятие вещества никоим образом не использовалось при выводе уравнения (5.27). Использовалось только свойство аддитивности количества вещества, которое позволило нам считать, что полное количество вещества в некотором объеме равно сумме количеств вещества в его частях². Поэтому если вместо вещества взять любую другую физическую субстанцию, обладающую свойством аддитивности, то для нее уравнение баланса также будет иметь вид (5.27).

Исходя из этих соображений по аналогии с (5.27) запишем уравнение баланса для количества тепла в объеме Ω :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} Q(\mathbf{X}, t) dV = \int_{\Omega} q_V(\mathbf{X}, t) dV + \int_S q_S(\mathbf{X}, t) dS. \quad (5.28)$$

Здесь $Q(\mathbf{X}, t)$ — распределение тепла в пространстве; $q_V(\mathbf{X}, t)$ и $q_S(\mathbf{X}, t)$ — интенсивности соответственно объемных и поверхностных источников тепла в пространстве Ω . Величина $Q(\mathbf{X}, t)$, численно равная количеству тепла в единице объема пространства, является функцией температуры T , плотности ρ и удельной теплоемкости C_p :

$$Q(x, t) = C_p \rho T. \quad (5.29)$$

Раскрывая производные в правых частях уравнений (5.27) и (5.28) по правилу, разобранным в § 30, и преобразуя интегралы по поверхности в интегралы по объему, получаем

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(C\mathbf{U}) - j_V - \operatorname{div} j_S \right] dV = 0; \quad (5.30)$$

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \operatorname{div}(Q\mathbf{U}) - q_V - \operatorname{div} q_S \right] dV = 0. \quad (5.31)$$

Здесь \mathbf{U} — скорость движения среды.

¹ В дальнейшем будем полагать, что сток вещества или какой-либо иной субстанции отличается от истока только знаком перед интенсивностью.

² Примером неаддитивного свойства может служить радиус капли жидкости. Пусть имеются две капли объемами V_1 и V_2 с массами m_1 и m_2 и радиусами R_1 и R_2 . После слияния этих капель образуется новая капля с объемом $V_1 + V_2$, массой $m_1 + m_2$ и радиусом $(\frac{3}{4}\pi)^{1/3}(R_1^3 + R_2^3)^{1/3}$. Отсюда видно, что параметры объема и массы капли обладают свойством аддитивности, в то время как ее радиус не является аддитивным параметром.

В силу произвольности выбора объема интегрирования подынтегральные выражения в этих уравнениях должны быть равны нулю, т. е.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(CU) = j_V + \operatorname{div} j_S, \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \operatorname{div}(QU) = q_V + \operatorname{div} q_S. \quad (5.33)$$

Чтобы раскрыть правые части этих уравнений, необходимо вскрыть природу входящих туда интенсивностей объемных и поверхностных источников. Сделаем это на примере некоторой химической реакции между веществами A_1 и A_2 , протекающей по правилу



где B — продукт реакции.

Пусть C в (5.32) означает концентрацию вещества B . Тогда можно считать, что в любой точке пространства Ω это вещество может пропадать и появляться вновь за счет химической реакции. Кроме того, внутри Ω могут находиться «трубки», по которым подводится и отводится это вещество. Совокупность этих механизмов и определяет интенсивность объемных источников j_V .

Аналогичный механизм справедлив и для объяснения природы объемных источников тепла в (5.33).

Совсем другой механизм у поверхностных источников. Экспериментально было установлено что перенос вещества и энергии в однородной неподвижной среде обусловлен беспорядочным тепловым движением микрочастиц и что движущей силой для него является разность концентраций и температур в отдельных точках системы. Математически эти результаты формулируются в виде закона диффузии Фика¹

$$j_S = -D \operatorname{grad} C \quad (5.35)$$

и закона теплопроводности Фурье

$$q_S = -\alpha \operatorname{grad} T, \quad (5.36)$$

где j_S и q_S — потоки вещества и тепла, отнесенные к единице поверхности; D и α — коэффициенты пропорциональности, называемые соответственно коэффициентами диффузии и теплопроводности.

¹ Градиент скалярной функции $f(x)$ есть вектор и вычисляется по правилу

$$\operatorname{grad} f(x) = i \frac{\partial f}{\partial x_1} + j \frac{\partial f}{\partial x_2} + k \frac{\partial f}{\partial x_3}.$$

Заменив в (5.32) и (5.33) величины Q , j_S и q_S на основании соотношений (5.29), (5.35), (5.36), получим¹

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(CU) = -\operatorname{div}(D \operatorname{grad} C) + j_V; \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(TU) = -\frac{1}{\rho C_p} \operatorname{div}(\alpha \operatorname{grad} T) + q_V. \quad (5.38)$$

Первое из этих уравнений называется уравнением диффузии, второе — уравнением теплопроводности.

Для случая, когда среда несжимаема, т. е. $\partial U / \partial x_i = 0$, коэффициенты D и α постоянны, а $j_V = q_V = 0$, уравнения (5.37) и (5.35) можно упростить и привести к виду

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \operatorname{grad} C = -D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x_3^2} \right); \quad (5.39)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U}{\rho C_p} \operatorname{grad} T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right). \quad (5.40)$$

Следует обратить внимание как на общность вывода, так и на совпадение вида результирующих уравнений, соответствующих законам переноса массы и энергии.

§ 33. Закон сохранения энергии

Закон сохранения энергии, который еще называют первым законом термодинамики, гласит: при бесконечно малом подводе тепла δQ к изолированной системе и совершении этой системой бесконечно малой работы δA энергия системы изменяется на величину

$$dE = \delta Q - \delta A. \quad (5.41)$$

Следует обратить внимание на разный смысл используемых здесь обозначений dF и δF . Первое из них соответствует полному дифференциалу и, если $F = F(x, y)$, то $dF = (\partial F / \partial x) dx + (\partial F / \partial y) dy$, а второе показывает бесконечно малую величину, раскрыть которую как полный дифференциал нельзя.

Выражение величин δQ и δA через другие параметры системы, такие как объем, давление, температура и т. д., в общем случае существенно зависит от особенностей рассматриваемой системы и от того, насколько далека она от состояния равновесия.

¹ Операторные выражения в правых частях уравнений (5.37) и (5.38) раскрываются по правилу

$$\operatorname{div} D(\operatorname{grad} C) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_3} \right).$$

В бесконечно малой окрестности точки равновесия справедливо равенство

$$\delta Q = TdS; \quad \delta A = pdV, \quad (5.42)$$

где T , S , p , V — соответственно температура, энтропия, давление и объем системы.

Подставив (5.42) в (5.41), получим следующее выражение закона сохранения энергии:

$$dE = TdS - pdV. \quad (5.43)$$

Для количественного описания энергетического состояния в технологических системах вместо внутренней энергии E используют и другие термодинамические функции, такие как энтальпия

$$H = E + pV \quad (5.44)$$

и энергия Гиббса

$$G = H - TS. \quad (5.45)$$

В соответствии с уравнениями (5.43)–(5.45) приращения величин H и G в окрестности точки равновесия будут иметь вид

$$\begin{aligned} dH &= dE + pdV + Vdp = TdS + Vdp; \\ dG &= dH - TdS - SdT = Vdp - SdT. \end{aligned} \quad (5.46)$$

Термодинамические функции E , H и G характеризуют состояние системы, и их дифференциалы можно выразить как суммы частных приращений по какой-либо независимой системе координат. Так, для внутренней энергии такими независимыми переменными являются энтропия и объем, для энтальпии — энтропия и давление, для энергии Гиббса — температура и давление. Если система состоит из k компонентов и n_i — количество вещества (молей) каждого из них, то к названным независимым переменным для функций E , H и G надо добавить еще и все величины n_i . В результате получим

$$\begin{aligned} E &= E(S, U, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ H &= H(S, p, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ G &= G(T, p, n_1, n_2, \dots, n_k). \end{aligned} \quad (5.47)$$

и их полные дифференциалы

$$\begin{aligned} dE &= \frac{\partial E}{\partial S} dS + \frac{\partial E}{\partial V} dV + \sum_{i=1}^k \frac{\partial E}{\partial n_i} dn_i; \\ dH &= \frac{\partial H}{\partial S} dS + \frac{\partial H}{\partial p} dp + \sum_{i=1}^k \frac{\partial H}{\partial n_i} dn_i; \\ dG &= \frac{\partial G}{\partial T} dT + \frac{\partial G}{\partial p} dp + \sum_{i=1}^k \frac{\partial G}{\partial n_i} dn_i. \end{aligned} \quad (5.48)$$

Частные производные от E , H и G по числам молей компонентов при фиксированных остальных параметрах состояния системы называются *химическими потенциалами* этих компонентов. Обозначив химические потенциалы μ , согласно их определению, получим

$$\mu_i = \frac{\partial E}{\partial n_i} = \frac{\partial H}{\partial n_i} = \frac{\partial G}{\partial n_i}. \quad (5.49)$$

Учитывая (5.43), (5.46) и (5.49), соотношения (5.48) можно привести к виду

$$\begin{aligned} dE &= TdS - pdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i; \\ dH &= TdS + Vdp + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i; \\ dG &= -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i, \end{aligned} \quad (5.50)$$

более удобному для последующего описания системы в состоянии равновесия.

§ 34. Сохранение термодинамических функций при равновесном состоянии системы. Уровень равновесного состояния

В состоянии устойчивого равновесия в изолированной системе функции E , H и G достигают минимальных значений, а их полные дифференциалы, так же как и полные дифференциалы параметров состояния, равны нулю. Другими словами, при равновесном состоянии системы справедливы равенства

$$dE = dH = dG = dT = dp = dS = 0. \quad (5.51)$$

Приравнявая левые части соотношений (5.50) к нулю, получаем три эквивалентных уравнения для описания точки устойчивого равновесия системы, отличающиеся друг от друга только выбором основных переменных.

Поскольку в расчетах и последующих измерениях температура и давление являются естественными параметрами, рассмотрим третье из этих уравнений, записав его в виде

$$-SdT + Vdp + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i = 0. \quad (5.52)$$

Поскольку масса равновесной системы не должна оказывать влияния на ее свойства, удобно предположить, что система содержит 1 моль смеси. Тогда содержание каждого компонента

в (5.52) можно выразить в мольных долях и записать (5.52) в виде

$$-s dT + v dp + \sum_{i=1}^k \mu_i dx_i = 0, \quad (5.53)$$

где s и v — энтропия и объем одного моля смеси.

Для равновесной системы, когда справедливы равенства (5.51), из (5.53) следует, что

$$\sum_{i=1}^k \mu_i dx_i = 0 \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^k \mu_i x_i = \text{const.} \quad (5.54)$$

Вычисляя полный дифференциал от второго равенства, получаем

$$\sum_{i=1}^k \mu_i dx_i + \sum_{i=1}^k x_i d\mu_i = 0. \quad (5.55)$$

Заменяя третье слагаемое в (5.53) на основании этого равенства и учитывая, что мольные доли x_i удовлетворяют соотношениям

$$\sum_{i=1}^k x_i = 1, \quad x_k = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} x_i; \\ dx_k = - \sum_{i=1}^{k-1} dx_i, \quad (5.56)$$

получаем следующее уравнение равновесного состояния для многокомпонентной однофазной системы:

$$-s dT + v dp - \sum_{i=1}^{k-1} x_i d(\mu_i - \mu_k) = d\mu_k. \quad (5.57)$$

Если система многофазна, то уравнение (5.57) справедливо для каждой из ее фаз в отдельности. Например, для двухфазной системы, записав уравнение (5.57) для I и II фаз, получим

$$-s^{(I)} dT^{(I)} + v^{(I)} dp^{(I)} - \sum_{i=1}^{k-1} x_i^{(I)} d(\mu_i^{(I)} - \mu_k^{(I)}) = d\mu_k^{(I)}; \\ -s^{(II)} dT^{(II)} + v^{(II)} dp^{(II)} - \sum_{i=1}^{k-1} x_i^{(II)} d(\mu_i^{(II)} - \mu_k^{(II)}) = d\mu_k^{(II)}. \quad (5.58)$$

Поскольку равновесие двух фаз возможно только при выполнении равенства в этих фазах давлений, температур и хи-

мических потенциалов компонент, то приравнявая левые части уравнений (5.58), получаем уравнение

$$-s^{(I)} dT + v^{(I)} dp - \sum_{i=1}^{k-1} x_i^{(I)} d(\mu_i - \mu_k) = \\ = -s^{(II)} dT + v^{(II)} dp - \sum_{i=1}^{k-1} x_i^{(II)} d(\mu_i - \mu_k), \quad (5.59)$$

которое обычно записывают в виде

$$(v^{(II)} - v^{(I)}) dp = (s^{(II)} - s^{(I)}) dT + \sum_{i=1}^{k-1} (x_i^{(II)} - x_i^{(I)}) d\mu_i \quad (5.60)$$

и называют уравнением состояния равновесия двухфазной многокомпонентной системы.

Из уравнений равновесного состояния следует, что состояние любой k -компонентной фазы в равновесной системе определяется $(k-1)$ -м значением ее компонент x_i и двумя параметрами, характеризующими ее энергетическое состояние. Такими параметрами являются либо p и T , либо s и v , либо s и v (см. § 35). Таким образом, в состоянии равновесия системы ее k -компонентная фаза полностью определяется $(k+1)$ -м параметром. Если в системе таких фаз N , то для описания всей системы надо задать $N(k-1) + 2$ параметров. Для их определения имеется для каждой пары фаз k уравнений состояния равновесия типа (5.60) для каждого химического потенциала. Поскольку из N можно составить $N-1$ независимых пар, то всего уравнений будет $k(N-1)$. Для определения всех параметров не хватает еще

$$\Phi = N(k-1) + 2 - k(N-1) = k - N + 2 \quad (5.61)$$

уравнений. Число Φ обычно называют числом степеней свободы системы, а соотношение (5.61) для его определения — правилом фаз Гиббса. Величина Φ соответствует наибольшему числу параметров, изменение которых можно проводить одновременно, не нарушая состояния равновесия системы.

Для практического применения уравнений (5.57) и (5.60) надо выразить входящие туда химические потенциалы через параметры системы: температуру, давление и состав. Если ввести новые величины — коэффициенты активности γ_i , характеризующие степень отклонения i -й фазы от идеальной¹ (для идеальной системы $\gamma=1$), то уравнения равновесия для однофазной и двухфазной систем, одинаковые компоненты в которых обозначены x_i и y_i , можно привести к виду

$$v dp = s dT + RT \sum_{i=1}^k x_i d \ln x_i + RT \sum_{i=1}^k x_i d \ln \gamma_i; \quad (5.62)$$

¹ В идеальной системе отдельные компоненты не взаимодействуют друг с другом.

$$(v^{(II)} - v^{(I)}) dp = (s^{(II)} - s^{(I)}) dT + RT \sum_{i=1}^k (y_i - x_i) d \ln y_i + RT \sum_{i=1}^k (y_i - x_i) d \ln \gamma_i^{(II)}, \quad (5.63)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Для идеальных систем, когда все $\gamma_i = 1$, последние слагаемые в правых частях этих уравнений будут равны нулю.

Составы равновесных фаз двухфазной системы для случаев двух и k компонент определяют уравнениями [23]

$$y_1 = \frac{\alpha x_1}{1 + (\alpha - 1) x_1}; \quad (5.64)$$

$$y_i = \frac{\alpha_{ik} x_i}{\sum_{i=1}^k \alpha_{ik} x_i}, \quad \alpha_{ik} = \left(\frac{y_i}{x_i} \right) / \left(\frac{y_k}{x_k} \right), \quad i = \overline{1, k}, \quad (5.65)$$

где α и α_{ik} — коэффициенты относительного распределения компонент по фазам.

§ 35. Закономерности описания процессов переноса вещества в двухфазных системах

Массообменные процессы в двухфазных системах газ—жидкость широко применяются в нефтяной и газовой промышленности. Такими процессами являются сепарация и стабилизация нефти и конденсата, абсорбционная очистка газа и регенерация гликолей. Стационарные модели этих процессов строятся по единой принципиальной схеме, упрощенный вариант которой разбирается в настоящем параграфе.

Пусть G_n и L_n — начальные массы газа и жидкости, y_{in} и x_{in} — начальные значения i -й компоненты в этих фазах, приведенных в контакт в некотором объеме. В результате массообмена между фазами происходят изменения в их компонентном и массовом составе. По окончании процесса масса газа будет G_k , масса жидкости — L_k , а содержание в них i -й компоненты — y_{ik} и x_{ik} соответственно.

В соответствии с законами сохранения массы вещества начальные и конечные продукты процесса удовлетворяют следующей системе из k уравнений:

$$G_n + L_k = G_k + L_n; \quad (5.66)$$

$$G_n y_{in} - L_k x_{ik} = G_k y_{ik} - L_n x_{in}, \quad i = \overline{1, k-1}. \quad (5.67)$$

Если считать, что начальные состояния фаз известны, то в конце массообменного процесса надо определить $2k$ величин (G_k , L_k и $2(k-1)$ значений y_{ik} и x_{ik}). Таким образом, для полного описания системы нужно еще k уравнений, ($k-1$)

из которых можно получить из предположения, что в конце процесса фазы находятся в равновесии. Тогда будут справедливы уравнения фазового равновесия

$$y_{ik} = f_i(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{kk}), \quad i = \overline{1, k-1}. \quad (5.68)$$

Последнее недостающее уравнение можно получить из закона сохранения энергии, записав его для данного случая как уравнение теплового баланса:

$$G_n H_{1n} + L_n H_{2n} + Q = G_k H_{1k} + L_k H_{2k}, \quad (5.69)$$

где H_{1n} , H_{2n} , H_{1k} , H_{2k} — начальные и конечные энтальпии газообразной и жидкой фаз, а Q — количество тепла, получаемое системой за время процесса.

Итак, мы получили систему из $2k$ уравнений, которая полностью определяет состояние системы при закончившемся массообменном процессе. В реальных процессах равновесное состояние между фазами обычно не достигается, поэтому для корректировки расчетных величин используют поправочные коэффициенты.

В технологических аппаратах типа колонн массообменные процессы часто идут в противоточных системах, т. е. когда потоки жидкости и газа направлены навстречу друг к другу. Выделим в такой системе (рис. 10) два близких сечения и запишем для области между ними уравнения сохранения масс. Полагая, что величины G , L , Gy_i и Lx_i различаются между этими сечениями на дифференциально малые величины, вместо (5.66) и (5.67) получаем

$$dG = dL, \quad d(Gy_i) = d(Lx_i), \quad i = \overline{1, k-1}. \quad (5.70)$$

Интегралами этих уравнений будут

$$G - L = C_1; \quad Gy_i - Lx_i = C_2. \quad (5.71)$$

Константы интегрирования C_1 и C_2 определим из граничных условий (рис. 10). В результате получим

$$C_1 = G_n - L_k = G_k - L_n; \quad C_2 = G_n y_{in} - L_k x_{ik} = G_k y_{ik} - L_n x_{in}. \quad (5.72)$$

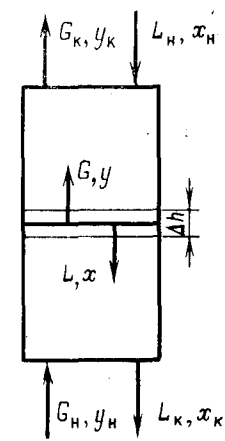


Рис. 10. Схема противоточной массообменной системы

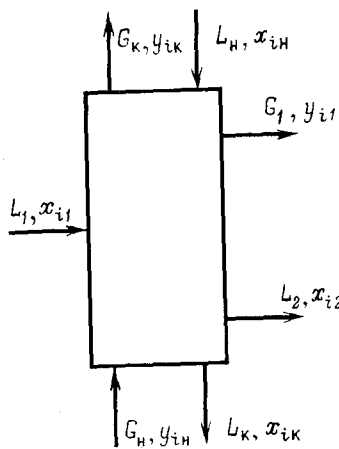


Рис. 11. Схема противоточной массообменной системы с сосредоточенными источниками и стоками

При реализации процессов противоточного массообмена обычно выполняются условия $G_n \approx G_k = G$, $L_n \approx L_k = L$. Учитывая эти условия и (5.72), из (5.61) получаем

$$y_i = y_{in} + \frac{L}{G} (x_i - x_{in})$$

или

$$y_i = y_{ik} + \frac{L}{G} (x_i - x_{in}). \quad (5.73)$$

Эти уравнения называют уравнениями рабочих линий противоточного массообменного процесса.

Связь между L и G в произвольном сечении аппарата определяется уравнением энергетического баланса системы

$$\begin{aligned} G_n H_{1n} - L_k H_{2k} + Q' &= G H_1 - L H_2 = \\ &= G_k H_{1k} - L_n H_{2n} - Q'', \end{aligned} \quad (5.74)$$

где Q' — количество тепла, подводимое к системе на участке от места ввода потока газа G_n до рассматриваемого сечения; Q'' — количество тепла, подводимое на участке от рассматриваемого сечения до точки вывода потока газа; H_1 и H_2 — энтальпии потоков G и L .

При адиабатических условиях ведения процесса, когда $Q' = Q'' = 0$, изменения величин G и L обусловлены только изменением H_1 и H_2 в зависимости от состава смесей. При $H_1 = \text{const}$ и $H_2 = \text{const}$ получаем $L = \text{const}$ и $G = \text{const}$. В этом случае рабочие линии процесса определяются линейными уравнениями (5.73).

Если технологический аппарат имеет сосредоточенные источники и стоки в промежутке от G_n до G_k , как это показано на рис. 11, то, очевидно, предположение постоянства потоков L и G может быть справедливо только между любыми двумя соседними по высоте точками ввода и вывода жидкости или газа.

Уравнения рабочих линий (5.73) иногда записывают в иной форме

$$y_i = \frac{L}{G} x_i + \frac{\Pi_i}{G} = \frac{L}{G} x_i - \frac{W_{ik}}{G} \quad (5.75)$$

или

$$y_i = \frac{R}{1+R} x_i - \frac{\Pi_i}{\Pi} \frac{1}{1+R} = \frac{R'}{R'-1} x_i - \frac{W_{ik}}{W_k} \frac{1}{R'-1};$$

$$\Pi = G_k - L_n; \quad \Pi_i = G_k y_{ik} - L_n x_{in};$$

$$W_k = L_k - G_n; \quad W_{ik} = L_k x_{ik} - G_n y_{in};$$

$$R = L/\Pi; \quad R' = L/W_k.$$

Величины Π и W_k соответствуют величинам потоков верха и низа аппарата, а величины Π_i и W_{ik} определяют соответствующие потоки компонента i .

При выводе количественных зависимостей между потоками i -й компоненты вещества из одной фазы в другую и концентрации этого вещества в фазах обычно предполагается, что этот поток пропорционален разности концентраций данного компонента внутри фазы и на ее границе, т. е.

$$j_i = k_y (y_i - y_i^r) = k_x (x_i - x_i^r), \quad (5.76)$$

где k_y и k_x — коэффициенты массоотдачи, характеризующие свойства фаз G и L соответственно. Однако величины y_i^r и x_i^r обычно известны. Поэтому условились заменять их равновесными концентрациями y_i^p и x_i^p . Внося возникающие при такой замене поправки в коэффициенты массоотдачи фаз, получаем

$$j_i = k_y (y_i - y_i^p) = k_x (x_i - x_i^p). \quad (5.77)$$

ГЛАВА 6.

МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

§ 36. Процесс бурения скважин

Из всех технологических процессов в нефтяной промышленности процесс бурения является самым старым и в то же время наименее теоретически изученным и описанным. В значительной степени это связано со сложностью математического моделирования физических процессов разрушения породы на забое скважины. В связи с этим для получения количественных соотношений для оценивания средней механической скорости проходки v обычно используют эмпирические зависимости вида

$$v = a \frac{n^\alpha \bar{P}}{1 + b^4 \bar{P}^4}, \quad \bar{P} = P/d \quad (6.1)$$

или

$$v = a P^\delta n^\alpha, \quad (6.2)$$

где P — осевая нагрузка на долото; d — диаметр долота; n — число оборотов долота, a , b и δ — параметры модели.

Идентификация параметров в зависимостях (6.1) и (6.2) показывает, что от опыта к опыту их величины меняются, хотя и можно указать пределы их изменения. Так, $\alpha \in [0,4-0,8]$; величина δ часто принимается равной единице, хотя есть данные, по которым $\delta=0,6$; величина параметра a является функцией числа Рейнольдса, рассчитанного для истечения промывочной жидкости из отверстия долота; величина параметра b отождествляется с величиной $(\bar{P}_m)^{-1}$, где \bar{P}_m — нагрузка на долото, при которой достигается максимальная скорость проходки. Величина \bar{P}_m , очевидно, будет зависеть от количества промывочной жидкости, свойств разбуриваемой породы, частоты вращения долота и т. д.

Такая широта трактовки зависимости коэффициентов, моделей от различных параметров процесса вряд ли удобна. Единственный путь несколько ограничить произвольность толкований экспериментальных данных — строить модели процесса бурения в безразмерной форме, с учетом основных законов сохранения. Попробуем это сделать, по возможности максимально упростив механизм процессов разрушения породы на забое скважины.

Начнем с очевидного утверждения, что энергия, подводимая извне к инструменту, равна сумме энергетических затрат на разрушение породы в забое, продвижение инструмента и на тепло за счет сил трения при истирании породы. Подводимую к забою энергию мы знаем. При расчете ее на единицу времени можно сказать, что она равна сумме мощностей N_1 и N_2 , первая из которых затрачивается на вращение инструмента, а вторая — на его углубление. В зависимости от разбуриваемой породы, конструкции и состояния инструмента часть мощности N_1 будет расходоваться на преодоление сил трения и истирание породы. Эта часть энергии будет превращаться в тепло, а оставшаяся часть будет расходоваться на механическую работу по разрушению породы. Для выделения последней части введем понятие коэффициента полезного действия инструмента η , определив его следующим образом. Если на вращение инструмента к забою подводится мощность N_1 , а на разрушение породы тратится только часть этой мощности N_1^* , то

$$N_1^* = \eta N_1. \quad (6.3)$$

Очевидно, величина η непостоянна во времени и изменяется как при изменении условий на забое, так и при износе инструмента. В частности, величина η должна зависеть от осевой нагрузки на долото.

Если механическая скорость бурения v , а осевая нагрузка на долото P , то вторую составляющую мощности N_2 можно выразить через эти величины и записать в виде

$$N_2 = Pv. \quad (6.4)$$

Таким образом, полная мощность N , затрачиваемая на углубление забоя, определяется равенством

$$N = \eta N_1 + Pv. \quad (6.5)$$

Часть этой мощности, которую обозначим N_c , расходуется на скалывание породы в забое, а оставшаяся часть N_d затрачивается на дробление уже сколотых кусков, если они не сразу были вынесены или попали опять в зону действия инструмента.

Для характеристики прочностных свойств породы забоя введем коэффициент твердости породы σ . Размерность этой величины $[\sigma] = ML^{-1}T^{-2}$. Если не учитывать зависимость N_c от свойств промывочной жидкости, то можно утверждать, что N_c будет функцией σ и объема забоя, выбуриваемого в единицу времени и равного величине $v\pi d^2/4$, где d — диаметр долота. По теории размерности, эти величины должны удовлетворять уравнению

$$f(N_c, \delta, \frac{\pi d^2}{4} \cdot v) = 0, \quad (6.6)$$

которое в безразмерных переменных можно привести к виду

$$f(\Pi) = 0, \quad \Pi = N_c / (vd^2\sigma). \quad (6.7)$$

Решением уравнения (6.7) будет

$$\Pi = c \quad (6.8)$$

или

$$N_c = cvd^2\sigma.$$

Здесь c — неизвестная константа¹.

Мощность N_d , которая расходуется на повторное дробление породы, зависит от объема выбуриваемой в единицу времени породы, расхода промывочной жидкости Q , ее плотности и вязкости, среднего размера частей скалываемой породы, плотности породы, коэффициента прочности породы σ и др. Такое обилие параметров не оставляет надежд на получение простого параметрического выражения для N_d методом теории размерностей. Поэтому воспользуемся для раскрытия N_d следующей эмпирической формулой:

$$N_d = \frac{vd^2}{Q} \kappa N_c, \quad (6.9)$$

где κ — безразмерный коэффициент, зависящий от свойств промывочной жидкости и особенностей ее подачи, а также от свойств породы.

¹ Изменение свойств бурового раствора (плотность, водоотдача, содержание нефтяной фазы и др.) будет приводить к изменению величин η и σ .

Приравнивая мощности N и сумму мощностей N_c и N_d , получим

$$\eta N_1 + Pv = cvd^2\sigma + \kappa \frac{v^2 d^4}{Q} \sigma c. \quad (6.10)$$

Это квадратное уравнение относительно скорости механической проходки. Прежде чем его решать, приведем его к безразмерному виду, вводя новые переменные:

$$\begin{aligned} \Pi_1 = vd^2/Q; \quad \Pi_2 = P/d^2\sigma; \quad \Pi_3 = An/Q\sigma; \\ N_1 = nA, \end{aligned} \quad (6.11)$$

где n — число оборотов долота; A — работа, производимая долотом за один оборот, получаем

$$\Pi_1^2 - \frac{1}{\kappa} \left(\frac{\Pi_2}{c} - 1 \right) \Pi_1 - \frac{\eta}{c\kappa} \Pi_3 = 0. \quad (6.12)$$

Из этого уравнения находим

$$\Pi_1 = \frac{1}{2\kappa} \left(\frac{\Pi_2}{c} - 1 \right) + \sqrt{\frac{1}{4\kappa^2} \left(\frac{\Pi_2}{c} - 1 \right)^2 + \frac{\eta}{c\kappa} \Pi_3}. \quad (6.13)$$

Второй корень не удовлетворяет физическим условиям задачи, так как он соответствует отрицательному значению Π_1 .

Проанализируем эту зависимость. Сначала определим интервалы изменения независимых переменных Π_2 и Π_3 . Согласно отраслевым нормам [37], величина P/d не превышает 12 кН/см для диаметров долот 269—295 мм. Для долот диаметром 214 мм этот предел снижается до 8,5 кН/см. Величина σ для песчаника равна 65 кН/см, а для гранита 220 кН/см. Максимальная величина Π_2 , которую можно получить на основе этих данных, не превосходит $4 \cdot 10^{-4}$, т. е. очень мала. Поскольку величина c в формуле (6.8) не превышает 0,1 (ее можно оценить), можно сделать вывод, что $\Pi_2/c \ll 1$, и поэтому, пренебрегая ей как слагаемым в (6.13), получаем

$$\Pi_1 = \frac{1}{2\kappa} [\sqrt{1 + \beta \Pi_3} - 1], \quad \beta = 4\kappa\eta/c. \quad (6.14)$$

Вторая переменная Π_3 может изменяться от нуля ($n=0$, $Q \neq 0$) до бесконечности ($n \neq 0$, $Q=0$).

Проверим асимптотические свойства зависимости (6.14). При снятии осевой нагрузки, т. е. при $P=0$, а также при остановке инструмента независимо от расхода промывочной жидкости скорость бурения должна стремиться к нулю. То же следует из модели. Если промывочную жидкость не подавать ($Q=0$), то скорость бурения также будет нулевой, независимо от числа оборотов инструмента и нагрузки на долото. Этот результат также получаем из модели. Сравним теперь количественные за-

висимости. Как было сказано ранее, по имеющимся данным, скорость бурения пропорциональна n^α , где $\alpha \in [0,4-0,8]$. По нашей модели скорость бурения также возрастает при увеличении числа оборотов бура. При условии $\beta \Pi_3 \gg 1$ можно считать, что $v \sim n^{0,5}$, при меньших значениях Π_3 влияние изменения числа оборотов бура на скорость бурения уменьшается.

Экспериментальная зависимость скорости бурения от осевой нагрузки на долото также степенная с показателем степени, изменяющимся в пределах 0,6—1. В нашу модель осевая нагрузка на долото в явном виде не вошла, хотя, очевидно, с ней должна быть функционально связана величина A . При этом можно предполагать, что эта связь должна быть степенной, так как величина A равна нулю при $P=0$ и растет с увеличением P .

Авторы работы [27] отмечают, что в области малых расходов промывочной жидкости, когда число Рейнольдса, рассчитанное для течения жидкости в отверстии долота, лежит в пределах 2—100, скорость бурения пропорциональна числу Рейнольдса (или расходу жидкости при фиксированных остальных параметрах). Из нашей модели мы получаем тот же результат в области $\beta \Pi_3 \ll 1$. В области $\beta \Pi_3 \gg 1$ скорость бурения будет пропорциональна корню квадратному из расхода промывочной жидкости.

Подводя итог проведенному анализу, можно сделать вывод, что зависимость (6.14) удовлетворяет основным экспериментальным результатам. В отличие от известных трехпараметрических зависимостей (6.1) и (6.2) в нее входят только два параметра, подлежащие определению, а связывает она не четыре, а пять исходных размерных переменных.

§ 37. Моделирование сборных и распределительных коллекторов

Сбор нефти и газа, а также закачка жидкости или газа в пласт для поддержания пластового давления осуществляются с помощью трубопроводных систем, называемых коллекторами.

Геометрия коллекторов довольно разнообразна. Обычно различают коллекторы (рис. 12) линейные, лучевые, кольцевые и кольцевые с перемычками, или, как их еще называют, двух-

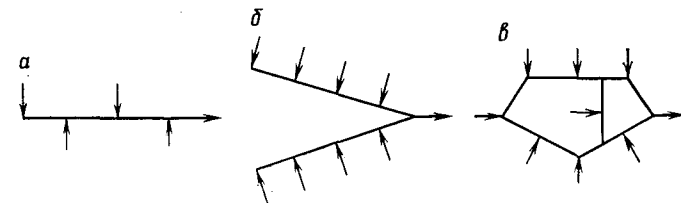


Рис. 12. Типы коллекторов:

а — линейный; б — лучевой; в — двухконтурный

контурные, трехконтурные и т. д. Построение динамической модели даже простейшего из коллекторов — линейного является сложной задачей. Поэтому мы ограничимся только моделью коллектора, работающего в стационарном режиме.

Основой такой модели является уравнение, связывающее перепад давления на трубопроводе длиной L , диаметром d , с массовым расходом M транспортируемого вещества (газа или жидкости) с его индивидуальными характеристиками, такими как сжимаемость Z , вязкость μ_n , плотность ρ .

Для жидкости это уравнение можно записать в виде

$$p_1 - p_2 = \lambda \frac{Q^2}{2F^2} \rho \frac{L}{d}, \quad Q = \frac{M}{\rho}, \quad (6.15)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления; F — площадь поперечного сечения трубы; Q — объемный расход жидкости.

Величина λ является функцией числа Re и в зависимости от его величины и степени шероховатости труб вычисляется по разным формулам [42].

Для газа перепад давления обычно вычисляется по формуле

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{M^2 L}{F^2 d} ZRT, \quad (6.16)$$

где R — газовая постоянная; Z — коэффициент сжимаемости, характеризующий отклонение свойств реального газа от идеального; T — абсолютная температура.

Построение стационарной модели коллектора произвольной конфигурации основано на трех законах:

а) законе сохранения энергии для каждой ветви коллектора, записываемого в виде уравнения (6.15) или (6.16);

б) законе сохранения массы в узлах коллектора: сумма всех истоков и стоков в любом узле равна нулю;

в) законе нулевого перепада давления по любому замкнутому контуру коллектора (если в нем нет насосов и компрессоров).

Как следствие закона сохранения массы, в каждом узле коллектора можно получить закон сохранения массы во всем коллекторе: сумма всех истоков и стоков в коллекторе равна нулю.

Система уравнений, соответствующая этим законам, и определяет все расходы и перепады давлений в коллекторе. Здесь следует заметить, что закон сохранения массы, применяемый для моделирования коллектора, сходен по форме с законами Кирхгофа в электротехнике.

В качестве примера построим стационарную модель коллектора (рис. 13). M_i на нем обозначены известные (заданные) массовые расходы источников и стоков, G_i обозначены массо-

вые расходы по i -й ветви коллектора в направлении, указанном стрелкой¹. Всего надо определить 13 неизвестных: семь расходов G_i и шесть перепадов давлений.

Сначала для каждой ветви составим уравнения для перепада давления. Считая, что в коллекторе течет жидкость, воспользуемся равенством типа (6.15):

$$\Delta p_i = \lambda_i G_i^2 A_i, \quad i = \overline{1,6},$$

$$A_i = \frac{L_i}{2\rho F_i^2 d_i}.$$

Здесь Δp_i — разность давлений в начале и конце i -й ветви (начало и конец определяются выбранным направлением — стрелкой). Теперь составим уравнения, соответствующие закону сохранения массы в каждом узле коллектора:

$$M_1 - G_1 - G_4 = 0;$$

$$M_2 + G_1 + G_6 - G_2 = 0;$$

$$-G_7 + G_2 + G_3 = 0;$$

$$M_4 + G_5 - G_3 + G_4 = 0;$$

$$M_5 - G_5 - G_6 = 0.$$

Если эти уравнения сложить, то получим

$$M_1 + M_2 + M_4 + M_5 - G_7 = 0.$$

Это равенство соответствует закону сохранения массы во всем коллекторе.

Из рис. 13 видно, что коллектор имеет два независимых контура, образованные ветвями 1, 6, 5, 4 и 2, 3, 5, 6. Составим для этих контуров уравнения, соответствующие закону нулевого перепада давления по контуру:

$$\Delta p_1 - \Delta p_6 + \Delta p_5 - \Delta p_4 = 0;$$

$$\Delta p_2 - \Delta p_3 - \Delta p_5 + \Delta p_6 = 0.$$

Таким образом, мы построили полную систему из 13 уравнений для определения 13 неизвестных перепадов и расходов в моделируемом коллекторе.

¹ Если при решении уравнений какая-либо из величин Δp_i будет отрицательной, это будет означать, что выбранное направление надо изменить на противоположное.

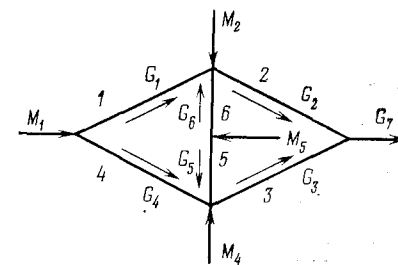


Рис. 13. Схема задания направлений в двухконтурном сборном коллекторе

Система уравнений, получаемая для описания стационарного режима коллектора, всегда нелинейна и для ее решения приходится использовать численные методы.

§ 38. Дифференциальная форма модели линейного трубопровода

В стволе скважины, ее шлейфе, сборных коллекторах, магистральных газопроводах и соединительных трубопроводах на технологических установках основным элементом является линейный трубопровод. Его модель как элемент входит в описание многих технологических схем и процессов.

Статическая модель трубопровода упоминалась в предыдущем параграфе. Она определяется соотношением (6.15) или (6.16). Более сложной является динамическая модель трубопровода. Поскольку при ее построении и последующем упрощении делается целый ряд предположений, рассмотрим вывод этой модели из общих уравнений сохранения массы и количества движения в непрерывной среде, которые были выведены в § 30 и 31.

В общем случае течение жидкости в трубе является трехмерным. Однако если считать, что основной вклад в законы сохранения массы и количества движения вносят не поперечные, а продольные составляющие скорости, направленные вдоль оси трубы, то описание течения в трубе можно существенно упростить.

Выберем систему координат таким образом, чтобы течение было направлено вдоль координатной оси x_1 , и предположим, что составляющие скорости u_2 и u_3 , направленные по двум другим координатным осям, тождественно равны нулю. Тогда системы уравнений для законов сохранения энергии и массы вырождаются. В каждой из них остается только по одному уравнению, соответствующему движению вдоль оси x_1 .

Для наглядности физической трактовки последующих преобразований запишем исходные уравнения сохранения массы и количества движения в интегральной форме (5.11) и (5.19):

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_1)}{\partial x_1} \right] dV = 0; \quad (6.17)$$

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial (\rho u_1)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_1^2)}{\partial x_1} - F_{V_1} \right] dV = \int_S F_{S_1} dS. \quad (6.18)$$

В качестве объема Ω выберем цилиндр, вырезанный из потока двумя перпендикулярными к оси трубы сечениями, отстоящими друг от друга на расстоянии Δx_1 . Считая Δx_1 малой величиной, уравнения (6.17) и (6.18) можно записать в виде

$$\Delta x_1 \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_0} \rho dS + \frac{\partial}{\partial x_1} \int_{S_0} (\rho u_1) dS \right] = 0; \quad (6.19)$$

$$\Delta x_1 \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_0} (\rho u_1) dS + \frac{\partial}{\partial x_1} \int_{S_0} (\rho u_1^2) dS - \int_{S_0} F_{V_1} dS \right] = \int_S F_{S_1} dS. \quad (6.20)$$

Здесь S_0 — площадь основания выделенного цилиндра, равная $\pi d^2/4$, где d — диаметр трубопровода.

Считая величины ρ и F_{V_1} постоянными по сечению и переходя к средней скорости потока по сечению трубы v по правилу

$$\int_{S_0} \rho u_1 dS = \rho v S_0; \quad \int_{S_0} \rho u_1^2 dS = k \rho v^2 S_0, \quad (6.21)$$

из (6.19) и (6.20) получаем

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x_1} = 0, \quad (6.22)$$

$$S_0 \Delta x_1 \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{\partial (\beta \rho v^2)}{\partial x_1} - F_{V_1} \right] = \int_S F_{S_1} dS. \quad (6.23)$$

Коэффициент β в (6.23) введен для учета профиля скорости по сечению трубы. Для параболического профиля скорости, соответствующего ламинарному течению, $\beta = 5/4$. При турбулентном течении, когда профиль скорости близок к прямоугольному, $\beta \approx 1$ [42].

Сила F_{V_1} определяется полем сил тяжести и равна проекции силы тяжести на направление движения жидкости.

Если ось трубопровода составляет с горизонтом угол φ , то

$$F_{V_1} = -\rho g \sin \varphi. \quad (6.24)$$

Силу F_{S_1} , действующую на поверхность объема интегрирования, разделим на две составляющие. Одна из них F_{S_p} обусловлена разностью давлений на основания цилиндра, а другая F_{S_τ} определяется силой трения движущегося объема о стенку трубы. Считая давление по сечению трубы постоянным, разделим силы F_{S_1} на две составляющие и преобразуем интеграл в правой части (6.23)

$$\begin{aligned} \int_S F_{S_1} dS &= \int_S (F_{S_p} + F_{S_\tau}) dS = \int_{S_0} F_{S_p} dS + \int_{S_\Delta} F_{S_\tau} dS = \\ &= S_0 [p(x) - p(x + \Delta x)] - S_\Delta \tau. \end{aligned} \quad (6.25)$$

Здесь $S_\Delta = \pi d \Delta x_1$ — боковая поверхность цилиндра, по которому проводится интегрирование; τ — касательное напряжение трения на стенке трубы. Из гидродинамики известно, что для течения в круглой трубе

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \rho v^2, \quad (6.26)$$

где λ — коэффициент сопротивления.

Раскладывая $p(x_1 + \Delta x_1)$ в ряд Тейлора и ограничиваясь двумя первыми членами ряда из (6.25) и (6.26) получаем

$$\int_S F_{S_1} dS = -S_0 \Delta x_1 \left[\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\lambda}{8} \rho v^2 \right]. \quad (6.27)$$

Подставив (6.27) и (6.24) в (6.23), запишем законы сохранения массы и количества движения для движения жидкости по трубопроводу в следующем виде:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{\partial(\rho v)}{\partial x_1}; \\ -\frac{\partial p}{\partial x_1} &= \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta \rho v^2)}{\partial x_1} + \rho g \sin \varphi + \frac{\lambda}{2d} \rho v^2. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Эти два уравнения содержат три неизвестные величины ρ , v , p ; поэтому систему (6.28) необходимо дополнить уравнениями связи между отдельными переменными. Одним из таких уравнений может служить известное соотношение [42] между скоростями изменения плотности и давления:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (6.29)$$

где c — скорость звука в жидкости. Для идеального газа уравнением связи является также уравнение состояния

$$p = \rho R T, \quad (6.30)$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Второе уравнение (6.28) можно несколько упростить, объединив слагаемое $\rho g \sin \varphi$, характеризующее гидростатическое давление в трубопроводе, со слагаемым $\partial p / \partial x_1$. Такое упрощение возможно, если принять суммарное давление в точке x равным $p + \rho g z(x_1)$, где $z x_1$ — высота подъема трубопровода в точке x_1 над некоторой нулевой точкой отсчета ($\partial z / \partial x_1 = \sin \varphi$). В дальнейшем под давлением будем понимать сумму $p + \rho g z(x_1)$, а слагаемое $\rho g \sin \varphi$ из второго уравнения (6.28) опустим.

Слагаемое $\partial(\beta \rho v^2) / \partial x_1$ характеризует изменение давления вдоль трубопровода за счет скоростного напора. Для несжимаемой жидкости, когда ρ и v вдоль трубы постоянны, это слагаемое равно нулю. Можно показать, что для газа этим слагаемым также можно пренебречь при описании длинных трубопроводов.

Учитывая уравнение связи (6.29) и опуская второе и третье слагаемые во втором уравнении (6.28), получаем обычно используемую математическую модель для описания движения жидкости и газа в линейном трубопроводе:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial t} &= c^2 \frac{\partial(\rho v)}{\partial x_1}; \\ -\frac{\partial p}{\partial x_1} &= \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} \rho v^2. \end{aligned} \quad (6.31)$$

В общем случае эта система уравнений нелинейна и допускает решение только численными методами. Для упрощения процедуры решения ее обычно линеаризуют. Методы линеаризации различны. Наиболее простым, пожалуй, является метод, состоящий в постулировании условия¹

$$\lambda v / 2d = 2a \approx \text{const}. \quad (6.32)$$

Линеаризованные уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial t} &= k_2 \frac{\partial(\rho v)}{\partial x_1}; \\ -\frac{\partial p}{\partial x_1} &= \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + 2a(\rho v). \end{aligned} \quad (6.33)$$

Можно показать, что на движение газа по длинному трубопроводу основное влияние оказывают силы трения, которые характеризуются слагаемыми $\partial(\rho v) / \partial t$. Поэтому при описании длинного газопровода первое слагаемое во втором уравнении системы (6.57), соответствующее инерционным силам, можно опустить.

Для перехода к реальным параметрам трубопровода введем понятие массового расхода газа в сечении трубопровода площадью S , определив его как

$$G = S \rho v. \quad (6.34)$$

Пренебрегая инерционными силами в (6.33) и учитывая (6.34), записываем дифференциальную форму математической модели линейной части длинного газопровода в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial t} &= k_0 \frac{\partial G}{\partial x_1}; \\ -\frac{\partial P}{\partial x} &= k_1 G; \end{aligned} \quad (6.35)$$

$$k_0 = C^2 / S; \quad k_1 = 2a / S.$$

Эту систему можно решить аналитически, используя метод преобразования Лапласа. Для этого заменим систему (6.35) одним обыкновенным уравнением второго порядка.

Дифференцируя второе уравнение по x и учитывая первое уравнение, получаем классическое уравнение параболического типа, которое обычно называют уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{k_1}{k_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (6.36)$$

¹ Можно показать, что это условие выполняется точно только в ламинарной области течения.

Для того чтобы получить уравнение относительно G , надо продифференцировать первое уравнение по x , а второе — по t . Приравняв смешанные производные, получаем

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = \frac{k_1}{k_0} \cdot \frac{\partial G}{\partial t}. \quad (6.37)$$

Из сравнения (6.36) и (6.37) видно, что эти уравнения совпадают с точностью до обозначений. Поэтому решение, которое мы получили далее для давления, будет справедливо и для расхода, если в граничных условиях и самом решении сделать соответствующую замену переменных.

§ 39. Трубопровод как система регулирования

В терминах теории автоматического регулирования линейная часть трубопровода является системой многосвязанного регулирования, имеющей два входа и два выхода, которые будем обозначать p_n, G_n, p_k, G_k и называть соответственно давлением и расходом в начале и конце трубы. Предположим, что выходные переменные p_k и G_k можно некоторым способом выразить через остальные переменные и время:

$$\begin{aligned} p_k &= f_1(p_n, G_n, G_k, t); \\ G_k &= f_2(p_n, G_n, p_k, t). \end{aligned} \quad (6.38)$$

Тогда понятно, что, изменяя одну из переменных (кроме t) под знаком функции в (6.38) при фиксированных остальных, можно оценить влияние этой переменной на величину функции. В теории автоматического управления оценивание подобного влияния обычно называют оцениванием канала связи между зависимой и независимой переменными. Из (6.38) видно, что в нашем случае формально можно определить шесть каналов связи. Однако не все из них могут быть физически реализованы. Причины этого следующие. Между расходом и давлением в какой-либо точке существует причинно-следственная связь: изменение расхода приводит к изменению давления, а не наоборот. Это ограничение сразу сокращает число возможных каналов связи с шести до трех. Если теперь учесть, что при изменении расхода в начале или конце трубы давление там также будет изменяться, то из оставшихся трех каналов исключатся еще два и останется лишь канал

$$p_k = f(G_k, t/p_n, G_n), \quad (6.39)$$

соответствующий изменению давления p_k , когда изменяется расход G_k при фиксированных величинах p_n и G_n . Правую часть равенства (6.32) определим, решив уравнение (6.37).

Воспользуемся готовым решением этого уравнения при начальных и граничных условиях, соответствующих подаче на газопровод возмущения в виде скачкообразного изменения рас-

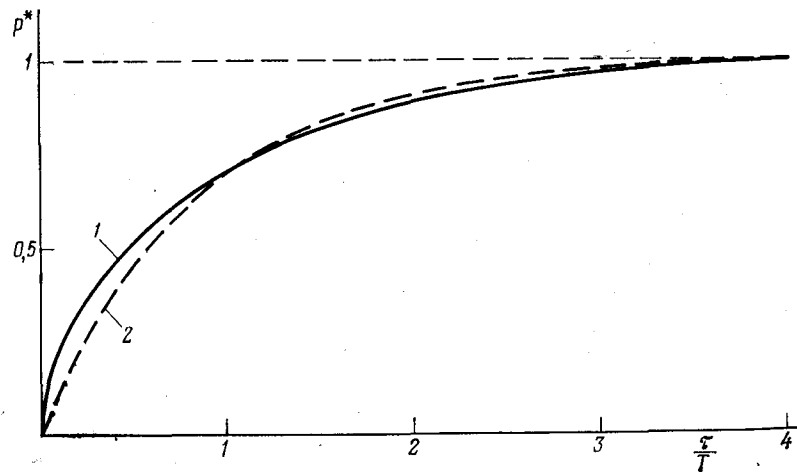


Рис. 14. Графики переходного процесса расход газа — давление в конце газопровода:
1 — истинное значение переходного процесса; 2 — переходный процесс аппроксимирующего линейного объекта первого порядка

хода газа на конце трубы. Математически эти условия запишем в виде¹

$$\begin{aligned} p(x_1, 0) &= p_0; & G(x_1, 0) &= G_0; \\ p(0, t) &= p_0; & G(l, t) &= G_0 + G_1. \end{aligned} \quad (6.40)$$

Из решения (6.37) с условиями (6.40) получаем описание переходного процесса в канале «расход газа в конце газопровода — давление в конце газопровода». В безразмерных координатах нормированного давления и времени функция переходного процесса имеет вид

$$\begin{aligned} p^*(l, \tau) &= 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} \exp \left[- (2i-1)^2 \frac{\tau}{T_0} \right]; \\ p^*(l, \tau) &= \frac{p_0 - p(l, \tau)}{A}, & A &= G_1 l \frac{2a}{gS}, \\ \tau &= \frac{c}{l} t, & T_0 &= \frac{8al}{\pi^2 c}. \end{aligned} \quad (6.41)$$

График этой функции (рис. 14) по виду напоминает переходную функцию линейного объекта первого порядка, которую можно записать в виде

$$p(\tau) = 1 - \exp(-\tau/T_1). \quad (6.42)$$

¹ В стационарном режиме давление в трубопроводе линейно убывает от начального p_0 до конечного p_1 , а разность этих давлений определяется формулой (6.15) или (6.16).

Постоянную времени T_1 можно определить из решения задачи аппроксимации $p^*(l, \tau)$ в однопараметрическом классе функций (6.42). В качестве критерия приближения воспользуемся условием равенства нулевых моментов у функций $[1 - p^*(\tau, l)]$ и $[1 - y(\tau)]$. Геометрически нулевые моменты этих функций соответствуют площадям, заключенным между кривыми $p^*(l, \tau)$, $y(\tau)$ и их асимптотой которая равна единице.

Проведя вычисления получим¹

$$\int_0^{\infty} [1 - p^*(\tau, l)] d\tau = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} \int_0^{\infty} e^{-(2i-1)^2 \frac{\tau}{T_0}} d\tau =$$

$$= T_0 \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^4} = T_0 \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\pi^4}{96} = \frac{\pi^2}{12} T_0; \quad (6.43)$$

$$\int_0^{\infty} [1 - y(\tau)] d\tau = \int_0^{\infty} e^{-\tau/T_1} d\tau = T_1. \quad (6.44)$$

Приравнявая найденные моменты, получаем $T_1 = T_0 \pi^2 / 12$.

График аппроксимирующей функции (6.42) с такой постоянной времени изображен на рис. 14 пунктирной линией.

Точность изображения, очевидно, можно повысить, если увеличить порядок линейной системы, которой мы аппроксимируем трубопровод. Так, например, если проводить аппроксимацию в классе линейных объектов третьего порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (6.45)$$

то в предположении, что все корни характеристического уравнения различны, переходная функция будет иметь вид

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 e^{p_1 t} + \alpha_2 e^{p_2 t} + \alpha_3 e^{p_3 t};$$

$$\alpha_0 = \frac{B(0)}{A(0)}, \quad \alpha_i = B(p_i) / p_i A'(p_i), \quad i = 1, 2, 3, \quad (6.46)$$

где p_i — корни характеристического уравнения.

Методы определения α_i и p_i при аппроксимации $p^*(l, \tau)$ в классе функций (6.46) были рассмотрены в гл. 4.

В заключение еще раз акцентируем внимание на том, что мы аппроксимировали объект с распределенными параметрами, которым является трубопровод, объектом с сосредоточенными параметрами. Это очень важный момент при решении задач управления объектами с распределенными параметрами.

¹ Здесь мы воспользуемся известным результатом

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^4} = \frac{\pi^4}{96}.$$

§ 40. Основы процессов подготовки газа и постановка задачи их моделирования

Согласно существующей технологии газ из скважин поступает на установки комплексной подготовки газа (УКПГ), где от него отделяются влага и жидкий конденсат (рис. 15). Сырой газ поступает на установку низкотемпературной сепарации (НТС), где он разделяется на три фракции: газ, жидкий конденсат и воду. Перед установкой НТС сырой газ охлаждается за счет эффекта дросселирования, а также при помощи специальных холодильников. Охлажденный газ поступает в полую емкость—сепаратор. При охлаждении в газе нарушается термодинамическое равновесие между газообразными и жидкими фазами его компонент. Начинает образовываться туман из капель воды и конденсата. Сухой газ выходит сверху сепаратора, капли жидкости частично оседают в низ аппарата, а частично — на различного рода фильтрах, которыми оснащаются сепараторы. Таким образом, вода и конденсат попадают в нижнюю часть аппарата. В поле сил тяжести они расслаиваются, так что в самом низу сепаратора находится водяная фаза, выше — более легкий конденсат, а еще выше — туман из газа с капельной жидкостью.

Для более глубокой осушки обычно соединяют несколько сепараторов последовательно. Перед каждым сепаратором газ охлаждают.

Поскольку установка НТС не может обеспечить степень осушки газа, которая требуется по ГОСТу, из последней степени сепаратора газ поступает на дополнительную ступень глубокой осушки. Наиболее часто такая осушка осуществляется за счет поглощения (абсорбции) из газа оставшейся в нем жидкости различными жидкими гликолями¹, в частности диэтиленгликолем (ДЭГ), триэтиленгликолем (ТЭГ), пропиленгликолем (ПГ) и т. д. Процесс абсорбции ведется в колонне насадочного или тарельчатого типа. Осушенный газ

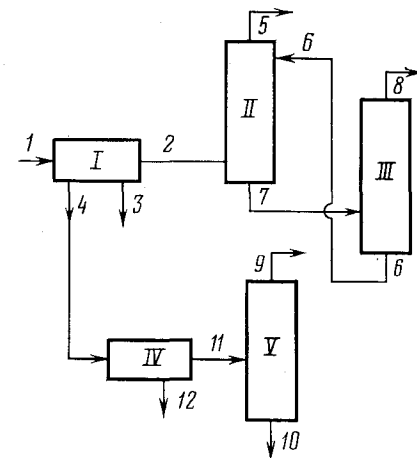


Рис. 15. Принципиальная схема УКПГ
I — установка низкотемпературной сепарации; II — установка абсорбционной очистки; III — установка регенерации гликоля; IV — установка сепарации газа от конденсата; V — установка стабилизации конденсата; 1 — сырой газ; 2 — осушенный газ; 3 — вода; 4 — конденсат; 5 — сухой газ; 6 — сухой гликоль; 7 — обводненный гликоль; 8 — вода; 9 — газ; 10 — стабильный конденсат; 11 — отсептированный сухой конденсат; 12 — вода

¹ В последнее время для этой цели все чаще используют процесс адсорбции — поглощения твердым адсорбентом.

постоянно отбирается с верха колонны. Если не требуется дополнительной очистки газа от серы и ее соединений, его направляют потребителю. В противном случае газ проходит еще через установку очистки от серы.

Смесь гликоля с водой и широкой углеводородной фракцией, которая отбирается с низа абсорбционной колонны, подается на колонну регенерации. Очищенный гликоль отбирается с низа колонны и вновь подается на процесс абсорбции.

Конденсат, отбираемый из сепаратора, является ценным сырьем для газоперерабатывающих (ГПЗ) заводов¹, но для переработки на ГПЗ его надо еще подготовить — отделить газ и частично попавшую в него воду. С установки НТС конденсат поступает на установку дегазации, которая представляет собой полую емкость. Конденсат заполняет ее примерно наполовину. В верхней части емкости находится газ, а в самом низу — вода, которая отделяется от конденсата за счет разности плотностей. При отборе газа давление в емкости снижается, нарушается равновесие между свободным газом и газом, растворенным в конденсате. В результате часть растворенного газа переходит в свободное состояние.

Для более глубокого отбора легких углеводородных фракций от конденсата после дегазации конденсат направляют на стабилизацию в специальную колонну. Легкие фракции конденсата отбираются с верхней, а стабильный конденсат — с нижней части колонны.

Все перечисленные аппараты УКПГ являются объектами с распределенными параметрами, в которых идут сложные тепломассообменные процессы. Построение динамических моделей этих объектов является довольно трудной задачей. Поэтому мы ограничимся только статическими моделями.

§ 41. Процесс низкотемпературной сепарации

Рассмотрим схему технологического процесса низкотемпературной сепарации (рис. 16). Сырой газ поступает в холодильник 1, где он охлаждается холодным осушенным газом, прошедшим сепаратор. После холодильника газ через штуцер 2 попадает в сепаратор 3, где от него отделяется сконденсированная жидкость — вода и конденсат. Сухой газ из сепаратора идет на последующую доочистку, проходя перед этим через холодильник 1. Для стабилизации и оптимизации работы установки необходимо знать зависимость температуры и давления в сепараторе от производительности установки и параметров сырого газа. Для условий стационарного режима работы установки, которыми мы ограничимся, подобная зависимость строится на основе законов сохранения энергии.

¹ Из конденсата получают бензин, керосин, дизельное топливо, различные растворители.

На рис. 16 обозначения T , G и C с нижними индексами соответствуют значениям температуры, расхода и теплоемкости газа в различных точках технологической схемы.

Если в качестве хладагента через холодильник прокачивать газ в количестве G с температурой T_2 и теплоемкостью C_2 , то температура сырого газа на выходе из холодильника будет определяться равенством

$$T_1 = A_1 T_0 + A_2 T_2, \quad (6.47)$$

где $A_1 = (1-B)/(D-B)$; $A_2 = (D-1)/(D-B)$

Здесь $B = C_1/C_2$; $D = \exp\{kF/G_0[(1/C_1) - (1/C_2)]\}$,

где F — поверхность теплообмена в холодильнике; k — поправочный коэффициент.

При прохождении через штуцер, на котором теряется давление Δp , температура газа снижается за счет его адиабатического расширения. Температура газа на выходе штуцера определяется формулой

$$T_2 = T_1 - \kappa \Delta p, \quad (6.48)$$

где κ — коэффициент Джоуля — Томсона.

Уравнения (6.47) и (6.48) образуют полную систему уравнений теплового баланса для рассматриваемой схемы. Решая их относительно T_2 , получаем

$$T_2 = \frac{A_1 T_0 - \kappa \Delta p}{1 - A_2}.$$

Давление в сепараторе

$$p_2 = p_0 - \Delta p_x - \Delta p - \Delta p_T, \quad (6.49)$$

где Δp_x и Δp_T — потери давления в холодильнике и соединительных трубопроводах. Величины p_2 и T_2 однозначно определяют давление насыщенных паров в газе.

Для технологических схем, включающих более одного холодильника, процедура построения стационарной модели сохраняется. Для каждого элемента схемы последовательно надо записать уравнения теплового баланса и баланса по давлениям. Совокупность этих уравнений будет полностью определять процесс.

Основные идеи построения динамических моделей НТС можно найти в работе [36].

§ 42. Процесс абсорбционной очистки газа

Процесс абсорбционной очистки газа осуществляется в противоточных колоннах насадочного или тарельчатого типа. В зависимости от качества сырого газа, требуемой степени осу-

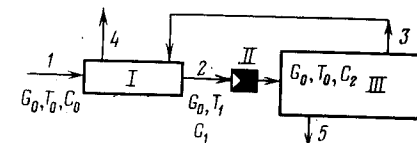


Рис. 16. Принципиальная схема одноступенчатой установки низкотемпературной сепарации:

I — холодильник; II — дроссель; III — сепаратор; 1 — сырой газ; 2 — охлажденный газ; 3 — осушенный газ; 4 — газ с выхода установки; 5 — вода и конденсат

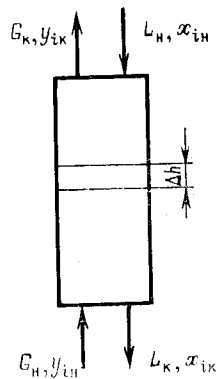


Рис. 17. Схема противотока к модели абсорбционной колонны

шки и конструктивных особенностей применяемой схемы могут реализоваться одно- и двухступенчатые процессы абсорбции в одной или двух колоннах. Чтобы не усложнять задачу, рассмотрим построение статической модели простейшей абсорбционной колонны (рис. 17).

Рассмотрим некоторый дифференциально малый участок колонны высотой dh . В единицу времени на этом участке из фазы G в фазу Z перейдет дифференциально малое количество воды dG_1 , которое согласно соотношению (5.67) можно записать в виде

$$dG_1 = j_1 = k_y (y_1 - y_1^p) dh = k_x (x_1 - x_1^p) dh. \quad (6.50)$$

Из условия материального баланса (5.60) следует

$$dG_1 = G dy_1 = L dx_1, \quad (6.51)$$

где L и G — расходы соответствующих фаз.

Исключив из уравнений (6.50) и (6.51) величину dG , получим

$$\begin{aligned} \frac{k_y}{G} dh &= \frac{dy_1}{y_1^p - y_1}; \\ \frac{k_x}{L} dh &= \frac{dx_1}{x_1 - x_1^p}. \end{aligned} \quad (6.52)$$

Чтобы проинтегрировать эти уравнения, их необходимо дополнить соотношениями для определения величин k_y , k_x , L , G , y_1^p и x_1^p .

Коэффициенты массопередачи k_y и k_x зависят от конструктивных особенностей колонны, содержания воды в абсорбенте, расходов газа и абсорбента. В общем случае можно записать

$$k_y = f_1(y_1, L, G); \quad k_x = f(x_1, L, G). \quad (6.53)$$

Конкретный вид этих выражений можно найти в специальной литературе по расчету массообменных аппаратов.

Величины L и G в первом приближении можно считать постоянными по высоте аппарата, а для вычисления y_1^p и x_1^p следует воспользоваться соотношением (5.64)

$$y_1^p = \frac{\alpha x_1^p}{1 + (\alpha - 1) x_1^p}. \quad (6.54)$$

Стационарная модель насадочной абсорбционной колонны полностью определяется системой уравнений (6.52), (6.53) и (6.54).

Для абсорбционной колонны тарельчатого типа система уравнений (6.52) справедлива для каждой тарелки в отдельности. Если предположить, что на каждой тарелке колонны высота слоя жидкости одинакова и равна h_0 , коэффициент массопередачи для i -й тарелки равен $k_y^{(i)}$, содержание воды в газовой фазе на i -й тарелке равно $y_y^{(i)}$, а величина y_1^p постоянна по высоте слоя жидкости на тарелке, то, интегрируя первое уравнение в (6.52), получаем

$$-\frac{k}{G} h = \ln (y_1^p - y_1^{(i)}(h)) = C. \quad (6.55)$$

Постоянную интегрирования C определим из условия, что величина y_1 в низу тарелки, т. е. при $h=0$, соответствует величине y_1 в паровой фазе над предыдущей ($i-1$)-й тарелкой. Тогда

$$C = -\ln (y_1^p - y_1^{(i-1)}). \quad (6.56)$$

Полагая в (6.55) $h=h_0$, $y_1^{(i)} = y_1^{(i)}(h_0)$, с учетом (6.56) получим, что содержание в газовом потоке над жидкой фазой i -й тарелки определяется рекуррентной формулой:

$$y_1^{(i)} = y_1^p + (y_1^{(i-1)} - y_1^p) \exp \left\{ -\frac{k}{G} h_0 \right\}. \quad (6.57)$$

Вместо уравнения материального баланса в дифференциальной форме (6.51) для тарельчатой колонны естественно записать аналогичные уравнения для каждой тарелки:

$$G (y_1^{(i-1)} - y_1^{(i)}) = L (x_1^{(i)} - x_1^{(i+1)}). \quad (6.58)$$

Уравнения (6.54), (6.57), (6.53) и (6.58) образуют полную систему уравнений для описания стационарного режима адсорбционной колонны тарельчатого типа.

§ 43. Процесс регенерации гликолей

Процесс регенерации гликолей относится к классу процессов, решаемых бинарной ректификацией: исходную двухкомпонентную смесь воды с гликолем надо разделить на компоненты. Этот процесс обычно реализуется в аппаратах колонного типа (рис. 18). Верхняя часть колонны, расположенная выше точки ввода сырья, называется укрепляющей частью колонны, а ее нижняя часть — исчерпывающей (отпарной) частью колонны или кубом колонны. Обводненный гликоль, предварительно нагретый до кипения, поступает в среднюю часть колонны. Температура кипения гликолей выше температуры кипения воды, поэтому газообразная фаза колонны в основном состоит из паров воды.

Пары воды отбираются с верха колонны, а жидкая фаза из осушенного гликоля — с ее нижней части. В куб колонны подводится тепло для испарения оставшейся в гликоле воды. В верхнюю часть колонны вводится поток жидкой фазы L_1 ,

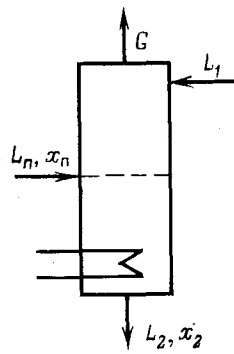


Рис. 18. Принципиальная схема потоков в колонне регенерации гликолей

называемой потоком орошения (или флегмой). Поток L_1 образован из части сконденсированного потока G .

Проведем аналогию между описаниями адсорбционной колонны, изображенной на рис. 17, и колонной регенерации: если в колонне регенерации рассмотреть отдельно укрепляющую и отпарную части, то для каждой из них должны быть справедливы общие уравнения материальных балансов для колонны, рассмотренные в предыдущем параграфе. Исключение составит только область ввода питания, в материальном балансе которой надо учесть величину L_n .

Пусть регенерация проводится в колонне тарельчатого типа. Запишем систему уравнений материальных балансов по колонне, начиная с ее отпарной части.

Предполагая, что в кубе колонны фазы находятся в состоянии равновесия, а товарный продукт гликоля, уходящий с низа колонны, содержит x_2 воды, получаем

$$(L_n + L_1)x_1 - L_2x_2 - Gy_1^p(x_2) = 0. \quad (6.59)$$

Для всех тарелок колонны будут справедливы уравнения типа (6.57) для состава паровой фазы:

$$y_i = y^p + (y_1^{(i-1)} - y_1^p) \exp\left\{-\frac{k}{G} h_0\right\}. \quad (6.60)$$

Материальные балансы на тарелках колонны будут следующими: для тарелок отгонной части

$$(L_n + L_1)(x_1^{(i+1)} - x_1^{(i)}) + G(y_1^{(i-1)} - y_1^{(i)}) = 0, \quad i = \overline{1, k-1}; \quad (6.61)$$

для тарелки питания, которая идет под номером k ,

$$L_n x_n + L_1 x_1^{(k+1)} - (L_n + L_1) x_1^{(k)} + G(y_1^{(k-1)} - y_1^{(k)}) = 0; \quad (6.62)$$

для тарелок укрепляющей части

$$L_1(x_1^{(i+1)} - x_1^{(i)}) + G(y_1^{(i-1)} - y_1^{(i)}) = 0, \quad i = \overline{k+1, n}. \quad (6.63)$$

Содержание воды в потоке флегмы будем обозначать x^{n+1} . Дополнив эту систему уравнениями равновесного состояния (6.54) и уравнениями зависимости коэффициентов массопередачи от параметров фаз (6.53), получим полную систему уравнений для расчета параметров парожидкостных потоков при стационарном режиме работы колонны.

§ 44. Процесс дегазации конденсата

Как уже отмечалось, процесс дегазации конденсата может содержать одну или несколько последовательно работающих ступеней. Поскольку все ступени процесса идентичны, рассмот-

рим только одну. Богатый легкими фракциями конденсат с компонентным составом x_i^H и расходом L поступает в полую емкость, в которой поддерживается давление p и устанавливается температура T (рис. 19). Поскольку температура T при давлении p выше точки кипения легких углеводородов, происходит разгазирование конденсата.

Газ и жидкость с компонентными составами y_i и x_i непрерывно отбираются из емкости с расходами G и L соответственно.

Для непрерывного стационарного процесса дегазации (см. рис. 18) должны выполняться следующие уравнения материального баланса:

$$L = G + L_1;$$

$$Lx_i^H = Gy_i + L_1x_i, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (6.64)$$

Исключив L_1 из второго уравнения, получим

$$Lx_i^H = Gy_i + (L - G)x_i, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (6.65)$$

Полагая, что дегазация идет при равновесном фазовом состоянии, запишем $(n-1)$ уравнений равновесия. Согласно (6.65) они будут иметь вид

$$y_i = N\alpha_{in}x_i, \quad N = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_{in}x_i}, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (6.66)$$

Исключив из уравнений (6.65) и (6.66) y_i , получим

$$Lx_i^H = (GN\alpha_{in} + L - G)x_i, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (6.67)$$

Эта система уравнений вместе с зависимостями α_{in} от температуры, давления и свойств системы полностью определяет стационарное проведение процесса разгазирования газового конденсата.

§ 45. Основы процессов подготовки нефти и постановка задачи их моделирования

Практически вся добываемая нефть содержит свободный газ, пластовую воду, которая образует с ней водонефтяную эмульсию, и различные механические примеси. Согласно существующей технологии сырая нефть со скважин направляется на установки комплексной подготовки нефти (УКПН), где от нее отделяются газ, вода, механические примеси и соли.

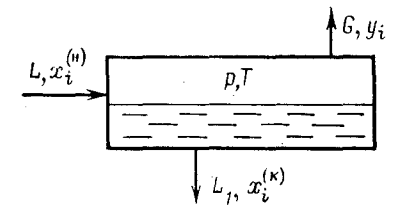


Рис. 19. Принципиальная схема сепарации газа от конденсата

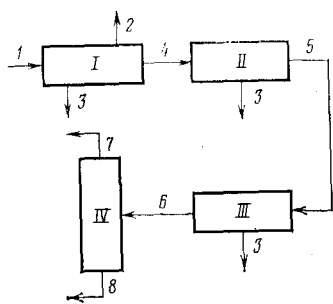


Рис. 20. Принципиальная схема установки подготовки нефти:

I — установка сепарации газа от нефти; *II* — установка обезвоживания нефти; *III* — установка обессоливания нефти; *IV* — установка стабилизации нефти; 1 — сырая нефть; 2 — газ; 3 — вода; 4 — отсепарированная нефть; 5 — обезвоженная нефть; 6 — обессоленная нефть; 7 — газ; 8 — товарная нефть

Сырая нефть поступает на сепарационные установки, где от нее отделяется свободный газ (рис. 20). В зависимости от газового фактора нефти, способности ее к пенообразованию и требуемой четкости отделения легких углеводородных фракций от нефти сепарация газа проводится в одну, две и более ступеней¹. По принципу действия и основному конструктивному исполнению установки для сепарации газа от нефти практически идентичны установкам для сепарации газа от конденсата. Математические описания этих процессов также совпадают.

После сепарации газа нефть поступает на установку обезвоживания, где от нее отделяется пластовая вода. При обводненности сырой нефти выше 10% процесс обезвоживания обычно проводится в две ступени. Сначала осуществляется предварительный сброс пластовой воды в резервуарах, затем нефть подогревают и направляют на установки глубокого обезвоживания.

При высокой минерализации пластовых вод обезвоженная нефть поступает на установки обессоливания, а затем на установки стабилизации нефти². Принцип работы и задачи, решаемые на установках стабилизации, такие же, как и на установках стабилизации газового конденсата, — отделить легкокипящие углеводородные фракции от основного сырья.

Поскольку процесс сепарации газа от жидкой углеводородной фракции был рассмотрен в предыдущем параграфе, дальше будут рассмотрены только два процесса — глубокое обезвоживание и обессоливание нефти.

Пластовые воды, добываемые с нефтью и образующие с ней дисперсную систему, содержат, как правило, значительное количество растворенных минеральных солей. Результаты исследований минерального состава пластовых вод показывают, что основную долю растворенных веществ составляют хлориды натрия, магния и кальция. Кроме них могут присутствовать и другие соли, но в отличие от хлоридов, содержание которых исчисляется процентами и десятками процентов от общего количества растворенного вещества, содержание остальных солей

¹ В отдельных случаях число ступеней может достигать 10—12.

² Последние могут и не входить в состав УКПН.

измеряется сотыми, тысячными и еще меньшими долями. В связи с этим минерализацию пластовой воды измеряют по содержанию ионов хлора в единице объема с последующим пересчетом на эквивалент натриевых солей.

Помимо определения минерализации свободной пластовой воды при подготовке нефти к переработке измеряют содержание солей в единице объема нефти. Сама нефть не содержит хлорных солей. Они попадают в нее вместе с эмульгированной водой.

Абсолютное содержание хлоридов в обводненной нефти не дает представления о степени минерализации пластовых вод, поэтому одновременно с солями определяют и обводненность нефти. Последнюю принято измерять в процентах.

Во всех известных до настоящего времени промышленных процессах обезвоживания и обессоливания нефтей основным оборудованием является аппарат для разделения водонефтяной эмульсии путем отстаивания эмульгированной воды. Попадая в нижнюю часть аппарата, капли переходят в сплошной слой воды, так называемую дренажную воду, которую выводят из аппарата.

При обезвоживании нефти в ней, естественно, уменьшается и количество солей, так как оно пропорционально содержанию воды в нефти. Однако процессом обессоливания принято называть только такой процесс, в котором перед подачей исходной эмульсии в аппарат для отделения воды в нефть добавляют пресную воду, которую называют промывочной. Эту воду дробят и интенсивно перемешивают с исходной эмульсией. В процессе перемешивания капли пластовой и пресной воды многократно коалесцируют и дробятся, что приводит к выравниванию в них концентрации солей. Результирующая концентрация солей будет меньше их концентрации в пластовой воде, поэтому после обезвоживания вновь образованной эмульсии в ней останется меньше солей, чем это было бы без добавления промывочной воды.

§ 46. Моделирование процесса разделения водонефтяных эмульсий в отстойном аппарате

Аппараты, в которых эмульсия разделяется в результате отстаивания взвешенных частиц в поле сил тяжести, широко используются в процессах обезвоживания и обессоливания нефтей. Поставим задачу построить стационарную модель такого аппарата для определения остаточной воды в товарной нефти в зависимости от качества сырой нефти, ее вязкости, гидродинамики аппарата и т. д.

Пусть $n_{\text{вых}}(V)$ и $n_{\text{вх}}(V)$ — распределения капель воды по объемам в эмульсии на входе и выходе отстойника. Для простоты будем считать, что коалесценции (слияния) капель внутри аппарата не происходит. Для количественного описания

процесса разделения в таком аппарате введем понятие передаточной функции аппарата, которую определим как отношение

$$\mathcal{L}(V) = n_{\text{вых}}(V)/n_{\text{вх}}(V). \quad (6.68)$$

Как видно из этого соотношения, $\mathcal{L}(V)$ характеризует непрерывную совокупность коэффициентов усиления аппарата для различных объемов капель. Из теории автоматического регулирования известно, что коэффициент усиления линейного объекта численно равен величине его передаточной функции, характеризующей стационарное состояние объекта. Функцию $\mathcal{L}(V)$ будем называть передаточной функцией отстойного аппарата. Из определения $\mathcal{L}(V)$ следует, что это положительно определенная функция, удовлетворяющая неравенству $0 < \mathcal{L}(V) < 1$. Ее вид определяется процессом осаждения эмульгированных капель, который зависит от размеров капель, вязкости нефти, производительности отстойника, гидродинамического режима в аппарате и др. Таким образом, передаточная функция является комплексной характеристикой и зависит от большого числа технологических и конструктивных параметров процесса разделения эмульсий.

Понятие передаточной функции применимо не только к отдельно взятому отстойнику. Его можно распространить и на группу отстойников, соединенных по определенной схеме. Пусть n аппаратов с передаточными функциями $\mathcal{L}_i(V)$ соединены параллельно и производительность каждого из них Q_i . С учетом определения (6.68) в нефти на выходе всей схемы в единице объема будет содержаться

$$n_{\text{вых}}(V) = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}_i(V) n_{\text{вх}}(V) \frac{Q_i}{Q}, \quad Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (6.69)$$

капель воды. Подставив отсюда $n_{\text{вых}}(V)$ в (6.69), получим

$$\mathcal{L}(V) = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n \mathcal{L}_i(V) Q_i. \quad (6.70)$$

Рассмотрим два последовательно соединенных отстойника с передаточными функциями $\mathcal{L}_1(V)$ и $\mathcal{L}_2(V)$. Пусть $n_{\text{вых}}^{(1)}(V)$ — количество капель воды в объеме V на выходе первого и соответственно на входе второго аппарата. Тогда передаточная функций всей схемы

$$\mathcal{L}(V) = \frac{n_{\text{вых}}(V)}{n_{\text{вх}}(V)} = \frac{n_{\text{вых}}^{(1)}(V)}{n_{\text{вх}}(V)} \cdot \frac{n_{\text{вых}}(V)}{n_{\text{вых}}^{(1)}(V)} = \mathcal{L}_1(V) \mathcal{L}_2(V). \quad (6.71)$$

Обобщая этот результат, легко прийти к выводу, что если имеется цепочка из n последовательно включенных аппаратов с передаточными функциями $\mathcal{L}_i(V)$, то передаточная функция всей схемы будет определяться равенством

$$\mathcal{L}(V) = \prod_{i=1}^n \mathcal{L}_i(V). \quad (6.72)$$

Остаточное содержание воды в нефти на выходе отстойного аппарата определяется равенством

$$W_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} V n_{\text{вых}}(V) dV. \quad (6.73)$$

Выражая $n_{\text{вых}}(V)$ через передаточную функцию $\mathcal{L}(V)$ (6.68), получаем

$$W_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} V \mathcal{L}(V) n_{\text{вх}}(V) dV. \quad (6.74)$$

Поскольку распределение $n_{\text{вх}}(V)$ связано с плотностью распределения капель по размерам $p(V)$ равенством

$$n_{\text{вх}}(V) = N p(V), \quad N = \frac{W_{\text{вх}}}{\bar{V}}, \quad (6.75)$$

где N — суммарное количество капель в единице объема; $W_{\text{вх}}$ — обводненность сырой нефти; \bar{V} — средний объем капель эмульсии на входе в отстойник. Заменяя $n_{\text{вх}}(V)$ в (6.74) на основании равенства (6.75), получаем коэффициент усиления отстойного аппарата на воде:

$$\mathcal{K} = \frac{1}{\bar{V}} \int_0^{\infty} V \mathcal{L}(V) p(V) dV, \quad \mathcal{K} = \frac{W_{\text{вых}}}{W_{\text{вх}}}. \quad (6.76)$$

Каждая конструкция отстойника будет обладать своей передаточной функцией, которую можно рассчитать теоретически или измерить экспериментально. Наиболее просто определяется передаточная функция для отстойника с вводом сырья через распределительное устройство, расположенное в нижней части аппарата, и отбором сырья из верхней части аппарата. В этом случае оседающие капли будут двигаться против потока нефти, поэтому абсолютная скорость осаждения капли объемом V сложится из скорости движения сплошной фазы v , направленной вверх, и скорости осаждения капли $v_k(V)$, направленной вниз. Если в аппарате соблюдается ламинарный режим движения жидкости, то все капли, для которых скорость сплошной фазы больше скорости их осаждения, не осядут, а останутся в товарной нефти. Поэтому будет справедливо равенство

$$n_{\text{вых}}(V) = n_{\text{вх}}(V) H\left(1 - \frac{v_k(V)}{v}\right), \quad (6.77)$$

где $H(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда.

Подставив (6.77) в (6.68), получим

$$\mathcal{L}(V) = H\left(1 - \frac{v_k(V)}{v}\right). \quad (6.78)$$

График этой функции приведен на рис. 21. Через отстойные аппараты с такой передаточной функцией будут проходить все капли, для которых скорость осаждения меньше скорости вос-

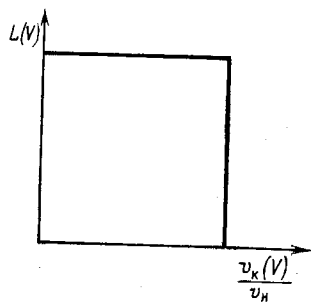


Рис. 21. График передаточной функции отстойного аппарата с нижней подачей сырья

методами седиментационного анализа или прямого счета различных фракций.

Получаемые численные значения обычно неудобны для дальнейшего анализа и использования при расчетах, поэтому их, как правило, аппроксимируют каким-либо известным параметрическим распределением. В качестве аппроксимирующего распределения часто используют гамма- и логарифмически-нормальное распределения. В ряде случаев оба эти распределения приводят к удовлетворительным результатам одновременно, что довольно просто можно объяснить на основе диаграмм Джонсона — Пирсона.

Рассмотрим случай, когда плотность распределения $p(V)$ является гамма-распределением со средним размером \bar{V} и параметров формы β :

$$p(V) = 1/\Gamma(\beta) (\beta/\bar{V})^\beta V^{\beta-1} \exp(-\beta V/\bar{V}). \quad (6.79)$$

Подставив (6.79) и (6.76), получим

$$\mathcal{H} = 1/\bar{V} \int_0^\infty V H \left(1 - \frac{v_k(V)}{v}\right) 1/\Gamma(\beta) (\beta/\bar{V})^\beta V^{\beta-1} V \exp(-\beta V/\bar{V}) dV. \quad (6.80)$$

Приравнивая скорость капли к скорости восходящего потока нефти, определяем критический объем каплей $V_{кр}$. Капли большего объема уже не выносятся из отстойника, а оседают в нем. Поскольку из определений $V_{кр}$ и передаточной функции следует, что последняя равна нулю при $V > V_{кр}$, у интеграла в правой части (6.80) верхний предел можно заменить на $V_{кр}$ и

ходящего потока жидкости. Из равенства $v_k(V) = v$ можно определить критический объем каплей $V_{кр}$. Все капли с меньшим объемом будут выноситься из аппарата с товарной нефтью¹.

Определение остаточной воды в подготовленной нефти эквивалентно вычислению коэффициента усиления отстойного аппарата по воде при заданных передаточной функции отстойника и плотности распределения $p(V)$ эмульгированных каплей по размерам сырой нефти. Последняя функция определяется экспериментально

опустить в подынтегральном выражении функцию Хевисайда. Тогда

$$\mathcal{H} = (1/\Gamma(\beta)) (1/\beta) \int_0^{V_{кр}} V/\bar{V} (\beta/\bar{V})^\beta V^{\beta-1} \exp(-\beta V/\bar{V}) dV = \\ = (1/\Gamma(\beta)) (1/\beta) \int_0^{\beta V_{кр}/\bar{V}} z^\beta e^{-z} dz = \gamma^*(\beta+1, \beta V_{кр}/\bar{V}), \quad z = \beta V/\bar{V}, \quad (6.81)$$

$\gamma^*(a, x) = (1/\Gamma(a)) \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt$ — нормированная неполная гамма-функция. При целом значении a , $\gamma^*(a, x)$ можно раскрыть по правилу

$$\gamma^*(a, x) = 1 - \left(1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^{a-1}}{(a-1)!}\right) e^{-x}. \quad (6.82)$$

Полагая в (6.81) значения β целыми, на основании (6.82) получаем следующее выражение для расчета коэффициента усиления отстойного аппарата с нижней подачей сырья:

$$\mathcal{H} = 1 - e^{-x} \sum_{i=0}^{\beta} \frac{x^i}{i!}, \quad x = \beta V_{кр}/\bar{V}. \quad (6.83)$$

§ 47. Моделирование процесса обессоливания нефтей

В настоящее время глубокое обессоливание нефтей везде проводят по единой принципиальной схеме (рис. 22). На установку обессоливания поступает сырая нефть с обводненностью $W_{вх}$, содержащая $S_{вх}$ солей. Перед I ступенью нефть нагревают и добавляют к ней деэмульгатор и промывочную воду $W_{пр}^{(1)}$. После интенсивного перемешивания нефти с промывочной водой образовавшаяся эмульсия поступает в аппарат для отделения воды — дегидратор. Вместе с водой из нефти удаляются соли. С выхода I ступени нефть с обводненностью $W_{вых}^{(1)}$, содержащая $S_{вых}^{(1)}$ солей, поступает на II ступень обессоливания. Перед II ступенью к нефти опять добавляют пресную промывочную воду $W_{пр}^{(2)}$, которую перемешивают с нефтью. После отделения воды из нефти на II ступени товарную нефть, содержащую $W_{вых}^{(2)}$ воды и $S_{вых}^{(2)}$ солей, направляют на дальнейшую переработку.

Рассмотрим сначала одноступенчатую схему обессоливания, которая обеспечивает среднее остаточное содержание воды и солей в нефти соответственно $W_{вых}^{(1)}$ и $S_{вых}^{(1)}$. Обозначая C концентрацию солей в отдельных каплях водонефтяной эмульсии на выходе из аппарата, а $p(C)$ плотность распределения этой концентрации, получаем

$$S_{вых}^{(1)} = W_{вых}^{(1)} \int_0^\infty C p(C) dC = W_{вых}^{(1)} \bar{C}. \quad (6.84)$$

¹ Примеры расчета передаточных функций для аппаратов других конструкций приведены в работе [22].

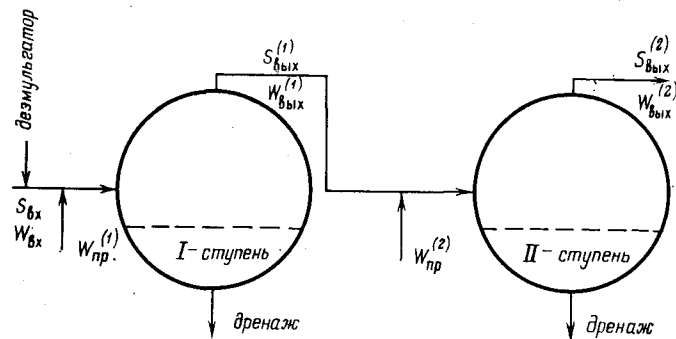


Рис. 22. Принципиальная схема двухступенчатого обессоливания нефтей

Здесь \bar{C} — средняя концентрация солей. Верхние индексы показывают порядковый номер аппарата в технологической схеме.

Средняя концентрация солей в остаточной воде зависит от качества смешения пластовой и промывочной воды. В процессе смешения в результате многократно повторяющихся актов коалесценции капель и последующего их дробления концентрация солей в отдельных каплях эмульсии постепенно выравнивается. В предельном случае концентрация будет полностью выравнена, т. е. плотность распределения станет дельта-функцией. Средняя концентрация солей \bar{C} в этом случае определяется равенством

$$\bar{C} = \frac{S_{вх} + S_{пр}^{(1)}}{W_{вх} + W_{пр}^{(1)}} = \left(C_0 + \frac{C_{пр}^{(1)} W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right) \left(1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right), \quad (6.85)$$

где $S_{вх}$ — содержание солей в сырой нефти; $S_{пр}^{(1)}$ — содержание солей в промывочной воде; $W_{вх}$ — содержание воды в сырой нефти; $W_{пр}^{(1)}$ — количество подаваемой промывочной воды; C_0 — средняя концентрация солей в пластовой воде; $C_{пр}^{(1)}$ — средняя концентрация солей в промывочной воде. В дальнейшем процесс смешения, приводящий к полному выравниванию концентраций солей в отдельных каплях эмульсии, будем называть полным смешением, а соответствующее ему значение содержания солей на выходе установки — потенциальной возможностью установки. При полном смешении соотношение (6.85) можно записать в виде

$$S_{вых}^{(1)} = \left(C_0 + \frac{C_{пр}^{(1)} W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right) \left(1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right)^{-1} W_{вых}^{(1)}. \quad (6.86)$$

Для случая, когда $S_{вх} \gg S_{пр}^{(1)}$, который обычно реализуется в практических условиях, соотношение (6.88) можно представить в виде

$$S_{вых}^{(1)} = C_0 W_{вых}^{(1)} \left(1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right)^{-1}. \quad (6.87)$$

Считая остаточные содержания солей и воды в нефти после I ступени параметрами сырья для следующей ступени, легко получить выражение для остаточного содержания солей в нефти после II ступени:

$$S_{вых}^{(2)} = \left[\frac{C_0 + \frac{C_{пр}^{(1)} W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}}}{\left(1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right) \left(1 + \frac{W_{пр}^{(2)}}{W_{вых}^{(1)}} \right)} + \frac{C_{пр}^{(2)}}{1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вых}^{(2)}}} \right] W_{вых}^{(2)}. \quad (6.88)$$

Если содержанием солей в промывочной воде можно пренебречь, (6.88) можно записать в виде

$$S_{вых}^{(2)} = C_0 W_{вых}^{(2)} \left[\left(1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}} \right) \left(1 + \frac{W_{пр}^{(2)}}{W_{вых}^{(1)}} \right) \right]^{-1}. \quad (6.89)$$

Из (6.89) и (6.87) видно, что предельное остаточное содержание солей в нефти прямо пропорционально средней концентрации солей в пластовой воде C_0 и остаточному количеству воды в нефти $W_{вых}^{(1)}$ (или $W_{вых}^{(2)}$). Средняя концентрация солей в пластовой воде нефтей СССР изменяется от нескольких сот миллиграммов на 1 л при 1 %-ной обводненности (нефти Тюмени) до нескольких тысяч миллиграммов на 1 л (нефти Волго-Уральской области). Современные конструкции обессоливающих аппаратов при правильном ведении процесса обеспечивают количество остаточной воды в нефти не более 0,2 %.

Проанализируем чувствительность работы обессоливающих установок к качеству смешения. При неполном смешении плотность распределения концентрации солей в каплях остаточной воды (6.84) будет некоторой неизвестной функцией. Наиболее интересным, с практической точки зрения, можно считать случай, когда распределение $p(C)$ является бимодальным и его максимумы ярко выражены и разнесены друг от друга. Это будет соответствовать модели, когда часть мелких капель соленой воды суммарным объемом Δ не смешивается с промывочной водой и будет обладать исходной концентрацией солей C_0 . Остальная вода полностью смешивается, концентрация солей в отдельных каплях выравнивается и может быть вычислена по формуле

$$C = C_0 \left(1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх} - \Delta} \right)^{-1}. \quad (6.90)$$

Такая модель для плотности распределения концентрации солей по отдельным каплям не должна сильно отличаться от

распределений, встречающихся на практике, так как известно, что капли пластовой воды плохо коалесцируют с промывочной водой из-за бронирующих оболочек, образованных различными поверхностно-активными веществами, содержащимися в нефти.

Остальное содержание солей в нефти при одноступенчатой схеме обессоливания для рассматриваемой модели неполного смешения можно записать в виде¹

$$S_{\text{ВЫХ}}^{(1)} = C_0 \left[\frac{W_{\text{ВЫХ}}^{(1)}}{1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(1)}}{W_{\text{ВХ}} - \Delta}} + \Delta \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(1)}}{W_{\text{ВХ}} - \Delta}} \right) \right]. \quad (6.91)$$

Если $W_{\text{ВХ}} \gg \Delta$, что для практики наиболее интересно, соотношение (6.91) можно упростить

$$S_{\text{ВЫХ}}^{(1)} = C_0 W_{\text{ВЫХ}}^{(1)} \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(1)} \Delta}{W_{\text{ВХ}} W_{\text{ВЫХ}}^{(1)}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(1)}}{W_{\text{ВХ}}} \right)^{-1}. \quad (6.92)$$

Рассмотрим двухступенчатую схему обессоливания при неполном смешении перед ступенями. Пусть работа первого аппарата удовлетворяет соотношению (6.92), а при смешении перед II ступенью с промывочной водой идеально перемешивается вся эмульгированная вода со средней концентрацией солей, определяемой выражением (6.90), и часть не смешавшейся ранее воды объемом $k\Delta$. В этом случае остаточное содержание солей в нефти на выходе второго аппарата определится соотношением

$$S_{\text{ВЫХ}}^{(2)} = C_0 \left\{ \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(1)}}{W_{\text{ВХ}} - \Delta} \right)^{-1} \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(2)} + k\Delta}{W_{\text{ВЫХ}}^{(1)} - \Delta} \right)^{-1} + \left[\frac{k}{W_{\text{ВЫХ}}^{(1)} - \Delta} \left(1 + \frac{k\Delta}{W_{\text{ВЫХ}}^{(2)}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(2)} + k\Delta}{W_{\text{ВЫХ}}^{(1)} - \Delta} \right)^{-1} + \frac{1-k}{W_{\text{ВЫХ}}^{(2)}} \right] \Delta \right\} W_{\text{ВЫХ}}^{(2)}. \quad (6.93)$$

Учитывая, что для реальных технологических схем всегда выполняются условия $W_{\text{ВХ}} \gg \Delta$ и $W_{\text{ПР}}^{(2)} \gg k\Delta$, соотношение (6.93) можно упростить и привести к виду

$$S_{\text{ВЫХ}}^{(2)} = C_0 \left[W_{\text{ВЫХ}}^{(2)} \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(1)}}{W_{\text{ВХ}}} \right)^{-1} \left(1 + \frac{W_{\text{ПР}}^{(2)}}{W_{\text{ВЫХ}}^{(1)}} \right)^{-1} + \Delta (1-k) \right]. \quad (6.94)$$

Соотношения (6.92) и (6.94) определяют допустимые классы моделей процесса обессоливания и могут быть использованы для решения задач идентификации и исследования законов его управления.

¹ Это соотношение получено в предположении малой концентрации солей в промывочной воде.

ГЛАВА 7.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРАХ

§ 48. Принципы построения и классификация автоматических регуляторов

Система автоматического управления может быть представлена в виде сочетания двух элементов: объекта управления и управляющего устройства (рис. 23).

На управляющее устройство УУ поступает информация о целях и задачах управления (задание Z) и информация x о состоянии объекта управления ОУ. На основе полученной информации управляющее устройство вырабатывает управляющее воздействие y .

Для реализации системы управления в соответствии с этой схемой необходимо знать (получить) математическую модель объекта управления (см. раздел первый) и выбрать управляющее устройство.

Одна из задач при построении систем управления — поддержание наиболее существенных технологических параметров объекта управления около их наперед заданных значений (автоматическое регулирование). В таких случаях в качестве управляющего устройства используются *автоматические регуляторы*.

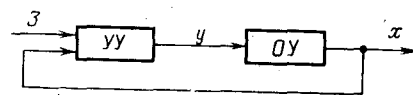
В функциональной схеме системы управления (рис. 24) элемент сравнения ЭС сравнивает текущее значение регулируемого параметра x_t , вырабатываемого измерительным устройством ИзУ, с его заданным значением x_z , поступающим от датчика Z , и посылает сигнал рассогласования (отклонения) ϵ на вход формирующего устройства ФУ.

Роль последнего — получение определенного *закона регулирования*, под которым понимается зависимость между рассогласованием ϵ и выходной величиной регулятора y .

Элемент сравнения и формирующее устройство вместе составляют *регулирующее устройство*.

Сигнал с выходе формирующего устройства поступает на вход исполнительного устройства ИсУ, который реализует выработанный регулятором закон регулирования. Формирующее устройство обычно реализуется либо в виде последовательного соединения усилителя У и корректирующего элемента К (рис. 25, а), либо путем охвата усилителя (рис. 25, б) или ряда

Рис. 23. Общая схема системы управления



элементов в прямой цепи регулятора обратной связи. Иногда оба способа используются совместно, т. е. в регуляторе применяются как последовательное включение корректирующего элемента, так и обратная связь.

Отметим одно замечательное свойство формирующих устройств с обратными связями (см. рис. 25, б). Обозначим передаточные функции усилителя $W_y(p)$, а корректирующего элемента $W_{oc}(p)$. Тогда передаточная функция формирующего устройства будет определяться выражением

$$W_{\text{фy}}(p) = \frac{W_y(p)}{1 + W_y(p) W_{oc}(p)}. \quad (7.1)$$

При $W_y(p) = K_y$ получим

$$W_{\text{фy}}(p) = \frac{K_y}{1 + K_y W_{oc}(p)} \quad (7.2)$$

или

$$W_{\text{фy}}(p) = \frac{1}{1/K_y + W_{oc}(p)}. \quad (7.3)$$

Так как усилители современных автоматических регуляторов характеризуются достаточно большими коэффициентами усиления, то при $K_y \rightarrow \infty$ получим

$$W_{\text{фy}}(p) \approx \frac{1}{W_{oc}(p)}. \quad (7.4)$$

Таким образом, при достаточно большом коэффициенте усиления в прямой цепи передаточная функция формирующего устройства, а следовательно, и закон регулирования определяются передаточной функцией звена обратной связи. Это свойство широко используется при построении промышленных регуляторов.

На рис. 26 представлена функциональная схема системы управления с типовым современным автоматическим регулятором.

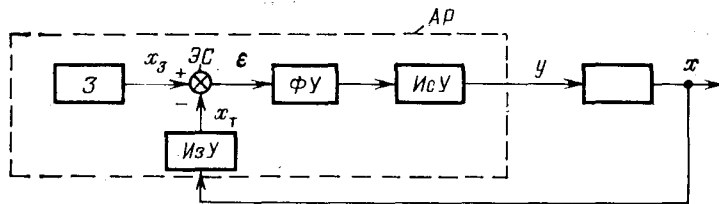


Рис. 24. Функциональная схема системы управления

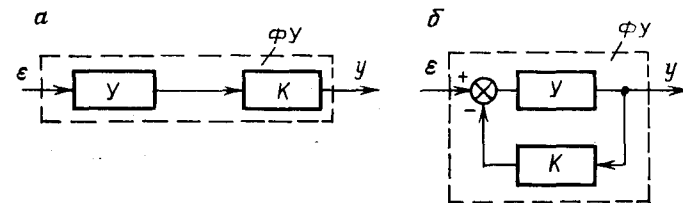


Рис. 25. Схемы реализации формирующих устройств

Измерительное устройство реализуется в нем в виде чувствительного элемента ЧЭ и преобразователя Пр со стандартизованным на входе. Задатчик вырабатывает также стандартизованный сигнал, аналогичный по своей природе сигналу измерительного устройства.

Исполнительное устройство включает в себя исполнительный механизм ИМ (привод) и регулирующий орган РО. Здесь сигнал формирующего устройства преобразуется в перемещение регулирующего органа. Такой регулятор принято называть регулятором непрямого действия. В нем текущее x_t и заданное x_3 значения регулируемого параметра, а также выходной сигнал формирующего устройства представлены в виде стандартизованных сигналов, для получения которых используется дополнительный источник энергии.

В зависимости от вида используемой энергии регуляторы непрямого действия подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические.

Основные преимущества электрических регуляторов — быстрое действие, возможность передачи электрического сигнала на большие расстояния и простота энергоснабжения. Пневматическим и гидравлическим системам свойственны существенные ограничения по дальности передачи сигналов и быстродействию, а также необходимость использования специальных источников энергии.

Существенными достоинствами пневматических регуляторов являются взрыво- и пожаробезопасность, простота обслуживания.

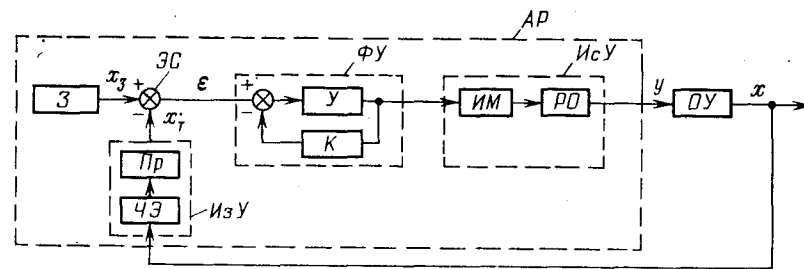


Рис. 26. Функциональная схема системы с регулятором непрямого действия

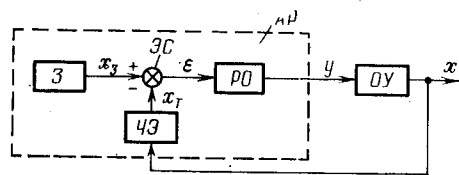


Рис. 27. Функциональная схема системы с регулятором прямого действия

ния, а также высокие скорости и надежность исполнительных механизмов.

Для электрических регуляторов характерны ограничения по скорости исполнительных механизмов и трудность выполнения электрических систем во взрывобезопасном исполнении.

Отличительной особенностью гидравлических регуляторов является возможность получения больших мощностей исполнительных механизмов с небольшими габаритами.

Указанные достоинства регуляторов использующих энергию различного вида привели к созданию *комбинированных регуляторов*. Чаще всего используются электрогидравлические и электропневматические регуляторы, в которых, как правило, измерительные и формирующие устройства выполняются электрическими, а исполнительные механизмы — пневматическими или гидравлическими.

В нефтяной и газовой промышленности ввиду существенного требования пожаро- и взрывобезопасности, а также необходимости больших перестановочных усилий исполнительных механизмов наибольшее распространение получили пневматические, гидравлические и комбинированные регуляторы.

Наряду с регуляторами, работающими по схеме рис. 26, в промышленности используются *автоматические регуляторы прямого действия* (рис. 27). В таких регуляторах не используются посторонние источники энергии. Промышленные регуляторы прямого действия обычно конструктивно сочетают в себе чувствительный момент ЧЭ, задатчик З, элемент сравнения ЭС и регулирующий орган РО, причем последний перемещается за счет энергии чувствительного элемента. Эти регуляторы обладают маломощным сигналом на выходе и поэтому находят весьма ограниченное применение.

Автоматические регуляторы принято также подразделять на *специальные и универсальные*.

Специальные регуляторы предназначены для регулирования конкретного параметра в определенных условиях. К ним можно отнести регуляторы прямого действия (см. § 3), а также регуляторы подачи долота (см. гл. 11, § 4).

Наибольшее распространение получили универсальные регуляторы, предназначенные для автоматического регулирования различных технологических процессов.

При построении универсальных регуляторов непрямого действия обычно используются *приборный и агрегатный* принципы.

В автоматических регуляторах, построенных по приборному принципу, измерительное и регулирующее устройства объединены в одном корпусе. Однако большая часть современных универсальных автоматических регуляторов непрямого действия строится по агрегатному принципу. При этом измерительное, регулирующее и исполнительные устройства конструктивно выполняются отдельно с обязательным согласованием сопрягающих узлов. Задатчики выполняются либо в виде самостоятельного устройства и размещаются в так называемом «вторичном» приборе, либо встраиваются в регулирующее устройство.

В последние годы в связи с введением государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) наметилась тенденция к минимизации номенклатуры средств контроля и управления на основе разработки и выпуска агрегатных комплексов технических средств.

Агрегатный комплекс представляет собой совокупность технических средств измерительной и регулирующей техники, характеризующихся метрологической, информационной, конструктивной и эксплуатационной совместимостью, предназначенных для решения определенных задач автоматического контроля и управления.

В связи с этим приводимые ниже промышленные автоматические регуляторы рассматриваются как функциональные блоки соответствующих агрегатных комплексов.

Автоматические регуляторы принято также классифицировать по *закону регулирования*. При этом различают позиционные (Пз) пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ), пропорционально-дифференциальные (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы.

Особый класс составляют *экстремальные регуляторы*.

§ 49. Математические модели и способы реализации автоматических регуляторов

Зависимость изменения выходной величины регулятора y от рассогласования e заданного x_z и текущего x_t значений регулируемого параметра x представляет собой закон регулирования. Основными показателями качества общепромышленных автоматических регуляторов следует считать динамическую точность и надежность реализации заданного закона регулирования. Очевидно, что сконструировать регулятор, абсолютно точно реализующий заданный закон регулирования, практически невозможно. Поэтому регуляторы, которые точно воспроизводят приводимые далее уравнения, называются *идеальными*. Реальные конструкции регуляторов описываются уравнениями, которые в меньшей или большей степени отличаются от иде-

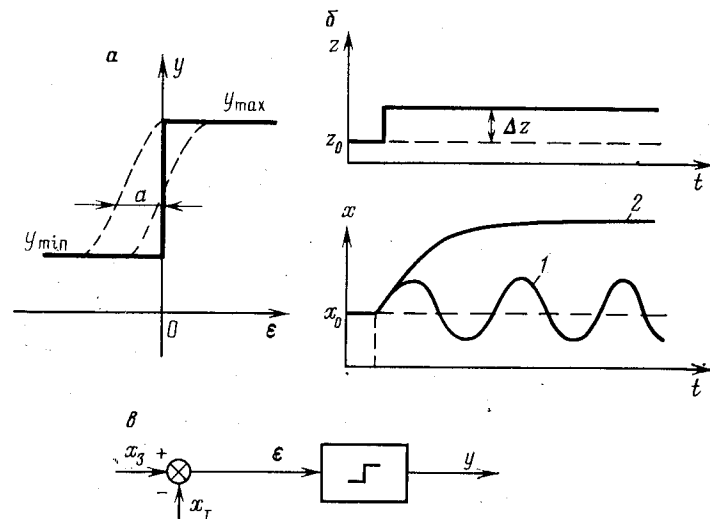


Рис. 28. Характеристики Пз-регулятора: а — закон регулирования; б — график переходного процесса в системе с Пз-регулятором; в — структурная схема

альных, что приводит к некоторому изменению качества регулирования по сравнению с расчетами.

Позиционными (Пз) называют регуляторы, у которых выходная величина принимает одно из своих дискретных значений y_{\max} или y_{\min} в зависимости от знака рассогласования ϵ :

$$\left. \begin{aligned} y &= y_{\max} & \text{при } \epsilon = x_3 - x_\tau > 0; \\ y &= y_{\min} & \text{при } \epsilon = x_3 - x_\tau < 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

Закон регулирования показан на рис. 28, а. В реальных условиях характеристика регулятора существенно отличается от идеального (пунктир на рис. 28, а), образуя, в частности, зону нечувствительности a . Появление зоны a приводит к увеличению запаздывания τ контура регулирования. Поэтому в целях расширения области применения позиционных регуляторов и улучшения переходных процессов величину a желательно иметь по возможности минимальной. Однако в практике автоматического регулирования встречаются задачи, где зона нечувствительности позиционного регулятора должна быть достаточно большой, например при регулировании уровня в больших емкостях. Исходя из этого в позиционных регуляторах желательно иметь устройства, позволяющие настраивать величину a в широких пределах.

Типичный график переходного процесса в системе с позиционным регулятором при скачкообразном изменении возмущения z показан на рис. 28, б (кривая 2). Здесь же приведен вид переходного процесса в статическом объекте регулирова-

ния без регулятора (кривая 1). Очевидно, применение позиционного регулятора возможно при допустимости автоколебательного процесса в системе и при определенных значениях амплитуды установившихся колебаний.

Пропорциональными (П) называют регуляторы, у которых выходная величина пропорциональна величине рассогласования:

$$y = K\epsilon, \quad \epsilon = x_3 - x_\tau. \quad (7.6)$$

Коэффициент пропорциональности K в этом выражении называется коэффициентом усиления регулятора и является его настроечным параметром.

Передаточная функция П-регулятора

$$W_i(p) = K. \quad (7.7)$$

Закон регулирования при скачкообразном отклонении текущего значения регулируемого параметра от заданного показан на рис. 29, а. Из выражения (7.6) следует, что каждому значению рассогласования ϵ соответствует вполне определенное значение выходной величины регулятора, т. е. П-регулятор, а следовательно, и система в целом могут находиться в состоянии равновесия при различных значениях регулируемого параметра. Таким образом, П-регулятор не устраняет рассогласования, он лишь приводит систему к новому состоянию равновесия, соответствующему новому значению регулируемого параметра.

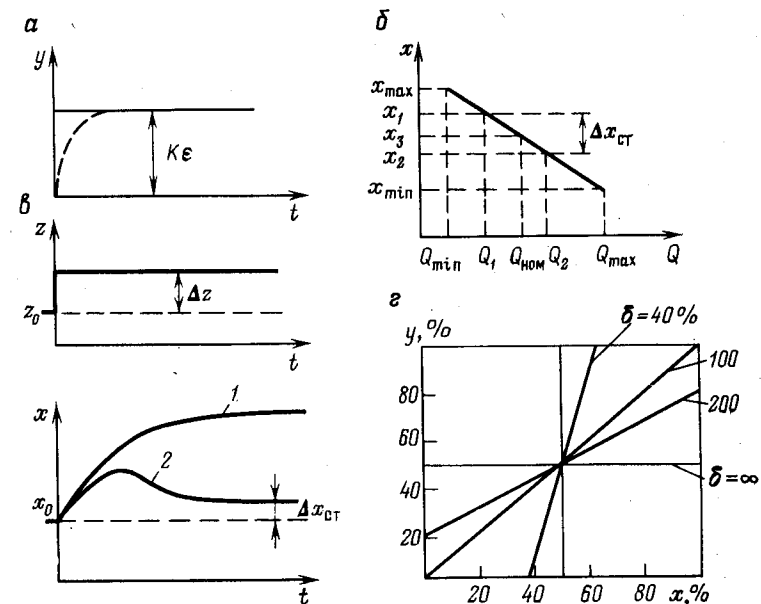


Рис. 29. Характеристики П-регулятора:

а — закон регулирования; б — статическая характеристика системы с П-регулятором; в — график переходного процесса в системе с П-регулятором; г — статические характеристики П-регулятора

Величина остаточного отклонения регулируемого параметра называется *статической неравномерностью* или *статической ошибкой* П-регулятора.

Явление статической неравномерности хорошо иллюстрируется статической характеристикой системы с П-регулятором (рис. 29, б), представляющей собой зависимость значений регулируемого параметра x от нагрузки объекта Q .

Предположим, что система находится в состоянии равновесия при нагрузке Q_1 и значении регулируемого параметра x_1 . При изменении нагрузки до величины Q_2 регулируемый параметр x изменится, П-регулятор создаст регулирующее воздействие в соответствии с выражением (7.6) и приведет регулируемый параметр к значению x_2 . Таким образом, статическая неравномерность

$$\Delta x_{ст} = x_1 - x_2 \quad (7.8)$$

зависит от нагрузки и коэффициента усиления регулятора K . Чем больше коэффициент усиления регулятора, тем больше величина регулирующего воздействия и тем меньше остаточное отклонение регулируемого параметра. С этой точки зрения целесообразно увеличивать коэффициент усиления П-регулятора. Однако, так как изменение регулирующего воздействия отражается на регулируемом параметре не мгновенно, а по истечении некоторого времени, определяемого свойствами объекта регулирования, следует ограничивать коэффициент усиления регулятора K с целью предотвращения избыточного регулирования. Поэтому величину коэффициента усиления регулятора определяют расчетным путем для каждой конкретной системы.

Типичный график переходного процесса в системе с П-регулятором при скачкообразном изменении возмущения z показан на рис. 29, в (кривая 2). Здесь же приведен вид переходного процесса в статическом объекте регулирования без регулятора (кривая 1). Преимущество П-регулятора заключается в быстром восстановлении равновесия в системе, а наличие *статической неравномерности* является недостатком П-регулятора.

Настроечным параметром П-регулятора является его коэффициент усиления K .

Вместе с тем на практике в качестве параметра настройки П-регулятора используется величина, обратная коэффициенту усиления K , выраженная в процентах:

$$\delta = 1/K \cdot 100 \% \quad (7.9)$$

Величина δ называется *пределом пропорциональности* регулятора. Она определяет интервал изменения регулируемого параметра (выраженного в процентах), вызывающего изменения выходной величины регулятора от одного крайнего значения до другого (рис. 29, г). Настройка предела пропорциональности на значение больше 100 % означает, что выходная величина регулятора не достигает своих крайних значений при измене-

нии регулируемого параметра во всем диапазоне. Согласно уравнению (7.6) при равенстве текущего и заданного значений регулируемого параметра ($\varepsilon = x_3 - x_T = 0$) выходная величина регулятора равна нулю, т. е. регулирующий орган исполнительного устройства должен занимать одно из своих крайних положений. Чтобы при $x_T = x_3$ регулирующий орган мог занимать промежуточное положение в пределах своего хода, в реальных конструкциях регуляторов предусматривается введение дополнительной составляющей на выходе регулятора y_0 , причем так, чтобы при $x_T = x_3$ соблюдалось условие $y = y_0$.

Тогда уравнение П-регулятора имеет вид

$$y = K\varepsilon + y_0 \quad (7.10)$$

Кроме того, в реальных регуляторах ввиду их некоторой инерционности закон регулирования несколько отличается от идеального (см. рис. 29, а, пунктир).

Уравнение (7.10) может быть реализовано структурой, показанной на рис. 30, а. Для повышения динамической точности П-регулятора его часто реализуют в виде усилителя с большим коэффициентом усиления, охваченного отрицательной обратной связью, как это показано на рис. 30, б. Тогда в соответствии с этой структурой передаточная функция регулятора определится из выражения

$$W(p) = \frac{K_y}{1 + K_y \cdot 1/K} = \frac{1}{1/K_y + 1/K} \quad (7.11)$$

При $K_y \rightarrow \infty$

$$W(p) \approx K \quad (7.12)$$

Интегральными (И) называют регуляторы, у которых выходная величина пропорциональна интегралу от рассогласования:

$$y = \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon dt, \quad (7.13)$$

где T_n — постоянная времени интегрирования, являющаяся настроечным параметром И-регулятора.

Передаточная функция И-регулятора

$$W(p) = 1/(T_n p) \quad (7.14)$$

Закон регулирования при скачкообразном отклонении текущего значения регулируемого параметра от заданного показан

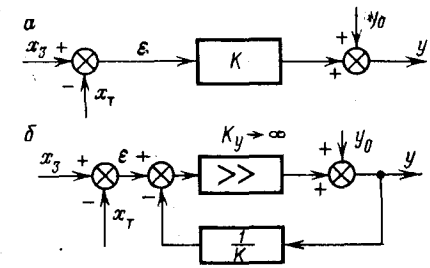


Рис. 30. Структурные схемы реализации П-регуляторов

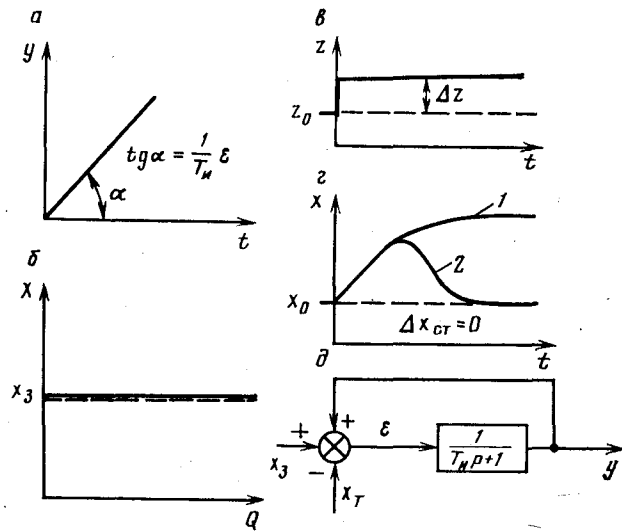


Рис. 31. Характеристики И-регулятора:

a — закон регулирования; *б* — статическая характеристика системы с И-регулятором; *в* — график переходного процесса в системе с И-регулятором; *г* — структурная схема

на рис. 31, *a*. Выражение (7.13) в дифференциальной форме имеет вид

$$T_n \frac{dy}{dt} = \varepsilon. \quad (7.15)$$

Отсюда видно, что отклонение регулируемого параметра ε пропорционально не значению выходной величины, а ее скорости. Следовательно, в состоянии равновесия при $dy/dt=0$, рассогласование ε также равно нулю. Таким образом, при всяком отклонении регулируемого параметра от заданного выходная величина И-регулятора будет изменяться до тех пор, пока это отклонение не будет равно нулю. Это возможно при любых значениях возмущения (нагрузки). Статическая характеристика системы с И-регулятором, приведенная на рис. 31, *б*, показывает, что система может находиться только в одном состоянии равновесия — когда текущее значение регулируемого параметра равно заданному. Другими словами, И-регулятор осуществляет регулирование без статической ошибки ($\Delta x_{ст}=0$).

Типичный график переходного процесса в системе с И-регулятором при скачкообразном изменении возмущения z показан на рис. 31, *в*. Здесь же приведен вид переходного процесса в статическом объекте регулирования без регулятора (кривая 1).

Преимуществом И-регулятора по сравнению с П-регулятором является отсутствие статической неравномерности.

Недостатки И-регулятора обусловлены их динамическими свойствами. Как бы ни было мало рассогласование ε , И-регулятор будет продолжать перемещать регулирующий орган вплоть до крайнего положения. Направление движения регулирующего органа изменяется лишь в том случае, когда текущее значение регулируемого параметра, изменяясь, переходит через заданное значение. И-регуляторы могут устойчиво работать только на объектах с большим самовыравниванием и малым запаздыванием. Поэтому И-регуляторы как самостоятельные устройства применяются крайне редко. Они могут быть реализованы в соответствии со структурой, показанной на рис. 31, *г*, т. е. в виде инерционного звена, охваченного положительной обратной связью. Однако наиболее часто И-регуляторы конструктивно объединяются с П-регулятором.

Пропорционально-интегральными (ПИ) называются регуляторы, у которых выходная величина пропорциональна отклонению регулируемого параметра и интегралу от этого отклонения:

$$y = K \left(\varepsilon + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon dt \right). \quad (7.16)$$

В таком регуляторе коэффициент усиления K и постоянная времени интегрирования T_n являются его настроечными параметрами.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W(p) = \frac{K(T_n p + 1)}{T_n p}. \quad (7.17)$$

Закон регулирования при скачкообразном отклонении текущего значения регулируемого параметра от заданного показан на рис. 32. Выражение (7.16) в дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{dy}{dt} = K \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{K}{T_n} \varepsilon, \quad (7.18)$$

т. е. скорость изменения регулирующего воздействия пропорциональна рассогласованию и его скорости. Следовательно, в состоянии равновесия при $dy/dt=0$ и $d\varepsilon/dt=0$ рассогласование ε также равно нулю.

Из выражения (7.16) следует, что в ПИ-регуляторе сочетаются лучшие свойства П- и И-регуляторов. При скачкообразном отклонении текущего значения от заданного ПИ-регулятор сначала под действием пропорциональной составляющей

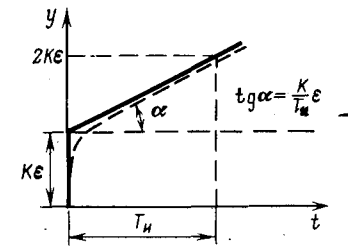


Рис. 32. Закон регулирования ПИ-регулятора

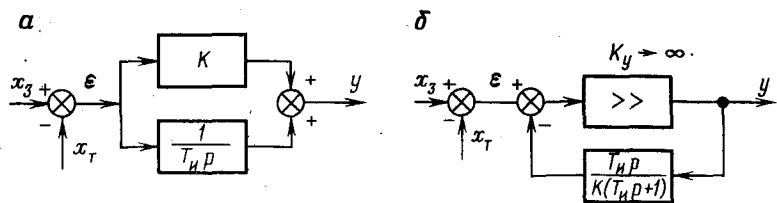


Рис. 33. Структурные схемы реализации ПИ-регулятора

быстро приводит систему к новому состоянию равновесия, соответствующему этому отклонению, а затем под действием интегральной составляющей ликвидирует это отклонение. Таким образом, пропорциональная составляющая обеспечивает необходимые динамические свойства системы, а интегральная — статические свойства, устраняет статическую неравномерность. Постоянная времени интегрирования T_n , определяющая изменение выходной величины регулятора под действием интегральной составляющей, называется также временем интегрирования или временем удвоения, так как она численно равна времени, в течение которого изменение выходной величины под действием пропорциональной составляющей $K\varepsilon$ удваивается под действием интегральной составляющей (см. рис. 32). Уравнение (7.16) может быть реализовано структурой, показанной на рис. 33, а. Однако современные ПИ-регуляторы обычно выполняются с использованием обратных связей (рис. 33, б). Здесь обратная связь выполнена в виде реального дифференцирующего звена с постоянной времени, равной постоянной времени регулятора T_n , и с коэффициентом усиления, равным обратному коэффициенту усиления регулятора. В соответствии с этой структурой передаточная функция регулятора определится из выражения

$$W(p) = \frac{K_y}{1 + K_y \frac{T_n p}{K(T_n p + 1)}} = \frac{1}{\frac{1}{K_y} + \frac{T_n p}{K(T_n p + 1)}}. \quad (7.19)$$

При $K_y \rightarrow \infty$

$$W(p) \approx \frac{K(T_n p + 1)}{T_n p}. \quad (7.20)$$

Реальное дифференцирующее звено реализуется сочетанием жесткой отрицательной и инерционной положительной обратных связей. Такая обратная связь в целом называется *упругой* или *изодромной*. Поэтому ПИ-регуляторы часто называют *изодромными*, а их настроечный параметр T_n — *временем изодрома*. На рис. 32 пунктиром показан закон регулирования реального ПИ-регулятора.

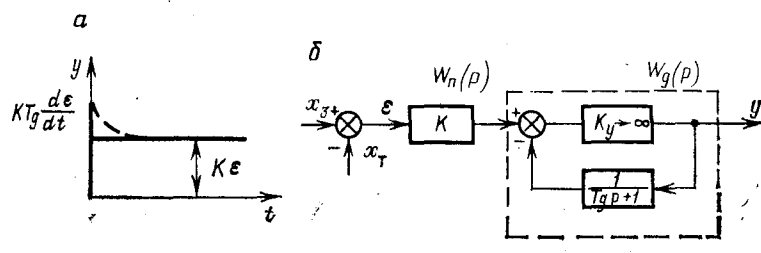


Рис. 34. Характеристики ПД-регулятора: а — закон регулирования; б — структурная схема

Пропорционально-дифференциальными (ПД) называют регуляторы, у которых выходная величина пропорциональна рассогласованию ε и скорости этого рассогласования:

$$y = K \left(\varepsilon + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right). \quad (7.21)$$

Коэффициент усиления K и постоянная времени дифференцирования T_d являются параметрами настройки ПИ-регулятора.

Передаточная функция ПД-регулятора имеет вид

$$W(p) = K(T_d p + 1). \quad (7.22)$$

При скачкообразном отклонении регулируемого параметра выходная величина ПД-регулятора под действием дифференциальной составляющей должна мгновенно возрасти до бесконечно большой величины и также мгновенно уменьшиться до значения, определяемого пропорциональной составляющей (рис. 34). Однако, так как в реальных регуляторах невозможны мгновенные процессы, практически закон регулирования имеет вид, показанный на рис. 34, а пунктиром.

Сочетание в ПД-регуляторе пропорционального воздействия и воздействия по производной делает его менее инерционным по сравнению с П-регулятором. Объясняется это тем, что в момент возникновения рассогласования скорость рассогласования проявляется быстрее, чем само рассогласование.

Использование в ПД-регуляторе воздействия по производной (скорости) отклонения означает введение в закон регулирования предваряющего воздействия, поэтому ПД-регуляторы называют *пропорциональными регуляторами с предварением*, а величину T_d — *временем предварения*. Опережение выходного сигнала в ПД-регуляторе по сравнению с П-регулятором имеет существенное положительное значение при регулировании параметров в объектах, обладающих большим запаздыванием. Недостатком ПД-регулятора является наличие, как и в П-регуляторе, статической неравномерности.

ПД-регулятор обычно реализуют по схеме, показанной на рис. 34, б. Она представляет собой два блока, соединенные последовательно — пропорциональный с передаточной функцией

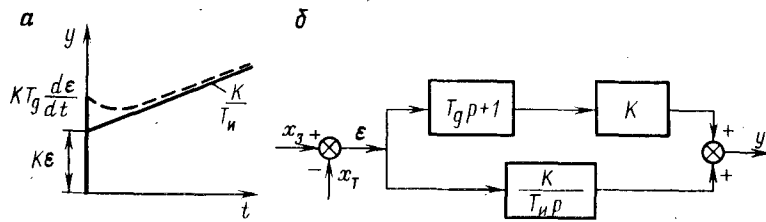


Рис. 35. Характеристики ПИД-регулятора: а — закон регулирования; б — структурная схема

$W_n(p)$ и дифференциальный (блок предварения) с передаточной функцией $W_d(p)$, причем последний представлен усиленным звеном с большим коэффициентом усиления $K_y \rightarrow \infty$, охваченным инерционной отрицательной обратной связью.

Передаточная функция регулятора определяется из выражения

$$W(p) = W_n(p) W_d(p) = K \frac{K_y}{1 + K_y \frac{1}{T_d p + 1}} = K \frac{1}{\frac{1}{K_y} + \frac{1}{T_d p + 1}}. \quad (7.23)$$

При $K_y \rightarrow \infty$

$$W(p) \approx K(T_d p + 1). \quad (7.24)$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) называют регуляторы, у которых выходная величина пропорциональна рассогласованию ε , интегралу и скорости этого рассогласования:

$$y = K \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right). \quad (7.25)$$

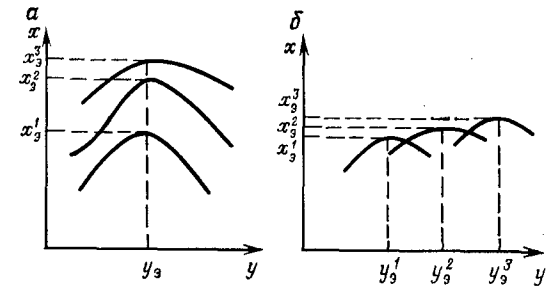
Параметрами постройки регулятора являются коэффициент усиления K , время интегрирования T_i и время предварения T_d . Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид

$$W(p) = K \frac{T_d T_i p^2 + T_i p + 1}{T_i p}. \quad (7.26)$$

Закон регулирования при скачкообразном отклонении регулируемого параметра показан на рис. 35, а. Пунктиром показан закон регулирования реального ПИД-регулятора.

ПИД-регуляторы обладают существенными преимуществами по сравнению со всеми ранее рассмотренными регуляторами в отношении статических и динамических свойств. Однако, будучи наиболее сложными по конструкции, они находят при-

Рис. 36. Экстремальные статические характеристики объектов



менение лишь при регулировании наиболее существенных технологических параметров. ПИД-регуляторы могут быть реализованы по структуре, показанной на рис. 35, б.

В соответствии с этой схемой передаточная функция ПИД-регулятора

$$W(p) = (T_d p + 1)K + \frac{K}{T_i p} = \frac{K(T_i T_d p^2 + T_i p + 1)}{T_i p}. \quad (7.27)$$

С помощью ПИД-регулятора можно осуществить любой линейный закон регулирования.

При $T_d=0$ и бесконечно большой величине T_i получим П-регулятор. При $T_d=0$, установив достаточно малые значения K и T_i , но так, чтобы отношение K/T_i было существенным, получим И-регулятор.

При $T_d=0$ и конечных значениях K и T_i будем иметь ПИ-регулятор, а при бесконечно большом значении T_i и конечных значениях K и T_d — ПД-регулятор.

Экстремальными называют регуляторы, которые определяют и поддерживают режим работы объекта регулирования, соответствующий экстремуму функции, характеризующей этот режим. Необходимым условием экстремального регулирования является наличие экстремума статической характеристики объекта, которая в зависимости от внешних условий может смещаться (рис. 36). Причем если экстремум x_0 меняется только по величине при неизменном значении входного регулирующего воздействия y_0 (рис. 36, а), то достаточно один раз определить положение экстремума, а затем использовать обыкновенную систему автоматического регулирования (стабилизации). Во втором случае (рис. 36, б) целесообразно применить экстремальный регулятор, который вместе с объектом образует систему экстремального регулирования. Экстремальные системы относятся к поисковым системам регулирования, в которых операция поиска используется для получения дополнительной информации об объекте и определения экстремума. Процесс поиска осуществляется пробными регулирующими воздействиями. Если пробное воздействие y на объект вызывает приближение регулируемой величины x к экстремуму, то воздействие повторяется в том же направлении. Если пробное воздействие уда-

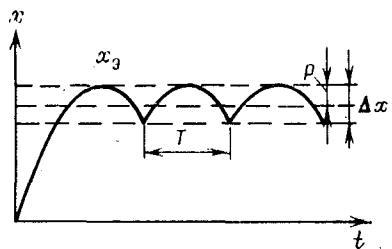


Рис. 37. Показатели качества системы экстремального регулирования

ляет регулируемую величину от экстремума, то направление воздействия изменяется на обратное. Определив, что регулируемая величина достигла экстремума, регулятор войдет в колебательный режим вблизи экстремального значения. При смещении экстремальной характеристики операции поиска экстремума повторяются.

Характер колебаний регулируемого параметра около экстремума в системе с экстремальным регулятором показан на рис. 37. Качество регулирования такой системы определяется следующими показателями: зоной поиска на выходе Δx (см. рис. 37), периодом автоколебаний T , потерей на поиск P , определяемой как разность между экстремальным $x_э$ и средним значениями за период, временем выхода в экстремум (при скачкообразном его смещении) τ .

§ 50. Регуляторы прямого действия

Как уже указывалось выше, регуляторы прямого действия конструктивно сочетают в себе чувствительный элемент, элемент сравнения и регулирующий орган. Для перемещения регулирующего органа не используются посторонние источники энергии. Эти регуляторы предназначены для стабилизации какого-то определенного параметра. Их преимуществами являются простота конструкции, надежность и невысокая стоимость.

Регулятор температуры типа РТПД (рис. 38) предназначен для стабилизации температуры воды, масла и других неагрессивных жидкостей и газов. Регулятор построен на базе манометрического термометра, основными элементами которого являются термобаллон 1, капилляр 2 и сильфон 4, помещенный в кожухе 3. Примерно $\frac{2}{3}$ объема термобаллона и вся остальная термометрическая система заполнены рабочей низкокипящей жидкостью. Верхнюю часть термобаллона зани-

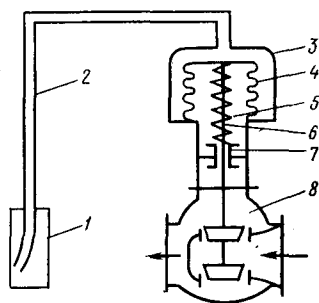


Рис. 38. Принципиальная схема регулятора температуры прямого действия типа РТПД

мает насыщенный пар этой жидкости, давление которого зависит от температуры. При погружении термобаллона в измеряемую среду в термосистеме устанавливается давление насыщенного пара, пропорциональное температуре измеряемой среды. Сильфон 4 выполняет роль элемента сравнения. Он сравнивает воздействие давления жидкости, пропорционального текущей температуре, с воздействием пружины 5, которое определяет заданное значение температуры. Если текущее значение температуры превышает заданное, сильфон 4 сжимается и перемещает шток 6 вниз, вызывая уменьшение проходного сечения регулирующего органа 8. При этом уменьшается количество нагреваемого продукта, поступающего в объект регулирования.

По закону регулирования этот регулятор относится к П-регуляторам. Его уравнение.

$$x_{\text{вых}} = Kx_{\text{вх}}, \quad (7.28)$$

где $x_{\text{вх}}$ — изменение температуры; $x_{\text{вых}}$ — перемещение регулирующего органа.

Коэффициент усиления K в этом регуляторе не меняется. На определенное заданное значение температуры регулятор настраивается изменением предварительного натяжения пружины с помощью гайки 7.

Регуляторы РТПД выпускаются с различными диапазонами регулируемой температуры (40—50, 45—55 и т. д. до 75—85 °С). Величина хода регулирующего органа 10 или 20 мм. Соответственно коэффициент усиления регуляторов равен 1 или 2 мм/°С.

Регулятор давления прямого действия типа РД (рис. 39) предназначен для стабилизации давления газа. Газ, отбираемый со стороны входа регулятора, поступает через редуктор 1 в полость над мембраной 4, а газ, отбираемый со стороны выхода регулятора, — в полость под мембраной. Последняя с помощью штока 5 связана с регулирующим органом 8, который перемещается вдоль направляющего цилиндра 9. Стакан 6 с отверстиями служит для предварительного редуцирования газа. Заданное значение давления на выходе регулятора устанавливается редуктором 1 по манометру 3. При увеличении

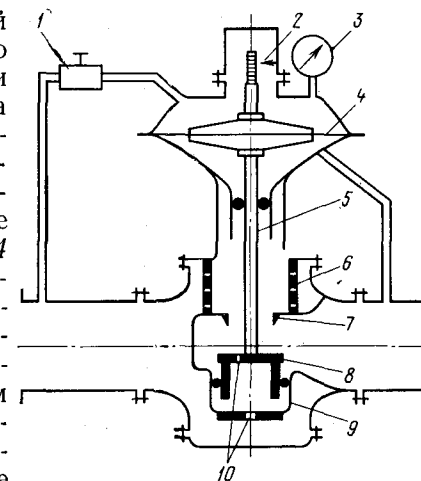


Рис. 39. Принципиальная схема регулятора давления прямого действия типа РД

давления газа после регулятора давление под мембраной также увеличится и станет больше заданного. Мембрана прогнется вверх и переместит регулирующий орган 8 относительно его седла 7. Перемещение будет продолжаться до тех пор, пока давление на выходе регулятора, а следовательно, и под мембраной не будет равно заданному. Таким образом, по закону регулирования регулятор РД относится к И-регуляторам. Положение регулирующего органа контролируется с помощью указателя 2. Затвор регулирующего органа разгружается от воздействия регулируемой среды через отверстия 10. Диапазон настройки регулируемого давления на выходе составляет 0,25—2,5 МПа.

ГЛАВА 8.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

§ 51. Основные особенности пневматических регуляторов

В качестве источника энергии и носителя сигналов в пневматических регуляторах используется сжатый воздух. Информация о текущем значении регулируемого параметра, сигнал задания, командный сигнал к исполнительному механизму — все эти величины представлены в современных пневматических регуляторах в виде сжатого воздуха под давлением 0,02—0,1 МПа.

Обычно пневматический регулятор состоит из измерительного устройства, задатчика, регулирующего и исполнительного устройств.

Пневматические измерительные устройства предназначены для непрерывного преобразования текущего значения регулируемого параметра в пневматический сигнал.

В настоящее время широко применяется большое число пневматических измерительных устройств разного типа. В схемно-конструктивном отношении их можно подразделить на две группы: *измерительные устройства приборного типа*, представляющие собой разнообразные измерительные приборы с встроенными в них пневмопреобразователями, и *специальные датчики-преобразователи*, действующие как первичные приборы пневматических систем автоматического контроля и регулирования. В качестве примера измерительных устройств первой группы можно назвать автоматический электронный мост для измерения температуры с помощью термометра сопротивления, если в мост встроен пневмопреобразователь. К измерительным устройствам второй группы относятся дифманометры типа ДМПК, выходной сигнал которых представляет собой сжатый воздух под давлением 0,02—0,1 МПа.

В качестве *здатчика* в пневматических регуляторах обычно применяются редукторы, стабилизаторы давления «после себя».

С помощью настроечной пружины редуктора можно установить на выходе задатчика определенное давление в пределах стандартного диапазона 0,02—0,1 МПа.

Регулирующее устройство формирует один из стандартных законов регулирования и состоит из элемента сравнения и формирующего устройства. Элемент сравнения в пневматических регуляторах выполняется в виде сборок мембран, а формирующее устройство — в виде узла «сопло-заслонка» и усилителя, охваченного обратными связями.

Пневматическое *исполнительное устройство* служит для преобразования командного пневматического сигнала, получаемого на выходе регулирующего устройства, в перемещение регулирующего органа. В качестве *линии связи* для передачи информации в пневматических регуляторах используются металлические или пластмассовые трубопроводы. По ним сигнал в виде избыточного давления сжатого воздуха, изменяющегося в стандартных пределах 0,02—0,1 МПа, передается от измерительного устройства и задатчика к регулирующему устройству и от этого — к исполнительному устройству. Подобные линии связи (пневмоприводы) характеризуются ограниченной скоростью передачи сигналов, однако для довольно инерционных технологических процессов нефтяной и газовой промышленности эта скорость вполне достаточна. Протяженность пневматических линий связи ограничена: обычно она не превышает 300 м.

Для пневматических регуляторов необходимо иметь особый источник питания — систему подачи сжатого воздуха, осушенного и очищенного от пыли и масла, с хорошо стабилизированным давлением $p_{пит} = 0,14 \text{ МПа} \pm 10\%$. В большинстве случаев для этой цели приходится создавать специальную систему воздухообеспечения, к качеству и надежности работы которой предъявляются достаточно жесткие требования.

Важной особенностью пневматических регуляторов является высокий уровень их эксплуатационной надежности. Они могут безотказно работать в тяжелых эксплуатационных условиях в течение длительного времени. В их состав не входят элементы с существенно ограниченным сроком службы. Для эксплуатации пневматических регуляторов не требуется высокой квалификации обслуживающего персонала.

Основа пневматической ветви ГСП — унифицированная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА), на базе которой строятся современные пневматические регуляторы.

Система УСЭППА представляет собой набор отдельных конструктивных единиц-элементов, каждый из которых может выполнять лишь простейшую функцию преобразования сигналов в общей схеме всего устройства. В их числе постоянные и регулируемые пневмосопротивления, пневмемкости, пневмореле, пневмоусилители и другие аналоги электромеханических и электронных устройств.

Таблица 22

Обозначение	Название	Обозначение	Название
	Входной сигнал		Постоянное сопротивление
	Выходной сигнал		Переменное сопротивление
	Линия питания		Пневмемкость
	Соединение с атмосферой		Камера, давление в которой $p = 0,3 p_{\text{пит}}$ (0,04 МПа)
	Узел «сопло-заслонка»		Камера, давление в которой $p = 0,8 p_{\text{пит}}$ (0,1 МПа)

Московским заводом «Тизприбор» выпускается группа средств пневмоавтоматики, построенных на элементах УСЭППА, которая получила наименование системы «Старт». В состав системы входят несколько модификаций пневматических регуляторов, реализующих различные законы регулирования, вторичные приборы, а также приборы, реализующие простейшие вычислительные функции.

Принцип действия блоков системы «Старт» основан на компенсации усилий при малых перемещениях подвижных элементов (мембран). Конструктивное выполнение регуляторов системы «Старт» в значительной мере определяется принятым для них элементным принципом построения. Подобно тому, как электрические элементы устанавливаются на специальные платы (шасси), оснащенные необходимыми монтажно-соединительными деталями (шинами, контактами, панелями, клеммами и т. д.), пневмоэлементы УСЭППА также монтируются на платах, содержащих коммуникационные каналы-пневмопровода и монтажные детали. Платы (шасси) приборов изготавливаются склеиванием трех пластин из органического стекла. На обеих сторонах одной из них, средней, штамповкой или фрезерованием нанесены углубления, «рисунок» которых соответствует нужной схеме соединения элементов УСЭППА и принятому их расположению. Склеивание этой средней пластины с двумя другими и необходимые сквозные отверстия в них обеспечивают весь набор герметичных коммуникаций между элементами.

Элементы УСЭППА соединяются с каналами в коммутационной плате с помощью специальных «ножек», образующих монтажный цоколь элемента и в то же время осуществляющих подвод к нему и от него.

При изображении элементов УСЭППА на схемах приняты условные обозначения, которые сведены в табл. 22.

§ 52. Элементы и узлы устройств непрерывного действия

Пневматические сопротивления предназначены для создания сопротивления течению воздуха. В схемах пневмоавтоматики они имеют такое же назначение, как и электрические сопротивления в электрических схемах.

Пневматические *постоянные сопротивления* системы УСЭППА выполняются в виде капилляров, т. е. каналов цилиндрической формы с большим отношением длины к диаметру. Расход воздуха через такой капилляр при небольших перепадах давления определяется соотношением [17]

$$G = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \eta l} \Delta p, \quad (8.1)$$

где l , d — соответственно длина и диаметр капилляра; ρ — плотность воздуха; η — динамическая вязкость воздуха; G — массовый расход; Δp — падение давления.

Выражение (8.1) обычно представляют в виде

$$\Delta P = RG, \quad (8.2)$$

где R — пневматическое сопротивление, определяемое соотношением

$$R = \frac{128 \eta l}{\pi d^4 \rho} \approx \frac{1}{1600} \cdot \frac{l}{d^4} \quad (8.3)$$

или в виде

$$G = \alpha \Delta P, \quad (8.4)$$

где $\alpha = 1/R$ — проводимость пневматического сопротивления ($\alpha \approx 1600 d^4/l$).

Постоянное пневматическое сопротивление (рис. 40) выполнено в виде капилляра 1, помещенного в продольном канале винта 2. Последний ввернут в корпус 3, имеющий две присоединительные ножки 5. Сжатый воздух под давлением p_1 через одну из присоединительных ножек и отверстие в корпусе (на рисунке не показан) поступает к капилляру, на наружной поверхности которого намотана шерстяная пряжа 4. Воздух проводит через пряжу, внутреннюю часть капилляра и под давлением p_2 снимается с другой стороны капилляра через вторую коммутационную ножку. Сопротивление, создаваемое этим устройством, в соответствии с выражением (8.3) определяется

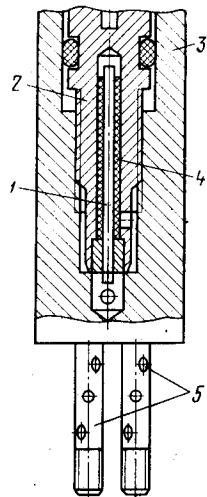


Рис. 40. Постоянное сопротивление

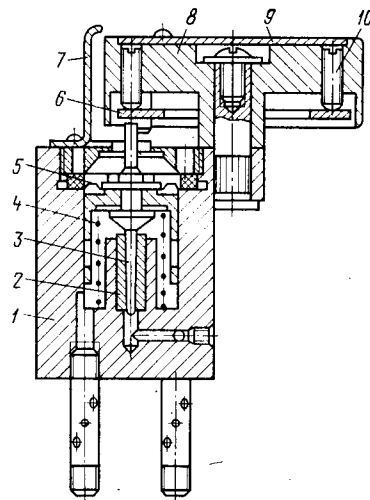


Рис. 41. Переменное сопротивление

геометрическими размерами капилляра (обычно диаметр 0,3 мм, длина 20 мм).

В *переменном сопротивлении* типа «конус-конус» (рис. 41) в корпусе 1 помещена втулка 2 с конусным отверстием, вдоль оси которого расположена игла 3. Последняя закреплена в жестком центре разделительной мембраны 5 и пружиной 4 прижимается к лекальной пластине 6. При вращении настроечной головки 8 лекальная пластина 6, опирающаяся на винты 10, давит на иглу 3, заставляя ее перемещаться вдоль оси втулки 2. В результате перемещения иглы 3 зазор между иглой и конусной втулкой изменяется, чем и достигается настройка проводимости α в пределах 0—1. Переменное сопротивление присоединяется к пневматическим цепям через две коммутационные ножки, которые сообщаются с двумя торцевыми сторонами конусной втулки через отверстия в корпусе. Настроечная головка 8 дросселя снабжена равномерно оцифрованной шкалой 9 с указателем 7. Переменное сопротивление имеет индивидуальную градуировку в единицах тех величин, которые зависят от изменения его проводимости (например, время изодрома, коэффициент усиления и т. п.).

Сумматор на сопротивлениях (рис. 42) предназначен для суммирования двух пневматических сигналов. Уравнение сумматора легко может быть получено из аналогии пневматических цепей с электрическими.

Для электрической цепи

$$I = gU, \quad (8.5)$$

где I — ток; g — электрическая проводимость, U — падение напряжения.

В соответствии с (8.4) для пневматической цепи при малых расходах воздуха

$$G = \alpha \Delta p,$$

где G — расход воздуха; α — пневматическая проводимость дросселя; Δp — перепад давления.

Для электрической разветвленной цепи в соответствии с законом Кирхгофа сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла. Рассматривая точку А в качестве такого узла и учитывая, что выходной сигнал $p_{\text{вых}}$ обычно поступает в глухую камеру (по этой линии расход воздуха равен нулю), можно записать

$$G_1 + G_2 = 0. \quad (8.6)$$

Подставив (8.4) в (8.6), получим

$$\alpha(p_1 - p_{\text{вых}}) + \beta(p_2 - p_{\text{вых}}) = 0, \quad (8.7)$$

откуда

$$p_{\text{вых}} = \frac{\alpha p_1 + \beta p_2}{\alpha + \beta}. \quad (8.8)$$

Это выражение часто записывается в виде

$$p_{\text{вых}} = K_1 p_1 + K_2 p_2; \quad K_1 + K_2 = 1, \quad (8.9)$$

где

$$K_1 = \alpha / (\alpha + \beta); \quad K_2 = \beta / (\alpha + \beta). \quad (8.10)$$

Пневматические емкости предназначены для накапливания определенного количества сжатого воздуха и используются для создания инерционных звеньев в пневматических цепях.

Изменение массы m воздуха (пневматический заряд) в сосуде объемом V при изменении давления на величину Δp и постоянной температуре Θ определится из соотношения

$$m = \frac{V}{R_r \Theta} \Delta p = C \Delta p, \quad (8.11)$$

где $C = V/R_r \Theta$ — коэффициент аккумулирующей способности пневмоемкости; R_r — газовая постоянная.

Пневмоемкость системы УСЭППА представляет собой цилиндрическую камеру объемом 50 см³ с двумя присоединительными ножками.

Механо-пневматический преобразователь широко используется в устройствах пневмоавтоматики для преобразования механического перемещения в пневматический сигнал (рис. 43).

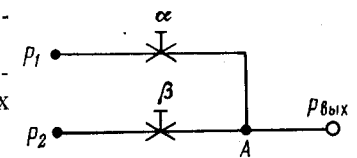


Рис. 42. Сумматор на сопротивлениях

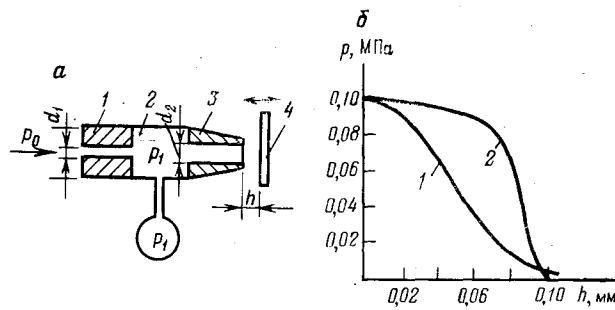


Рис. 43. Механопневматический преобразователь «сопло — заслонка» (а) и его статическая характеристика (б)

Преобразователь состоит из постоянного сопротивления 1 и переменного сопротивления, выполненного в виде сочетания сопла 3 и заслонки 4. Между постоянным и переменными сопротивлениями имеется проточная камера 2. Воздух питания под давлением p_0 проходит через преобразователь и выходит через сопло 3 в атмосферу. Обозначим F_1 площадь сечения постоянного сопротивления:

$$F_1 = \pi d_1^2 / 4. \quad (8.12)$$

Площадь сечения переменного сопротивления «сопло-заслонка» определим как площадь поверхности цилиндра высотой h и диаметром d_2 :

$$F_2 = \pi d_2 h. \quad (8.13)$$

Массовый расход воздуха через сопротивления при постоянной температуре будет

$$\begin{aligned} G_1 &= \alpha_1 F_1 \sqrt{2\rho_1 (p_0 - p_1)}; \\ G_2 &= \alpha_2 F_2 \sqrt{2\rho_2 (p_1 - p_{\text{атм}})}, \end{aligned} \quad (8.14)$$

где α и ρ — соответственно коэффициент расхода и плотность воздуха. В состоянии равновесия $G_1 = G_2$. Полагая $\rho_1 = \rho_2$, а также в первом приближении $\alpha_1 = \alpha_2$, получаем

$$p_1 = \frac{p_0}{1 + F_2^2 / F_1^2} \quad \text{или} \quad p_1 = \frac{p_0}{1 + 16d_2^2 h^2 / d_1^2}. \quad (8.15)$$

При постоянных d_1 , p_0 и d_2 изменение расстояния h заслонки от сопла приводит к изменению давления в камере 2 в соответствии со статической характеристикой (см. рис. 43, б, кривая 1). Это давление является выходной величиной преобразователя.

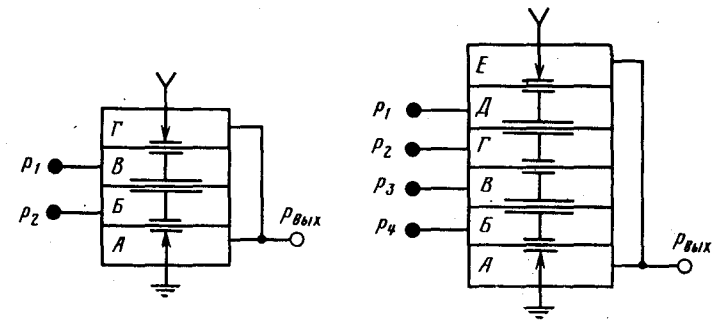


Рис. 44. Пневматические усилители с двумя соплами

Как видно из рис. 43, б, статическая характеристика преобразователя «сопло-заслонка» нелинейна. Поэтому в пневматических устройствах, ограничивая ход заслонки, используют только средний линейный участок характеристики. Чем меньшие перемещения заслонки вызывают изменение давления в рабочем диапазоне, тем выше чувствительность устройства. Кроме того, при малых расстояниях h небольшой перекоз заслонки относительно сопла может вызвать изменение давления на выходе. Поэтому желательно получить характеристику, близкую к кривой 2. Такое преобразование статической характеристики уменьшает рабочий ход заслонки и удаляет ее от сопла, обеспечивая тем самым повышение чувствительности и точности пневматического устройства.

Для усиления пневматических сигналов используются *пневматические усилители с двумя соплами*. Они выполняются трехмембранными (рис. 43, а на два входа) или пятимембранными (рис. 44, б на четыре входа). В конструктивном отношении они представляют собой набор латунных шайб, разделенных «вялыми» мембранами, в результате образуются четыре (А, Б, В, Г) или шесть (А, Б, В, Г, Д, Е) камер. Жесткие центры всех мембран соединены общим штоком. Концы штока служат заслонками, управляющими истечением воздуха через нижние и верхние сопла. Для обеспечения подстройки усилителя сопла выполняются регулируемые по положению. Камеры, в которых располагаются сопла, соединяются последовательно и образуют проточную камеру с двумя переменными сопротивлениями. Такая конструкция позволяет резко увеличить крутизну статической характеристики усилителя, показанной на рис. 45.

Для трехмембранного усилителя

$$p_{\text{вых}} = K_y p_{\text{вх}} = K_y (p_1 - p_2), \quad (8.16)$$

для пятимембранного усилителя

$$p_{\text{вых}} = K_y p_{\text{вх}} = K_y (p_1 - p_2 + p_3 - p_4). \quad (8.17)$$

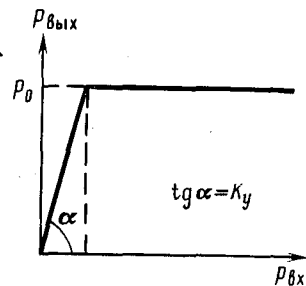


Рис. 45. Статистическая характеристика усилителя с двумя соплами

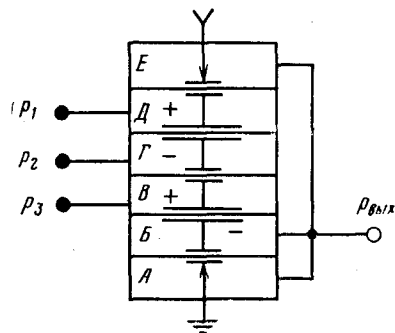


Рис. 46. Схема включения пятичamberного усилителя с обратной связью

Коэффициент усиления в такой конструкции $K_y \approx 250$, т. е. при небольших флюктуациях входных давлений и питания усилитель практически будет работать в релейном режиме.

Для обеспечения устойчивой работы усилителя применяют обратные связи (рис. 46). Три входных давления поступают соответственно в камеры D , Γ и B , а камера B используется в качестве камеры отрицательной обратной связи. Обозначив площадь большой мембраны F , а площадь малой мембраны f , получим условие равновесия схемы:

$$p_1(F-f) - p_2(F-f) + p_3(F-f) - p_{\text{вых}}(F-f) = 0, \quad (8.18)$$

откуда

$$p_{\text{вых}} = p_1 - p_2 + p_3. \quad (8.19)$$

Таким образом, данная схема включения осуществляет операцию алгебраического суммирования трех пневматических сигналов. Такое устройство часто называют *мембранным сумматором*.

Повторитель (рис. 47, а, следящая камера) с постоянным сопротивлением обычно используется для повторения (отлеживания) изменения входного сигнала.

$$p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}}. \quad (8.20)$$

Он состоит из входной B и выходной A камер, разделенных гибкой мембраной. Жесткий центр этой мембраны служит заслонкой сопла.

Повторитель действует по принципу компенсации сил. Входной пневматический сигнал поступает в камеру B и развивает на мембране усилие, направленное вниз. В камеру A через постоянное сопротивление, в комплекте с которым работает повторитель, непрерывно подается воздух по линии питания. Часть воздуха из камеры A через зазор между заслонкой и соплом сбрасывается в атмосферу. В камере A устанавливается

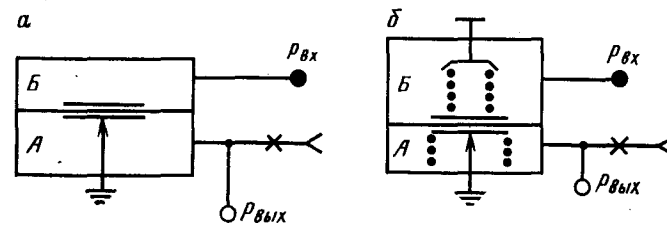


Рис. 47. Повторители

давление, промежуточное по значению между давлением $p_{\text{пит}}$ и атмосферным. Это давление, которое является выходным сигналом элемента, развивает на мембране усилие, направленное вверх. Оба противоположно направленные на мембрану усилия непрерывно сравниваются. При нарушении равновесия, например при увеличении $p_{\text{вх}}$, мембрана прикроет сопло и уменьшит расход воздуха в атмосферу. Давление в камере A ($p_{\text{вых}}$) увеличится, и равновесие восстановится. Благодаря высокой чувствительности мембраны повторитель обладает высокой точностью повторения сигнала, однако мощность этого элемента весьма ограничена.

На рис. 47, б показана схема «повторителя со сдвигом». Конструктивное отличие этой схемы от схемы на рис. 47, а, заключается в добавлении двух пружин и винта. В результате выходной сигнал такого устройства может быть больше или меньше входного сигнала на величину сдвига Δp , определяемого положением винта, т. е.

$$p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}} + \Delta p. \quad (8.21)$$

При вывертывании винта действие верхней пружины уменьшается, а нижняя пружина создает дополнительное усилие на мембрану, в результате чего равновесие наступает при $p_{\text{вых}}$, меньшем, чем $p_{\text{вх}}$, т. е. $p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}} - \Delta p$ (отрицательный сдвиг).

При вывертывании винта создается натяжение верхней пружины, в результате чего равновесие наступает при $p_{\text{вых}}$, большем, чем $p_{\text{вх}}$, т. е. $p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}} + \Delta p$ (положительный сдвиг).

Усилитель мощности (рис. 48) предназначен для повторения входного пневматического сигнала и усиления его по мощности.

Входное давление поступает в камеру D усилителя. Давление питания проходит в камеру A и через постоянное сопротивление в камеру B . При отсутствии входного сигнала воздух питания проходит из камеры B через сопло 4 в камеру Γ и далее через камеру E и сопло 1 в атмосферу.

При повышении входного давления мембрана 2 закрывает сопло 1, а мембрана 3 закрывает сопло 4. Давление в камере

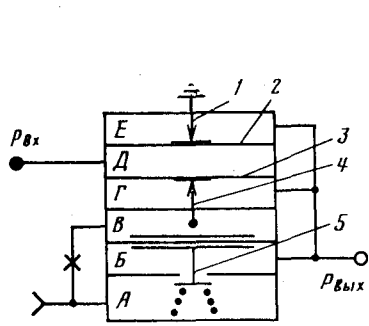


Рис. 48. Усилитель мощности

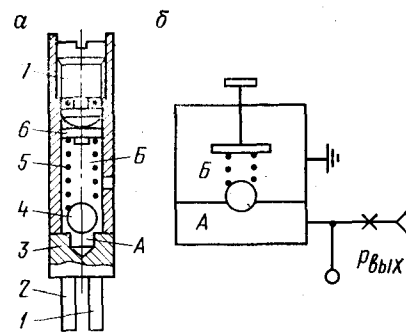


Рис. 49. Задатчик:
а — конструкция; б — схема включения

В повышается, клапан 5 открывается, и давление в камере Б и на выходе увеличивается. Одновременно под действием обратной связи возрастает давление в камерах Г и Е. Сопла 1 и 3 приоткрываются, и воздух питания снова проходит через камеры В, Г и Е в атмосферу. Давление в камере В уменьшается и клапан 5 закрывается. На выходе устанавливается давление $p_{\text{вых}}$, равное выходному давлению $p_{\text{вх}}$. При уменьшении входного давления мембрана 2 открывает сопло 1, а мембрана 3 открывает сопло 4. Часть воздуха из выходной камеры Б проходит через сопло 1 в атмосферу, и давление на выходе понижается. Используя дополнительный источник питания и управляющий клапан 5 большого проходного сечения, усилитель обеспечивает усиление выходного сигнала по мощности (расходу воздуха).

Задатчик (рис. 49) с постоянным сопротивлением предназначен для поддержания постоянного (заданного) давления сжатого воздуха в глухих камерах регулирующих устройств. Он состоит из шарикового клапана, образованного шариком 4 и седлом 3, пружины 5, винта 7, тарелки 6, входной и выходной присоединительных ножек 2 и 1. При подаче через одну из ножек воздуха питания в камеру А в ней устанавливается давление, соответствующее сжатию пружины. Избыток сжатого воздуха через шариковый клапан и камеру Б сбрасывается в атмосферу. Изменяя степень сжатия пружины при помощи винта, можно получить различные значения давления воздуха на выходе задатчика.

Инерционное звено образуется при совместном включении переменного сопротивления и пневмоемкости (рис. 50). Изменение входного давления вызывает приращение расхода воздуха через сопротивление в соответствии с выражением (для малых расходов воздуха)

$$\Delta G = \alpha (p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}). \quad (8.22)$$

В свою очередь, изменение расхода вызовет приращение массы газа в пневмоемкости на величину Δm . Изменение массового расхода можно представить в виде

$$\Delta G = \frac{d\Delta m}{dt}. \quad (8.23)$$

Подставив в соотношение (8.23) выражение (8.11) для пневматического заряда, получим

$$\Delta G = \frac{V}{R_r \Theta} \cdot \frac{dp_{\text{вых}}}{dt}. \quad (8.24)$$

С учетом (8.22)

$$\frac{V}{R_r \Theta} \cdot \frac{dp_{\text{вых}}}{dt} = \alpha (p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}), \quad (8.25)$$

откуда

$$T \frac{dp_{\text{вых}}}{dt} + p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}}, \quad (8.26)$$

где $T = V/\alpha R_r \Theta$ — постоянная времени звена, которую можно менять изменением проводимости переменного сопротивления.

Интегрирующее звено образуется при совместном включении пятимембранного сумматора I и инерционного звена II (рис. 51, а). В структурном отношении это соответствует инерционному звену, охваченному положительной обратной связью (рис. 51, б).

Выходной сигнал сумматора I определяется соотношением

$$p_{\text{вых I}} = p_{\text{вх}} - p_1 + p_2. \quad (8.27)$$

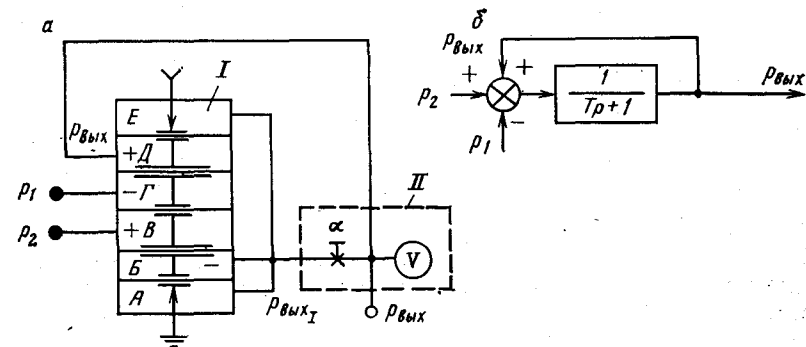


Рис. 51. Интегрирующее звено

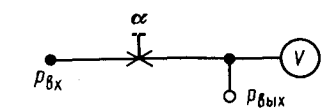


Рис. 50. Инерционное звено

Он же является входным сигналом инерционного звена, для которого справедливо соотношение

$$T \frac{d\rho_{\text{вых}}}{dt} + \rho_{\text{вых}} = \rho_{\text{вх}1}. \quad (8.28)$$

Подставив (8.27) в (8.28), получим

$$T \frac{d\rho_{\text{вых}}}{dt} + \rho_{\text{вых}} = \rho_{\text{вх}} - \rho_1 + \rho_2, \quad (8.29)$$

откуда

$$T \frac{d\rho_{\text{вых}}}{dt} = \rho_2 - \rho_1. \quad (8.30)$$

Это выражение в интегральной форме будет иметь вид

$$\rho_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^t (\rho_2 - \rho_1) dt. \quad (8.31)$$

Величину T — постоянную времени — можно менять путем изменения проводимости α переменного сопротивления инерционного звена. Полагая $x_{\text{вх}} = \rho_2 - \rho_1$, можно легко определить передаточную функцию звена исходя из схемы, показанной на рис. 51, б:

$$W(p) = \frac{1/(Tp + 1)}{1 - 1/(Tp + 1)} = \frac{1}{Tp}. \quad (8.32)$$

§ 53. Элементы и узлы устройств дискретного действия

Наряду с рассмотренными в предыдущем параграфе элементами непрерывного действия в систему УСЭППА входят также элементы дискретного действия, с помощью которых в пневматических системах осуществляются различные логические операции. В устройствах дискретного действия сигналу, равному условно «1», соответствует давление, равное давлению питания (0,14 МПа). Сигналу, условно равному «0», соответствует давление, равное атмосферному.

Основным элементом дискретной техники является трехмембранное пневмореле (рис. 52, а), схема которого не отличается от схемы непрерывного трехмембранного усилителя с двумя соплами, однако конструкция пневмореле несколько проще. В частности, его верхнее и нижнее сопла выполнены в виде отверстий в корпусе. Для статической характеристики усилителя (см. рис. 45) важно, чтобы рабочий интервал был достаточно узок и располагался в начале координат, в то время как статическая характеристика реле должна иметь петлеобразную форму (рис. 52, б). Для создания петлеобразной статической характеристики реле охватывается положительной обратной связью путем соединения нижнего сопла с верхней камерой Г.

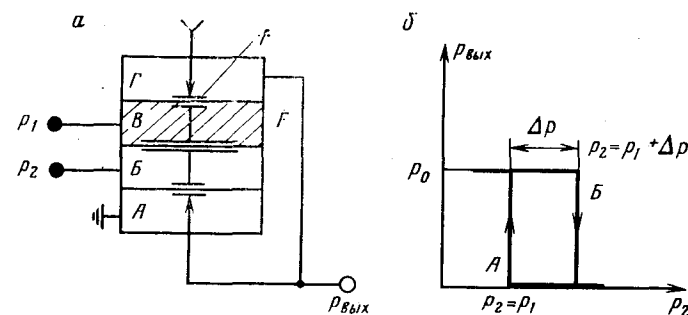


Рис. 52. Трехмембранное пневмореле

а нижней камеры А — с атмосферой. При использовании реле в качестве логического элемента для получения на выходе сигнала «0» или «1» на одном из его входов поддерживается постоянное давление, называемое давлением подпора. В схеме включения реле (см. рис. 52, а) давление подпора подается в камеру В.

Предположим, что $\rho_2 > \rho_1$ и сборка мембран удерживается в верхнем положении. При этом камеры Г и А сообщаются с атмосферой и сигнал на выходе равен «0». При уменьшении ρ_2 , а именно, в момент, когда ρ_2 станет равным ρ_1 (см. точку А, рис. 52, б), сборка мембран перейдет в крайнее нижнее положение, так как давления в камерах А и Г равны между собой. Нижнее сопло закроется, верхнее откроется, и воздух питания будет проходить на выход, что соответствует сигналу «1». После перехода сборки мембран в нижнее положение на нее будет действовать дополнительная постоянная сила, направленная вниз и равная $\rho_0 f$ (эффект положительной обратной связи). В дальнейшем при возрастании давления ρ_2 сборка мембран вновь перейдет в верхнее положение (на выходе «0») при соотношении усилий, определяемом уравнением (см. точку В, рис. 52, б):

$$\rho_2 (F - f) = \rho_1 (F - f) + \rho_0 f \quad (8.33)$$

или при

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta p, \quad (8.34)$$

где

$$\Delta p = \rho_0 f / (F - f). \quad (8.35)$$

Таким образом, ширина Δp петли статической характеристики определяется соотношением эффективных площадей мембран F и f . В пневмореле системы УСЭППА обычно $\Delta p = (0,3 - 0,4) \rho_0$.

Давление подпора определяет расположение статической характеристики относительно максимального и минимального зна-

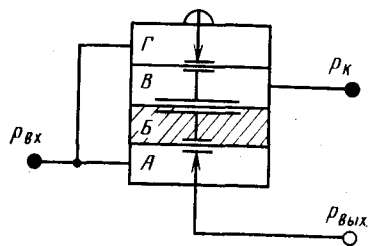


Рис. 53. Пневматический клапан

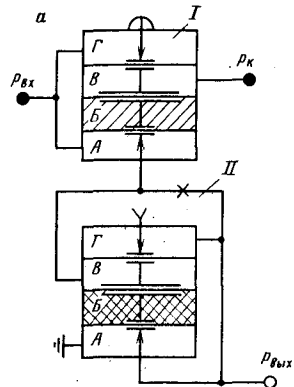


Рис. 54. Дискретный элемент памяти (а) и график его работы (б)

чений давления p_2 (на оси абсцисс). При $p_2 = (0,3-0,4) p_0$ петля располагается симметрично относительно $p_{2\min}$ и $p_{2\max}$.

С помощью одного или нескольких пневмореле можно реализовать принципиально любые логические функции, например, И, ИЛИ, НЕ и др.

Пневматические клапаны предназначены для размыкания и замыкания пневмопроводов. По своему функциональному назначению они аналогичны электрическим управляемым выключателям. Пневматический клапан реализуется с помощью трехмембранного реле путем его включения по схеме, показанной на рис. 53. Входной сигнал под давлением $p_{вх}$ поступает в камеры А и Г пневмореле. В камере В создается подпор, а в камеру В подается командный сигнал под действием p_k . Верхнее сопло заглушено, а нижнее соединено с выходной линией.

При отсутствии командного сигнала сборка мембран занимает крайнее верхнее положение и входной сигнал под давлением $p_{вх}$ поступает через нижнее сопло на выход. При подаче командного сигнала нижнее сопло закрывается, разобщая входную и выходную линии.

Дискретный элемент памяти предназначен для запоминания дискретного пневматического сигнала в течение некоторого времени, определяемого действием командного импульса. Элемент состоит из пневматического клапана I (рис. 54) и пневмореле II, выполняющего функцию повторителя.

При нулевом командном сигнале, т. е. при $p_k = 0$, мембранный блок клапана I под действием давления подпора в камере В поднят вверх, входной сигнал проходит через нижнее сопло клапана I в камеру В реле II и повторяется на выходе. Если $p_{вх} = 0$, мембранный блок реле II под действием давления подпора в камере В находится в верхнем положении, т. е. сопло питания закрыто, а нижнее — открыто, и $p_{ввых} = 0$. Если $p_{вх} = 1$, мембранный блок реле II находится в нижнем положении и $p_{ввых} = 1$.

При подаче командного сигнала $p_k = 1$ нижнее сопло клапана I закрывается, в камере В реле II запоминается величина $p_{вх}$ до момента подачи командного сигнала. Если $p_{вх} = 0$, то $p_{ввых} = 0$ до тех пор, пока $p_k = 1$. Если $p_{вх} = 1$, то $p_{ввых} = 1$ до тех пор, пока $p_k = 1$. Таким образом, $p_k = 1$ означает «запомнить» величину $p_{вх}$, а $p_k = 0$ — «забыть» хранящуюся в памяти величину $p_{вх}$. Для повышения надежности работы элемента памяти выходной сигнал реле подается через постоянное сопротивление в камеру В.

Триггером называют устройство, имеющее два устойчивых состояния и способность переходить из одного устойчивого состояния в другое при подаче сигналов на его вход. Различают триггеры с отдельными и со счетным входами.

Пневматический триггер со счетным входом широко применяется в вычислительных пневматических устройствах (рис. 55). Он состоит из двух соединенных последовательно дискретных элементов памяти I, II и расположенных между ними пневмореле III, выполняющего логическую операцию НЕ.

Пусть в начальный момент t_0 $p_{вх} = 0$, $p_T = 1$ и $p_{ввых}(\overline{p_T}) = 0$. Тогда сигнал на входе I элемента памяти $\overline{p_T} = 0$. Поскольку сигнал на входе элемента памяти I $p_{вх} = 0$, мембранный блок под действием подпора в камере E занимает верхнее положение, сопло в камере D открыто и на выходе I элемента повторяется сигнал $p_{п} = 0$. Этот сигнал поступает на вход элемента II. Однако, так как при $p_{вх} = 0$ под действием подпора в камере II сопло в камере D элемента II закрыто, на выходе этого блока будет повторяться сигнал $p_T = 1$, запомненный ранее. В момент t_1 подается входной сигнал $p_{вх} = 1$. При этом сопло в камере D элемента I закрывается, а в камере D элемента II открывается. В элементе памяти I «запоминается» сигнал $p_{п} = 0$. Вместе с тем выходной сигнал $p_{п} = 0$ с выхода I элемента проходит через открытое сопло в камере D элемента II и повторяется на выходе этого элемента, т. е. $p_T = 0$. Пройдя через элемент НЕ (блок III), сигнал в виде $\overline{p_T} = 1$ поступает на выход триггера и подходит к входу элемента II. При снятии входного сигнала $p_{вх} = 0$ сопло в камере D элемента I открывается, а сопло в камере D элемента II закрывается. На выходе элемента I повторяется проходящий через сопло в камере D сигнал $\overline{p_T} = 1$, т. е. $p_{п} = 1$, а на выходе эле-

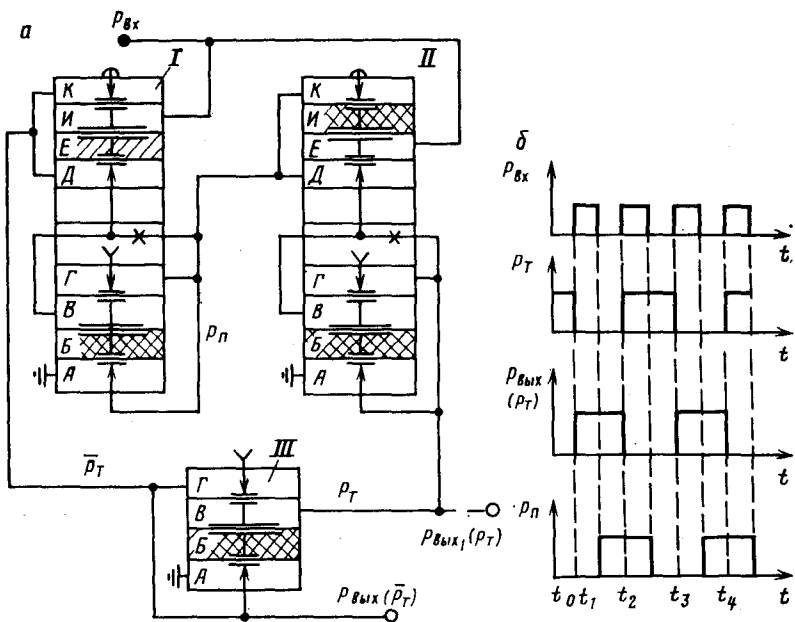


Рис. 55. Пневматический триггер (а) и график его работы (б)

мента II повторяется запомненный ранее сигнал $p_{т}=0$. При прохождении этого сигнала через элемент НЕ, на его выходе образуется сигнал $\bar{p}_{т}=1$, который поступает на выход и к входу элемента I.

При поступлении в момент t_2 второго входного импульса операции повторяются. Разница заключается лишь в том, что в период t_2-t_3 до поступления третьего входного импульса на выходе элемента II будет повторяться сигнал $p_{т}=1$, а после блока НЕ — сигнал $\bar{p}_{т}=0$. Триггер переходит в новое состояние только при поступлении входного сигнала.

В схемах пневматических вычислительных устройств иногда не выводится сигнал $p_{вых} 1$, показанный на рис. 55, а пунктиром. В этом случае триггер имеет только один выходной сигнал $p_{вых}(p_{т})$.

Пневматический генератор прямоугольных колебаний (рис. 56, а) состоит из пневмореле, охваченного отрицательной обратной связью в виде аperiodического звена. В момент t_0 (рис. 56, б) сборка мембран реле за-

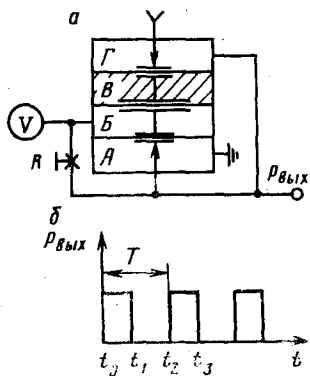


Рис. 56. Пневматический генератор прямоугольных колебаний

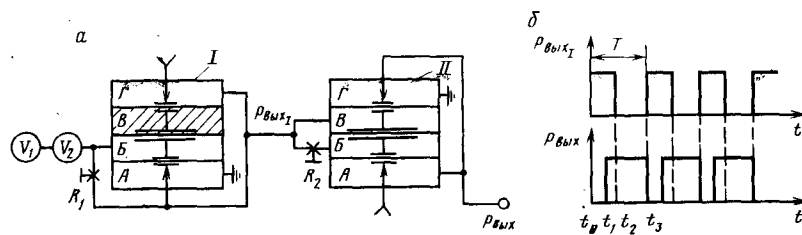


Рис. 57. Генератор с импульсатором

мает нижнее положение и на выход проходит сигнал $p_{вых}=1$. Этот же сигнал поступает через сопротивление R и емкость V в камеру Б. В момент t_1 давление в камере Б становится равным давлению подпора в камере В, сборка мембран переходит в верхнее положение, закрывая сопло питания. Давление на выходе $p_{вых}=0$. При снижении давления в камере Б до давления подпора сборка мембран снова переходит в нижнее положение и давление на выходе $p_{вых}=1$. В результате на выходе получаем прямоугольные импульсы с периодом T , который можно изменять, меняя степень открытия переменного сопротивления.

Генератор с импульсатором (рис. 57, а) применяется для формирования пневматических прямоугольных колебаний с регулируемой длительностью и периодом.

Пусть в момент t_0 (рис. 57, б) сборка мембран генератора находится в нижнем положении. Воздух питания проходит в камеру B_{II} , переводя сборку мембран блока II в нижнее положение. На выходе имеем $p_{вых}=0$. Давление в камере B_{II}^1 отстает от давления в камере B_{II} из-за сопротивления R_2 . В момент t_1 , когда давления в камерах B_{II} и B_{II}^1 уравниваются, сборка мембран переходит в верхнее положение и на выходе $p_{вых}=1$.

Изменяя сопротивление R_2 , можно изменять время действия импульса $p_{вых}=0$. Одновременно повышается давление в камере B_I генератора. В момент t_2 сборка мембран генератора переходит в верхнее положение и давление на его выходе и в камере B_{II} падает до нуля. Так как давление в камере B_{II} отстает от давления в камере B_{II}^1 , давление в камере A_{II} равно давлению питания, а в камере $Г_{II}$ равно нулю, сборка мембран реле II будет удерживаться в верхнем положении ($p_{вых}=1$) до тех пор, пока давление в камере B_I не станет ниже

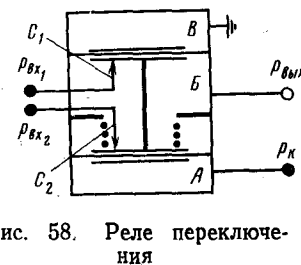


Рис. 58. Реле переключения

¹ Здесь и далее индекс обозначает номер блока.

давления подпора. На выходе генератора (момент t_3) появится сигнал $p_{\text{вых I}}=1$, который переведет сборку мембран реле II в нижнее положение. На выходе блока II получим сигнал $p_{\text{вых}}=0$. Время действия импульса $p_{\text{вых}}=1$ можно регулировать степенью открытия сопротивления R_1 .

Реле переключения (рис. 58) применяется для коммутации пневматических каналов автоматических регуляторов при переходе с автоматического регулирования на ручное. Реле состоит из трех камер, разделенных мембранами, жесткие центры которых являются заслонками сопел C_1 и C_2 . В камеру A подается командный сигнал, камера B соединяется с атмосферой, а камера B является выходной. При $p_k=0$ мембранный блок под действием пружины занимает нижнее положение, открывая сопло C_2 и закрывая сопло C_1 . При этом на выход проходит входной сигнал $p_{\text{вх2}}$. При подаче командного сигнала $p_k=1$ открывается сопло C_1 и закрывается сопло C_2 . На выход проходит входной сигнал $p_{\text{вх1}}$.

§ 54. Регуляторы непрерывного действия

Автоматический регулятор сочетает в себе измерительное, регулирующее и исполнительное устройства. При наиболее употребительном агрегатном принципе построения современного регулятора эти три его основных блока конструктивно выполняются раздельно. Поскольку закон регулирования формируется регулирующим устройством, оно считается основным блоком. Поэтому часто под термином «регулятор» понимают «регулирующее устройство». В этом случае при расчете систем автоматического регулирования необходимо кроме объекта и «регулятора» (регулирующего устройства) учитывать как самостоятельные элементы измерительное и исполнительное устройства.

Известны две формы записи закона регулирования. В соответствии с моделями регуляторов, представленными в § 49 гл. 7, текущее значение x_T регулируемого параметра должно подаваться на вход регулятора с обратным знаком. При этом на выходе регулятора формируется регулирующее воздействие

$$y = f(\varepsilon), \quad \text{где } \varepsilon = x_3 - x_T. \quad (8.36)$$

Однако в реальных конструкциях регуляторов часто выходная величина объекта подается на вход регулятора с тем же знаком. Тогда регулирующее воздействие должно подчиняться соотношению

$$y = -f(\varepsilon'), \quad \text{где } \varepsilon' = x_T - x_3, \quad (8.37)$$

т. е. при использовании $\varepsilon' = x_T - x_3$ необходимо так сформировать регулирующее воздействие y , чтобы оно компенсировало рассогласование.

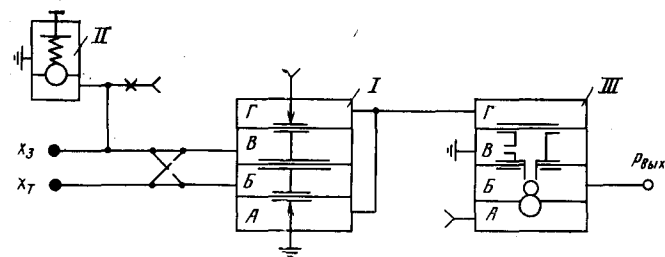


Рис. 59. Позиционное регулирующее устройство ПР1.5

В настоящем параграфе рассматриваются регулирующие устройства системы «Старт», в которых рассогласование формируется в соответствии с выражением (8.37). Сохранив заводскую форму записи и обозначив выходную величину регулирующего устройства $x_{\text{вых}}$, будем иметь в виду, что регулирующее воздействие y по соотношению (8.37) должно обеспечиваться соответствующим включением исполнительного и измерительного устройства.

Позиционное (Пз) регулирующее устройство ПР1.5 (рис. 59) состоит из элемента сравнения I, задатчика II и усилителя мощности III. При выходе регулируемого параметра за установленное значение устройство выдает дискретные пневматические сигналы «0» или «1» в соответствии с уравнениями

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{вых}} &= 1 & \text{при } x_T - x_3 > 0; \\ x_{\text{вых}} &= 0 & \text{при } x_T - x_3 < 0; \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{при настройке} \\ \text{на максимум;} \end{array} \quad (8.38)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{вых}} &= 1 & \text{при } x_T - x_3 < 0; \\ x_{\text{вых}} &= 0 & \text{при } x_T - x_3 > 0; \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{при настройке} \\ \text{на минимум.} \end{array} \quad (8.39)$$

Регулирующее устройство настраивается на максимум или минимум переключением входных каналов. Рассмотрим работу устройства, например, при его настройке на минимум (включение входных каналов по сплошным линиям на рис. 59). Сигнал, пропорциональный текущему значению x_T регулируемого параметра, поступает в камеру В, а задание x_3 — в камеру Б элемента сравнения I. Пока текущее значение больше заданного, сборка мембран находится в верхнем положении, сопло питания закрыто, а выходная линия соединена через камеру А и нижнее сопло с атмосферой. Сигнал на выходе равен 0. Как только текущее значение станет меньше задания, сборка мембран перейдет в нижнее положение, открывая сопло питания и закрывая выход в атмосферу. На выходе элемента сравнения будет сигнал $x_{\text{вых}}=1$. Этот сигнал поступает на вход повторителя — усилителя мощности III, который несколько отличается по кон-

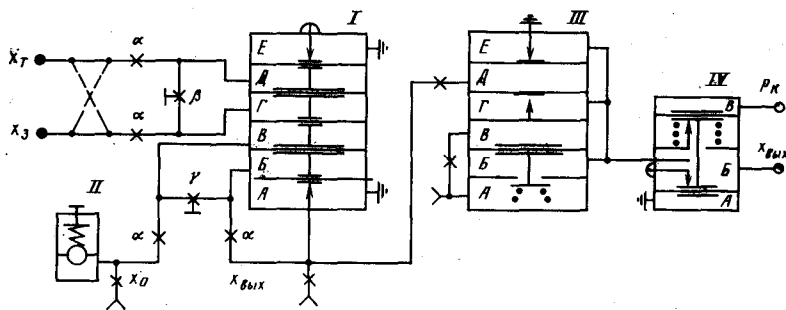


Рис. 60. Пропорциональное регулирующее устройство с линейными статическими характеристиками ПР2.8

струкции от усилителя мощности, представленного в § 49 настоящей главы.

Блок III находится в равновесии, когда давление в камере Б равно давлению в камере Г. При увеличении давления в камере Г сборка мембран отодвигает двойной шариковый клапан, пропуская воздух питания из камеры А в камеру Б и на выход. Благодаря значительному проходному сечению шарикового клапана выходной сигнал усиливается по мощности (расходу).

Пропорциональное (II) регулирующее устройство с линейными статическими характеристиками ПР2.8 (рис. 60) состоит из двухсплового усилителя (пятемембранного элемента сравнения) I, задатчика II, усилителя мощности III и выключающего реле IV. Сигнал x_T , пропорциональный текущему значению регулируемого параметра, поступает в камеру Д усилителя-сумматора I, а сигнал x_3 , пропорциональный заданному значению, — в камеру Г. Усилия, создаваемые этими сигналами, действуют на мембраны элемента сравнения и уравниваются силами, развиваемыми действиями выходного сигнала в линии обратной связи $x_{\text{вых}}$ и опорного сигнала x_0 . Степень воздействия обратной связи определяется настройкой регулируемых сопротивлений. Линейность статических характеристик достигается введением двух сумматоров в прямой канал и в линию обратной связи. Обозначим постоянные сопротивления в обоих сумматорах α , а переменные — β и γ (см. рис. 60).

Рассмотрим случай, когда $\gamma=0$.
Условие равновесия элемента сравнения будет иметь вид

$$p_D - p_G + x_0 - x_{\text{вых}} = 0 \quad (8.40)$$

или

$$x_{\text{вых}} = p_D - p_G + x_0. \quad (8.41)$$

Используя уравнение (8.8) для сумматора на сопротивлениях, можно записать

$$\left. \begin{aligned} p_D &= \frac{\alpha x_T + \beta p_G}{\alpha + \beta}; \\ p_G &= \frac{\alpha x_3 + \beta p_D}{\alpha + \beta}. \end{aligned} \right\} \quad (8.42)$$

Отсюда

$$p_D - p_G = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (x_T - x_3) + \frac{\beta}{\alpha + \beta} (p_G - p_D), \quad (8.43)$$

или

$$(p_D - p_G) \left(1 + \frac{\beta}{\alpha + \beta} \right) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (x_T - x_3). \quad (8.44)$$

Следовательно,

$$p_D - p_G = \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta} (x_T - x_3). \quad (8.45)$$

Подставив (8.45) в (8.41), получим

$$x_{\text{вых}} = K_1 (x_T - x_3) + x_0, \quad (8.46)$$

где

$$K_1 = \alpha / (\alpha + 2\beta). \quad (8.47)$$

Предположим теперь, что $\beta=0$.

Условие равновесия элемента сравнения будет иметь вид

$$x_T - x_3 + p_B - p_B = 0; \quad (8.48)$$

$$p_B - p_B = x_T - x_3. \quad (8.49)$$

Для сумматоров в линии обратной связи

$$p_B = \frac{\alpha x_{\text{вых}} + \gamma p_B}{\alpha + \gamma}; \quad p_B = \frac{\alpha x_0 + \gamma p_B}{\alpha + \gamma}. \quad (8.50)$$

Отсюда разность

$$p_B - p_B = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} (x_{\text{вых}} - x_0) + \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (p_B - p_B), \quad (8.51)$$

или

$$(p_B - p_B) \left(1 + \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} \right) = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} (x_{\text{вых}} - x_0). \quad (8.52)$$

Следовательно,

$$(p_B - p_B) = \frac{\alpha}{\alpha + 2\gamma} (x_{\text{вых}} - x_0). \quad (8.53)$$

Подставив (8.53) в (8.49), получим

$$x_T - x_3 = \frac{\alpha}{\alpha + 2\gamma} (x_{\text{вых}} - x_0) \quad (8.54)$$

или

$$x_{\text{вых}} = \frac{1}{K_2} (x_T - x_3) + x_0, \quad (8.55)$$

где

$$K_2 = \alpha / (\alpha + 2\gamma). \quad (8.56)$$

Объединив уравнения (8.46) и (8.55), получим уравнение всего устройства:

$$x_{\text{вых}} = K (x_T - x_3) + x_0, \quad (8.57)$$

где

$$K = K_1 / K_2. \quad (8.58)$$

Коэффициент усиления K можно изменить с помощью переменных сопротивлений β и γ . Действительно, при $\beta=0$ $K_1=1$, тогда, если $\gamma=0$, то $K_2=1$; $K=1$, $\delta=100\%$; если $\gamma=1$, то $K_2 \rightarrow 0$, $K \rightarrow \infty$; $\delta \rightarrow 0$ (для данного устройства $\delta=2\%$), при $\gamma=0$ $K_2=1$, тогда, если $\beta=0$, то $K_1=1$, $K=1$; $\delta=100\%$; если $\beta=1$, то $K_1 \rightarrow 0$, $K \rightarrow 0$, $\delta \rightarrow \infty$ (для данного устройства $\delta=3000\%$).

Таким образом, для настройки предела пропорциональности δ [$\delta = (1/K) 100\%$] в зоне $\delta=2-100\%$ необходимо закрыть сопротивление β и менять степень открытия сопротивления γ , а для настройки δ в зоне $\delta=100-3000\%$ необходимо закрыть сопротивление γ и менять степень открытия сопротивления β .

Выходной сигнал элемента сравнения I поступает через усилитель мощности III на выключающее реле IV , которое служит для отключения регулятора при переходе на ручное управление.

Для гашения автоколебаний, возникающих при работе устройства, перед камерой D_{III} установлено постоянное сопротивление. Структурная схема регулирующего устройства, построенная на основании уравнений (8.46) и (8.55), показана на рис. 61. Передаточная функция устройства относительно рас-

$$W(p) = K_1 \frac{K_y}{1 + K_y K_2} K_m = K_1 \frac{1}{1/K_y + K_2} 1. \quad (8.59)$$

При $K_y \rightarrow \infty$

$$W(p) \approx K_1 / K_2 = K. \quad (8.60)$$

Пропорционально-интегральное (ПИ) регулирующее устройство с линейными статическими характеристиками ПРЗ.31 (рис. 62) состоит из пятимембранного I и трехмембранного IV элементов сравнения (усилителей), сумматоров на сопротивле-

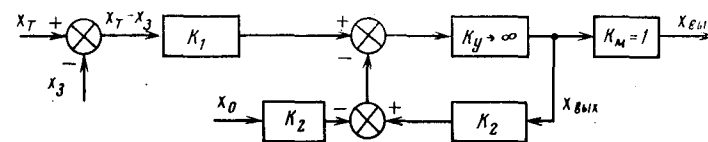


Рис. 61. Структурная схема регулирующего устройства ПР2.8

ниях II и III , усилителя мощности V , повторителя VI и двух выключающих реле VII и $VIII$. Сигнал x_T , пропорциональный текущему значению регулируемого параметра, поступает в камеру B , а сигнал x_3 , пропорциональный его заданному значению, — в камеру B элемента сравнения I . Выходной сигнал p_1 элемента сравнения I поступает через выключающее реле VII на вход инерционного звена (сопротивление λ , емкость V) и одновременно на вход сумматора II . Выходной сигнал инерционного звена x_n подается на элемент сравнения I (камера D) в качестве положительной обратной связи. На вход сумматора на сопротивлениях II кроме сигнала p_1 поступает сигнал x_n , а на вход сумматора III — сигналы x_n и $x_{\text{вых}}$. Схема построена так, что работают либо сумматор II при $\gamma=1$, $\alpha_{III}=0$, либо сумматор III при $\beta=1$, $\alpha_{II}=0$.

Найдем уравнение регулятора при полностью открытом сопротивлении γ ($\gamma=1$, $\alpha_{III}=0$).

Условия равновесия сумматора I :

$$p_1 = x_n + x_T - x_3. \quad (8.61)$$

Уравнение инерционного звена

$$T_n \frac{dx_n}{dt} + x_n = p_1. \quad (8.62)$$

Подставив (8.61) в (8.62), получим

$$T_n \frac{dx_n}{dt} = x_T - x_3. \quad (8.63)$$

или

$$x_n = \frac{1}{T_n} \int_0^t (x_T - x_3) dt. \quad (8.64)$$

Уравнение сумматора II

$$p_2 = (\alpha x_n + \beta p_1) / (\alpha + \beta). \quad (8.65)$$

С учетом (8.61) получим

$$p_2 = \frac{\alpha x_n + \beta x_n + \beta x_T - \beta x_3}{\alpha + \beta}, \quad (8.66)$$

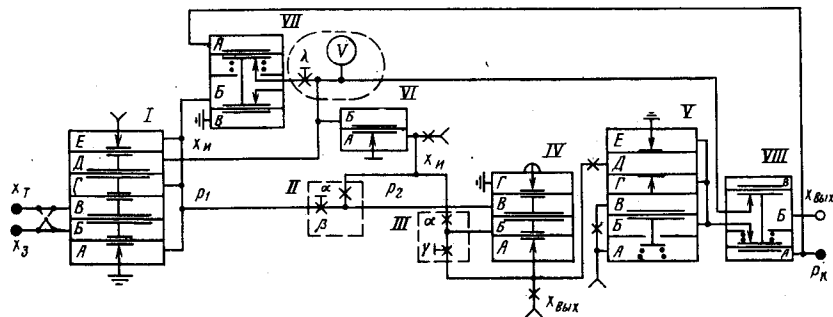


Рис. 62. Пропорционально-интегрирующее устройство с линейными статическими характеристиками ПР3.31

Откуда

$$p_2 = [\beta/(\alpha + \beta)](x_T - x_3) + x_H. \quad (8.67)$$

Уравнение сумматора IV при условии $\gamma = 1$; $\alpha_{III} = 0$

$$p_2 = x_{вых}, \quad (8.68)$$

Откуда

$$x_{вых} = K_1(x_T - x_3) + x_H, \quad (8.69)$$

где

$$K_1 = \beta/(\alpha + \beta). \quad (8.70)$$

Рассмотрим случай, когда сопротивление β полностью открыто ($\beta = 1$; $\alpha_{III} = 0$).

Уравнение сумматора III

$$p_{B\ IV} = \frac{\alpha x_H + \gamma x_{вых}}{\alpha + \gamma}. \quad (8.71)$$

Условие равновесия сумматора IV

$$p_2 = p_{B\ IV}. \quad (8.72)$$

При условии $\beta = 1$; $\alpha_{III} = 0$

$$p_2 = x_T - x_3 + x_H. \quad (8.73)$$

Подставив (8.72) и (8.73) в (8.71), получим

$$x_T - x_3 + x_H = \frac{\alpha x_H + \gamma x_{вых}}{\alpha + \gamma}, \quad (8.74)$$

откуда

$$x_{вых} = \frac{1}{K_2} [(x_T - x_3)] + x_H, \quad (8.75)$$

где

$$K_2 = \gamma/(\alpha + \gamma). \quad (8.76)$$

Объединив (8.64), (8.69) и (8.75), получим общее уравнение регулирующего устройства ПР3.31:

$$x_{вых} = K(x_T - x_3) + \frac{1}{T_{II}} \int_0^t (x_T - x_3) dt, \quad (8.77)$$

где

$$K = K_1/K_2. \quad (8.78)$$

Выходной сигнал элемента сравнения IV поступает на вход усилителя мощности V, а затем на выключающее реле VII. Реле VII и VIII служат для перехода с автоматического регулирования на ручное. При подаче командного импульса $p_K = 1$ выход элемента I отключается от входа инерционного звена (λ , V), отключается регулятор, а линия исполнительного механизма соединяется с камерой D_1 положительной обратной связи. Такое включение предохраняет линию исполнительного механизма от скачка давления при переходе с ручного регулирования на автоматическое. Постоянное сопротивление на входе D_V служит для гашения автоколебаний, возникающих при работе регулятора.

Настройка коэффициента усиления $K = K_1/K_2$ регулятора и предела пропорциональности δ осуществляется с помощью переменных сопротивлений β и γ сумматоров II, III.

При $\beta = 1$, $\alpha_{III} = 0$, $K_1 = 1$. Коэффициент усиления регулятора $K = 1/K_2$, а следовательно, и предел пропорциональности δ меняются с помощью сопротивления γ ($\delta = 2-100\%$); при $\gamma = 1$, $\alpha_{III} = 0$; $K_2 = 1$. Коэффициент усиления $K = K_1$ и предел пропорциональности δ меняются с помощью сопротивления β ($\delta = 100-3000\%$).

Время интегрирования T_{II} меняется с помощью сопротивления λ , $T_{II} = 0,05-100$ мин. Путем структурных преобразований схема регулирующего устройства ПР3.31 (рис. 63) может быть приведена к стандартному виду схемы ПИ-регулятора, представляющей собой параллельно включенные интегрирующее и усилительное звенья (рис. 64, ж).

Рассмотрим случай, когда $\gamma = 1$, а $\alpha_{III} = 0$. Инерционное звено, охваченное положительной обратной связью (рис. 64, а), преобразуется в интегрирующее звено (рис. 64, б). При переносе места приложения сигнала x_H (пропорциональная часть общей схемы) со входа звена с коэффициентом усиления $\beta/(\alpha + \beta)$ (рис. 64, в) на его выход с умножением на коэффициент $\beta/(\alpha + \beta)$ получим схему на рис. 64, г, а затем схему на рис. 64, д. Передаточная функция участка схемы, включающего усилитель IV, охваченной единичной отрицательной обратной связью (рис. 64, е), будет равна 1. Объединяя рис. 64, б, д и е, получим схему, показанную на рис. 64, ж, т. е. передаточная функция регулирующего устройства

$$W_1(p) = K_1 + 1/(T_{II}p). \quad (8.79)$$

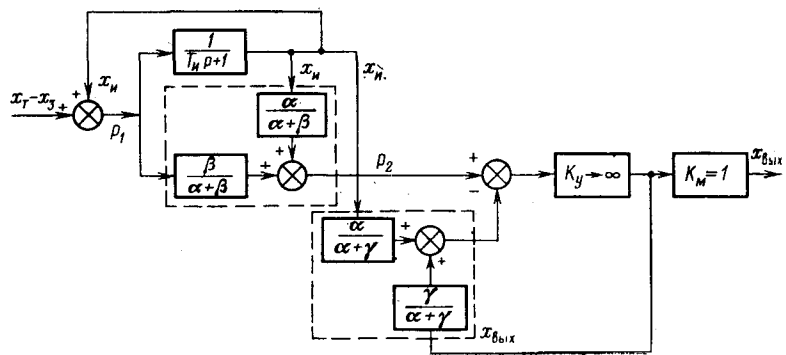


Рис. 63. Структурная схема регулирующего устройства ПР3.31

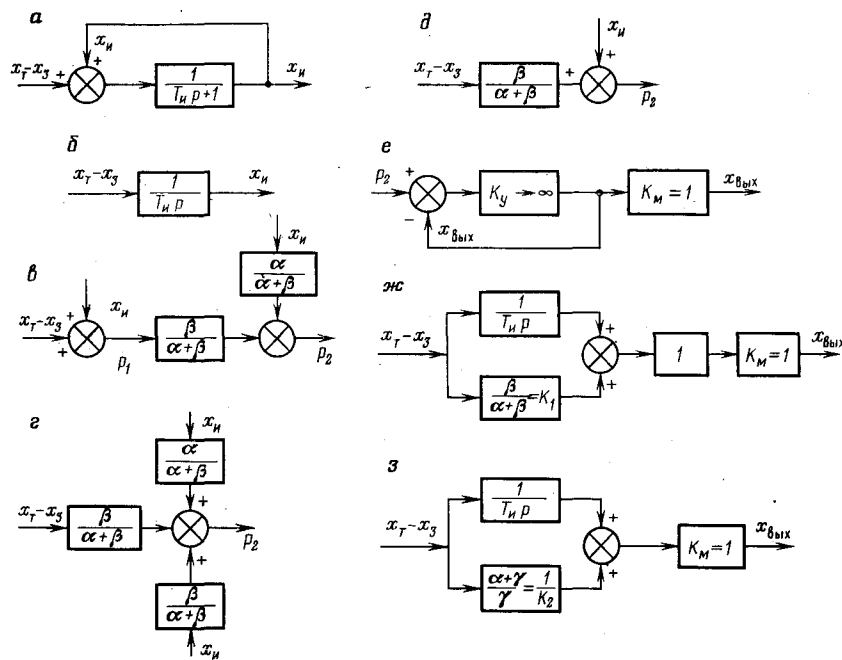


Рис. 64. Структурные преобразования схемы регулирующего устройства ПР3.31

Применив аналогичный прием, при $\beta=1$ и $\alpha_{11}=0$ получим схему, показанную на рис. 64, з.

Передаточная функция регулирующего устройства

$$W_2(p) = \frac{1}{K_2} + \frac{1}{T_n p}. \quad (8.80)$$

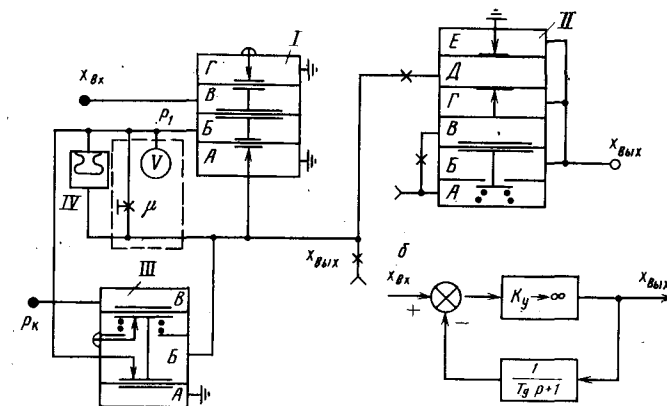


Рис. 65. Регулирующее устройство прямого предварения ПФ2.1

Объединяя (8.79) и (8.80), можно записать передаточную функцию устройства относительно рассогласования в виде

$$W(p) = K + 1/(T_n p), \quad (8.81)$$

где

$$K = K_1/K_2. \quad (8.82)$$

Регулирующее устройство прямого предварения ПФ2.1 (рис. 65, а) состоит из усилителя (элемента сравнения) I, усилителя мощности II, инерционного звена (μ, V), выключающего реле III и емкости с сильфоном IV.

Входной сигнал $x_{вх}$ поступает в камеру B элемента I, а выходной сигнал $x_{вых}$, проходя через инерционное звено (μ, V), поступает в камеру B в виде давления воздуха p_1 .

В состоянии равновесия

$$x_{вх} = p_1. \quad (8.83)$$

Уравнение инерционного звена

$$T_d \frac{dp_1}{dt} + p_1 = x_{вых}. \quad (8.84)$$

Подставив (8.83) в (8.84), получим

$$x_{вых} = x_{вх} + T_d \frac{dx_{вх}}{dt}. \quad (8.85)$$

В случае, когда скорость изменения входного сигнала равна нулю или близка к нему, на выходе устройства отслеживается входной сигнал.

При увеличении входного сигнала, например, с постоянной скоростью сборка мембран элемента сравнения (усилителя) I переместится вниз и давление на выходе резко повысится, при-

чем с некоторым опережением по отклонению к выходному сигналу. Опережение будет тем больше, чем больше скорость изменения входного сигнала и чем меньше степень открытия сопротивления μ . С уменьшением скорости изменения входного сигнала опережение уменьшится и полностью исчезнет, когда входной сигнал перестанет изменяться. Сигнал с выхода элемента сравнения *I* проходит на усилитель мощности *II*. Емкость с сильфоном *IV* гасит высокочастотные помехи. Выключающее реле *III* предназначено для исключения действия предварения. При подаче сигнала $p_k=1$ выходной сигнал элемента *I* подается в камеру *Б* отрицательной обратной связи, минуя инерционное звено (μ, V).

Настроечный параметр устройства ПФ2.1 — время предварения T_d — настраивается с помощью переменного сопротивления μ в пределах 0,05—10 мин.

В динамическом отношении устройство прямого предварения представляет собой усилительное звено с большим коэффициентом усиления, охваченное отрицательной обратной связью в виде инерционного звена (рис. 65, б).

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{K_y}{1 + K_y \cdot 1/(T_d p + 1)} \frac{1}{\frac{1}{K_y} + 1/(T_d p + 1)} \quad (8.86)$$

При $K_y \rightarrow \infty$

$$W(p) \approx T_d p + 1. \quad (8.87)$$

При реализации ПД- и ПИД-регуляторов с помощью блока предварения ПФ2.1 используется тот факт, что заданное значение x_3 регулируемого параметра, установленное однажды, обычно не меняется в процессе регулирования, поэтому

$$\frac{d(x_T - x_3)}{dt} \approx \frac{dx_T}{dt} \quad \text{[при } x_3 = \text{const.} \quad (8.88)$$

Таким образом, через блок предварения (дифференцирования) пропускается только сигнал, пропорциональный текущему значению x_T регулируемого параметра. В таком случае уравнение (8.85) меняет вид

$$x_{\text{вых}} = x_T + T_d \frac{dx_T}{dt}. \quad (8.89)$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирующее устройство ПР3.35 (рис. 66, 67) представляет собой сочетание блока прямого предварения (элементы *I, II*), пропорционального (элементы *IV, V, VI*) и интегрального блоков (элементы *IX, X, XII*). В комплект регулирующего устройства входят также усилитель мощности *VII* и три выключающих реле *III, VIII* и *XI*.

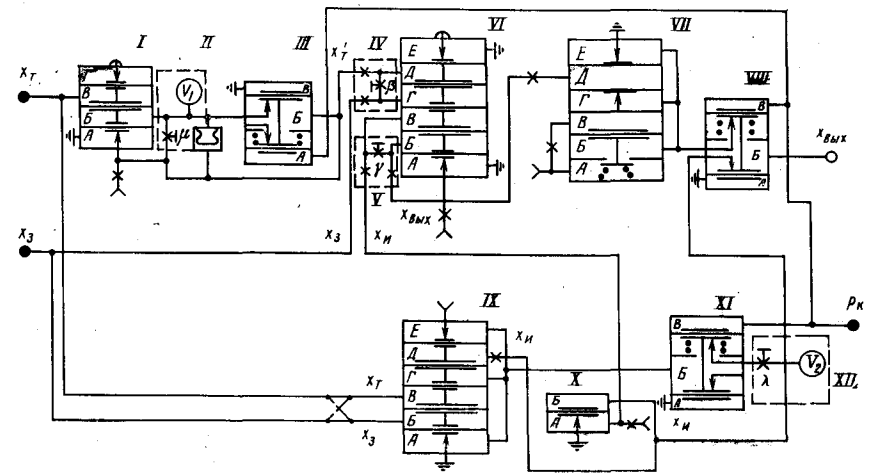


Рис. 66. Пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирующее устройство ПР3.35

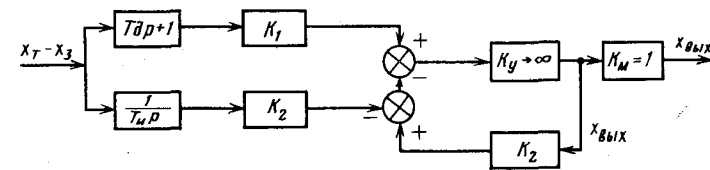


Рис. 67. Структурная схема регулирующего устройства ПР3.35

Сигнал x_T , пропорциональный текущему значению регулируемого параметра, проходит блок предварения, включающий усилитель — элемент сравнения *I* и инерционное звено *II* (μ, V_1), и поступает на вход сумматора на сопротивлениях *IV*. Туда же поступает сигнал x_3 , пропорциональный заданному значению регулируемого параметра. Одновременно сигналы x_T и x_3 поступают на вход интегрального блока (сумматор *IX*). Выходной сигнал интегрального блока $x_{\text{ин}}$ (с выхода повторителя *X*) и выходной сигнал $x_{\text{вых}}$ сумматора *VI* поступают на вход сумматора на сопротивлениях *V*.

Найдем уравнение ПИД-регулирующего устройства, используя полученные в данном параграфе уравнения его отдельных блоков.

На выходе блока предварения образуется сигнал

$$x'_T = x_T + T_d \frac{dx_T}{dt}. \quad (8.90)$$

Уравнение интегрального блока, представляющего собой инерционное звено (λ, V_2), охваченное положительной обратной связью через сумматор IX, имеет вид

$$x_n = \frac{1}{T_n} \int_0^t (x_T - x_3) dt. \quad (8.91)$$

Уравнение пропорционального блока (сумматоры IV, V, VI)

$$x_{вых} = K(x'_T - x_3) + x_n. \quad (8.92)$$

Подставляя (8.90) и (8.91) в (8.92), получаем

$$x_{вых} = K(x_T - x_3) + \frac{1}{T_n} \int_0^t (x_T - x_3) dt + KT_d \frac{dx_T}{dt}. \quad (8.93)$$

В этом уравнении [см. соотношения (8.47) и (8.56)]

$$K = K_1/K_2 = \frac{\alpha/(\alpha + 2\beta)}{\alpha/(\alpha + 2\gamma)}.$$

С помощью переменных сопротивлений β и γ можно изменять коэффициент усиления K , а следовательно, и предел пропорциональности δ .

При $\beta=0, K_1=1$ предел пропорциональности δ меняется с помощью сопротивления γ в пределах 2—100%. При $\gamma=0; K_2=1$ предел пропорциональности δ меняется с помощью сопротивления β в пределах 100—3000%. Время интегрирования T_n меняется с помощью сопротивления λ ($T_n=0,05 \div 100$ мин), а время предварения T_d — с помощью сопротивления μ ($T_d=0,05 \div 10$ мин).

Выключающие реле предназначены для перехода с автоматического регулирования на ручное. При подаче командного сигнала $p_k=1$ реле III отключает инерционное звено II блока предварения, реле VIII отключает выход усилителя мощности VII от линии исполнительного механизма, а реле XI, отключая инерционное звено XII, соединяет камеру положительной обратной связи сумматора IX с линией исполнительного механизма, подготавливая ее к обратному переходу на автоматическое регулирование.

Передаточная функция относительно рассогласования

$$W(p) = \left[(T_d p + 1) K_1 + \frac{1}{T_n p} K_2 \right] \cdot \frac{K_y}{1 + K_y K_2}. \quad (8.94)$$

При $K_y \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} W(p) &= \left[(T_d p + 1) K_1 + \frac{1}{T_n p} K_2 \right] \frac{1}{K_2} = \\ &= \frac{K_1}{K_2} (T_d p + 1) + 1/T_n p \end{aligned} \quad (8.95)$$

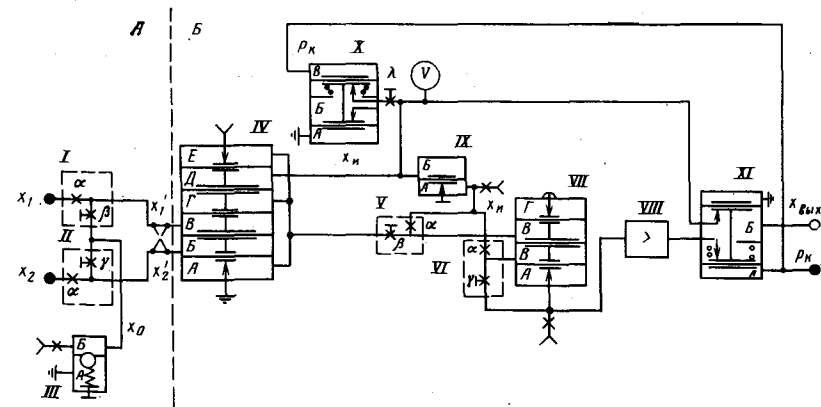


Рис. 68. Регулирующее устройство соотношения с линейными статическими характеристиками ПР3.33

или

$$W(p) = K(T_d p + 1) + 1/T_n p, \quad (8.96)$$

где

$$K = K_1/K_2. \quad (8.97)$$

Регулирующее устройство соотношения ПР3.33 (рис. 68) с линейными статическими характеристиками предназначено для поддержания постоянного соотношения двух параметров и состоит из двух основных частей: блока соотношения А и регулирующего блока В. Первый образуется из двух сумматоров на сопротивлениях I, II и задатчика III, а второй представляет собой ПИ-регулирующее устройство, собранное по схеме регулирующего устройства ПР3.31.

Сигналы x_1 и x_2 , пропорциональные текущим значениям технологических параметров, поступают на вход ПИ-регулирующего устройства через сумматоры на сопротивлениях. Часть воздуха из проточных камер сумматоров сбрасывается через переменное сопротивление и камеру А задатчика в атмосферу, причем в камере В поддерживается постоянное давление, равное 0,02 МПа.

Уравнение сумматора I на сопротивлениях имеет вид

$$x'_1 = \frac{\alpha x_1 + \beta x_0}{\alpha + \beta}. \quad (8.98)$$

Путем несложных преобразований это соотношение может быть представлено в виде

$$x'_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (x_1 - x_0) + x_0 \quad (8.99)$$

или

$$x_1' = C_1 (x_1 - x_0) + x_0, \quad (8.100)$$

где

$$C_1 = \alpha / (\alpha + \beta). \quad (8.101)$$

Аналогично для сумматора II

$$x_2' = C_2 (x_2 - x_0) + x_0, \quad (8.102)$$

где

$$C_2 = \alpha / (\alpha + \gamma). \quad (8.103)$$

Элемент сравнения IV регулирующего блока находится в равновесии при $x_1' = x_2'$, т. е.

$$C_1 (x_1 - x_0) = C_2 (x_2 - x_0). \quad (8.104)$$

В камере B датчика III поддерживается давление $x_0 = 0,02$ МПа, равное нижнему значению стандартного диапазона пневматических сигналов (0,02—0,1 МПа). Это давление непрерывно вычитается из соответствующих сигналов x_1 и x_2 . При этом уравнение (8.104) будет иметь вид

$$\frac{x_1 - 0,02}{x_2 - 0,02} = \frac{C_2}{C_1}. \quad (8.105)$$

При фиксированных значениях β и γ получим

$$\frac{x_1 - 0,02}{x_2 - 0,02} = C. \quad (8.106)$$

Меняя проводимости переменных сопротивлений, можно устанавливать значение коэффициента соотношения двух параметров в пределах 0,1—10.

Регулирующий блок B будет вырабатывать сигнал

$$x_{\text{вых}} = K (x_1' - x_2') + \frac{1}{T_n} \int_0^t (x_1' - x_2') dt. \quad (8.107)$$

§ 55. Экстремальные регуляторы

Действие экстремального регулятора сводится к отысканию экстремума статической характеристики объекта и поддержанию регулируемого параметра вблизи найденного экстремального значения (см. § 49, гл. 7). Отыскание экстремума осуществляется методом поиска, который можно организовать различными способами. Известно, что экстремумом функции $y = f(x)$ называются такие ее значения $f(x_0)$, для которых справедливы следующие неравенства [39]: $f(x_0 + h) < f(x_0)$ — для случая максимума; $f(x_0 + h) > f(x_0)$ — для случая минимума при любых малых значениях h , положительных и отрицательных.

Очевидно, что для определения экстремального значения функции необходимо проверить либо приращение функции при положительных и отрицательных h , либо поведение производной справа и слева от предполагаемой точки экстремума. Исходя из этого разработаны два основных способа поиска экстремума.

Поиск по приращению состоит в том, что при перемещении рабочей точки по характеристике объекта определяется приращение этой функции, соответствующее приращению входного сигнала объекта. Если характеристика достигает экстремума, то при дальнейшем изменении входного сигнала приращение изменит знак. При переходе через максимум приращение станет из положительного отрицательным [$f(x_0 + h) < f(x_0)$], а при переходе через минимум — наоборот. Тогда правильным направлением движения при поиске максимума будет то, которому соответствуют положительные приращения выходной величины, а при поиске минимума — отрицательные.

Поиск по производной заключается в формировании управляющего сигнала по результатам измерения крутизны характеристики объекта в данной точке. Если производная исследуемой функции по входному параметру положительна, то для достижения максимума необходимо увеличить входной сигнал объекта, а для достижения минимума — уменьшить его. При переходе через экстремум производная меняет знак.

Известно несколько методов организации поиска. Поиск по приращению обычно реализуется либо *методом запоминания экстремума*, либо *шаговым методом*. Поиск по производной осуществляется либо *измерением производных по времени*, либо *использованием периодического поискового сигнала* (с модуляцией). В пневматических экстремальных регуляторах используется поиск по приращению, реализуемый методом запоминания экстремума или шаговым методом.

Метод запоминания экстремума заключается в использовании разности между текущим и экстремальными значениями характеристики объекта для нахождения момента реверса системы. Для определения экстремального значения регулируемого параметра используется запоминающее устройство. Поиск по методу запоминания иллюстрируется графиком, показанным на рис. 69. Предположим, начиная с момента t_0 под действием регулирующего воздействия y регулируемый параметр x_T начинает возрастать. Запоминающее устройство следит за этим изменением. Как только величина x_T достигнет своего максимального значения x_{max} , запоминающее устройство зафиксирует эту величину, и при уменьшении x_T запомненное значение $x_3 = x_{\text{max}}$ остается неизменным. При $x_T = x_{\text{max}}$ система продолжает двигаться в том же направлении в течение некоторого времени, определяемого зоной нечувствительности регулятора γ .

В момент t_1 , когда разность между запомненным x_3 и текущим x_T значениями регулируемого параметра станет равной γ

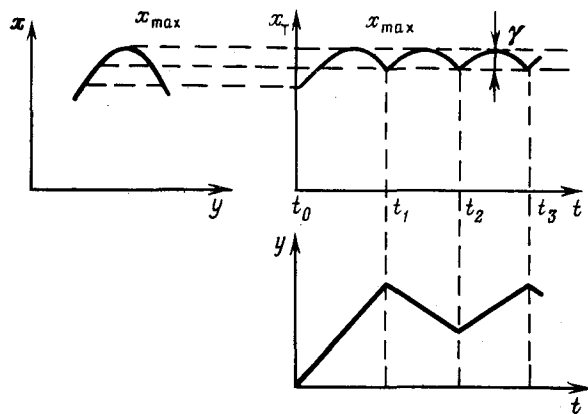


Рис. 69. График поиска по методу запоминания экстремума

($x_3 - x_T = \gamma$), система реверсируется. В дальнейшем принцип поиска экстремума повторяется. Таким образом, регулятор будет совершать «рыскание» с постоянной скоростью возле экстремального значения регулируемого параметра x_{\max} .

Шаговый метод поиска экстремума иллюстрируется графиками, показанными на рис. 70. В такой системе через равные промежутки времени (шаги), задаваемые импульсным элементом, осуществляются принудительные регулирующие воздействия Δy и измеряется разность запомненного значения выходной величины за предыдущий шаг x_3 с ее новым значением x_T . При $x_{T1} > x_{30}$, что означает, что выходная величина увеличивается, осуществляется новое регулирующее воздействие Δy , в запоминающее устройство заносится новое значение x_{31} , которое сравнивается со значением регулируемого параметра x_{T2} и т. д.

При $x_T = x_{\max}$ система продолжает двигаться в том же направлении в течение некоторого времени, определяемого зоной нечувствительности регулятора γ . В момент времени t_1 , когда разность между запомненным на предыдущем шаге значением x_3 и текущим значением x_T регулируемого параметра станет равной γ ($x_3 - x_T = \gamma$), система реверсируется. При этом снова по команде импульсного элемента регулирующее воздействие изменяется шагами Δy и измеряется разность $x_3 - x_T$. В результате регулятор поддерживает экстремальное для данных условий значение регулируемого параметра, не давая ему отклониться на величину, превышающую зону нечувствительности.

Пневматический самонастраивающийся регулятор АРС-2-О (рис. 71) работает по принципу запоминания экстремума и предназначен для поддержания оптимального режима работы малоинерционных технологических процессов [6]. Все элементы, входящие в состав регулятора, образуют три функ-

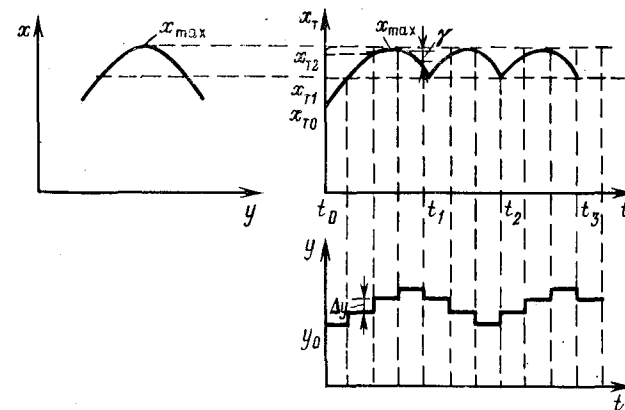


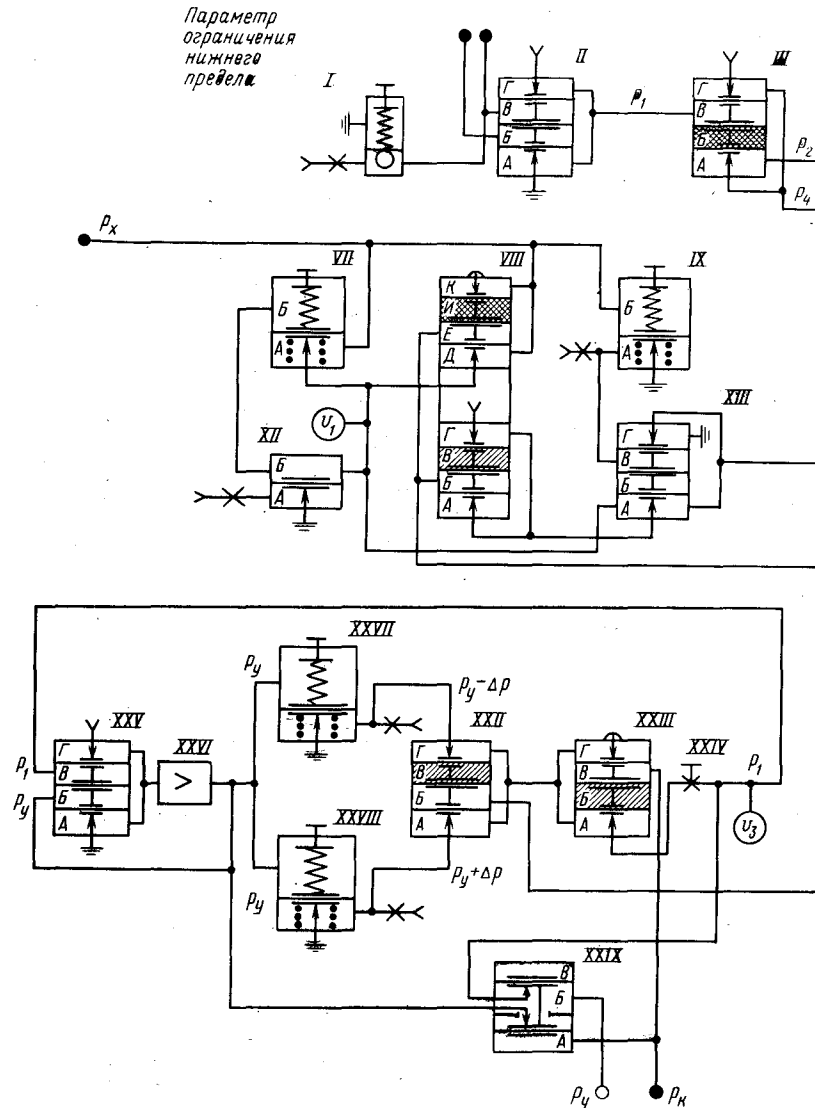
Рис. 70. График шагового метода поиска

ональных блока: сравнения и запоминания, интегратора, ограничения.

По схеме на рис. 71 регулятор настроен на поиск максимума. Рассмотрим принцип действия регулятора. *Блок сравнения и запоминания* образуется элементами с VII по XV.

Пневматический сигнал под действием давления сжатого воздуха p_x , пропорциональным текущему значению регулируемого параметра, через повторитель со сдвигом IX поступает в камеру В элемента сравнения XIII, в камеры Д и К элемента памяти VIII и в камеру А повторителя с запоминанием VII. Пока суммарное усилие от действия пружины и давления p_x остается меньше усилия пружины в камере B_{VII}, сопло в камере A_{VII} закрыто и входное давление не поступает на выход повторителя. Когда p_x увеличивается настолько, что сопло в камере A_{VII} открывается, сигнал под действием давления p_x через повторитель XII проходит в камеру B_{VII}. Как только давление p_x начнет уменьшаться, сопло в камере A_{VII} закроется, а в камере B_{VII} и в линии повторителя запомнится давление $p_3 = p_{x \max}$. Сигнал под действием давления p_3 поступает в камеру B_{XIII} элемента сравнения и к закрытому соплу в камере D_{VIII}. На элементе XIII сравниваются текущее значение p_x с запомненным p_3 . Дальнейшее уменьшение p_x означает p_x равным $p_{x \max}$, пока разность между p_3 и текущим значением p_x не достигнет заданной величины $p_3 - p_x = \gamma$. Зона нечувствительности регулятора настраивается с помощью повторителя со сдвигом IX, который увеличивает текущее значение давления p_x на величину γ . При $p_3 - p_x = \gamma$ сопло в камере A_{XIII} откроется и из линии питания через сопло в камере G_{VIII} на выход элемента XIII пройдет сигнал, равный 1. Этот сигнал повторяется на элементе XIV и поступает в камеры D_{XI} и K_{XI} дискретного элемента памяти, который вместе с переменным

сопротивлением XV образует импульсатор, вырабатывающий командный импульс p_n длительностью T . Пока в камере I_{X1} давления нет, сопло в камере D_{X1} открыто и через него выходной сигнал блока XIV поступает в камеру B_{X1} . Сопло в камере A_{X1} закрывается, а сопло в камере Γ_{X1} откроется, и на выходе элемента памяти появится импульс $p_n=1$, который поступает на блок интегратора. Появление импульса $p_n=1$ в момент $p_a - p_x = \gamma$ приводит к реверсу выходного давления регулятора p_y . Помимо основного назначения импульс p_n производит ряд



вспомогательных операций. Попадая в камеру I_{X1} , он осуществляет самоблокировку элемента XI. При этом поступление воздуха в камеру B_{X1} прекратится и давление в ней начнет постепенно падать пропорционально степени открытия дросселя XV. Когда давление в камере B_{X1} сравняется с давлением подпора в камере B_{X1} , сопло в камере Γ_{X1} закроется и выходная линия элемента XI через камеру A_{X1} сообщится с атмосферой. Импульс p_n исчезнет. Для увеличения пределов времени T задержки импульса p_n перед сопротивлением XV установлена

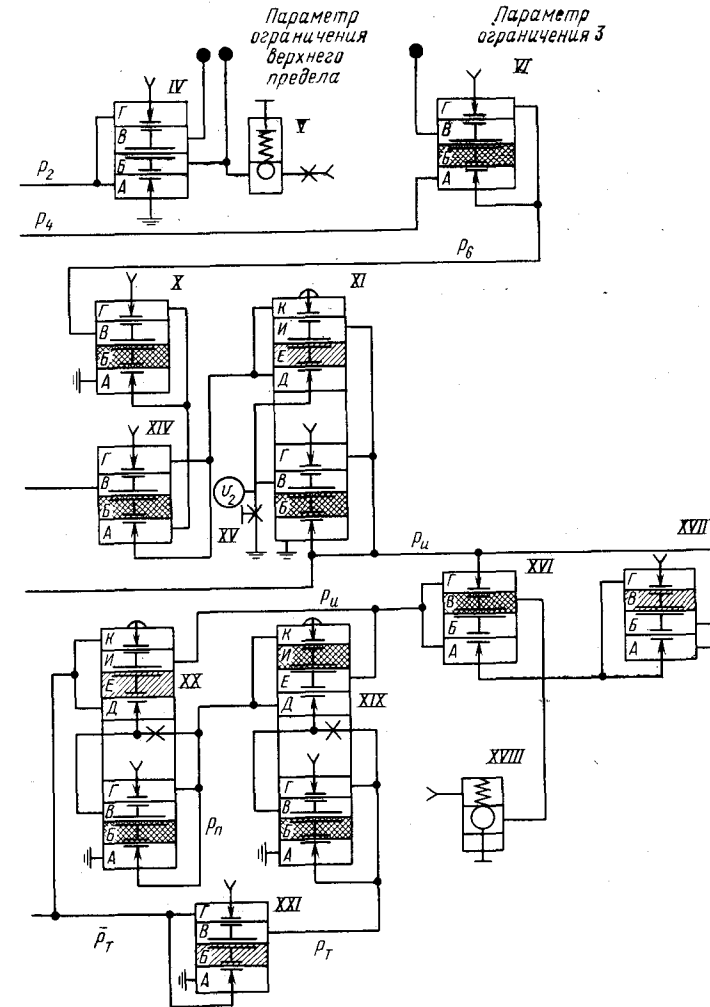


Рис. 71. Самонастраивающийся регулятор APC-2-0

пневмоёмкость V_2 . Время задержки регулируется переменным сопротивлением XV.

Импульс p_n , попав в камеру B_{VIII} , открывает сопло в камере A_{VIII} , сообщая эту камеру с атмосферой. Выходной сигнал элемента XIII сбрасывается до 0, т. е. импульс p_n устраняет возможность ложного срабатывания импульсатора.

Кроме того, импульс p_n производит раззапоминание давления p_3 . Проходя в камеру E_{VIII} , импульс p_n открывает сопло в камере D_{VIII} , через которое текущее давление p_x поступает в повторитель XII и в камеру B_{VII} .

Блок интегратора образуется элементами XVI—XXVIII.

Импульс p_n с выхода блока сравнения и запоминания проходит на вход триггера через сопло в камере Γ_{XVI} , открытое под действием сигнала «1», поступающего от кнопки XVIII. Триггер образуется элементами XIX, XX и XXI (см. § 50 настоящей главы). Состояния триггера в зависимости от сигнала p_n :

p_n	0	1	0	1
\bar{p}_T	0	1	1	0
p_T	1	0	0	1
p_n	1	1	0	0

В соответствии со схемой на рис. 71 используется один выход триггера, по которому сигнал \bar{p}_T поступает в камеру B реле XXII. Если $\bar{p}_T=1$, то закрыто сопло в камере Γ_{XXII} и открыто сопло в камере A_{XXII} . В результате реле XXII пропускает через камеру A_{XXII} сигнал $p_y + \Delta p$ с выхода повторителя XXVIII с положительным сдвигом. Если $\bar{p}_T=0$, то реле XXII пропускает через камеры Γ_{XXII} и A_{XXII} сигнал $p_y - \Delta p$ с выхода повторителя XXVII с отрицательным сдвигом.

Блок собственно интегратора (элементы XXII—XXVIII) собран по схеме инерционного звена (переменное сопротивление XXIV и емкость V_3), охваченного положительной обратной связью через усилитель XXV, включенный по схеме сумматора. Действительно, сумматор XXV в равновесии при

$$p_1 = p_y. \quad (8.108)$$

Уравнение инерционного звена XXIV— V_3 , например, при включении повторителя XXVIII с положительным сдвигом будет иметь вид

$$T_1 \frac{dp_1}{dt} + p_1 = p_y + \Delta p. \quad (8.109)$$

Подставив (8.108) в (8.109), получим

$$\frac{dp_y}{dt} = \frac{1}{T_1} \Delta p. \quad (8.100)$$

Таким образом, при поступлении импульса $p_T=1$ выходной сигнал регулятора p_y будет изменяться с постоянной скоростью, определяемой при $\Delta p = \text{const}$ величиной постоянной времени

T_1 , т. е. степенью открытия сопротивления XXIV. Изменяя степень открытия сопротивления XXIV, можно изменять скорость изменения p_y .

Выходной сигнал триггера \bar{p}_T меняет свою величину при поступлении импульса $p_n=1$. Следовательно, подключение повторителей с положительным либо с отрицательным сдвигом и тем самым реверс выходного параметра p_y регулятора наступают при появлении импульса p_n , т. е. при $p_3 - p_x = \gamma$.

Блок ограничений образуется элементами с I по VI. Он предусматривает выдачу импульса p_n , а следовательно, и реверс регулирующего воздействия p_y при достижении какими-либо другими параметрами процесса значений выше или ниже допустимых величин.

Элемент сравнения II работает на ограничение нижнего предела, а элемент сравнения IV — на ограничение верхнего предела. Величины ограничений задаются задатчиками I и V.

Параметр, величина которого должна быть ограничена снизу, поступает в камеру B_{II} . Пока параметр остается больше давления ограничения, сопло в камере Γ_{II} закрыто и на выходе элемента сравнения II $p_1=0$. При этом $p_4=0$ и $p_6=0$.

При уменьшении параметра до величины ограничения $p_1=1$, $p_4=1$ и через сопло в камере A_{VI} на элемент X пройдет сигнал $p_6=1$. Этот сигнал откроет сопло в камере A_X и через сопло в камере A_{IV} пройдет на вход дискретного элемента памяти XI. В результате образуется импульс $p_n=1$ и происходит реверс регулирующего воздействия p_y . Аналогично работает схема при ограничении верхнего предела и третьего параметра.

Для экстренного реверса предусмотрена кнопка XVIII, при включении которой прекращается подача сигнала в камеру B_{XVI} .

Настроечные параметры регулятора можно изменять в следующих пределах: зона нечувствительности $\gamma=1,5-6,0$ кПа, время задержки импульса p_n $T=2-1800$ с, скорость поиска $V=0,2-60$ кПа/мин.

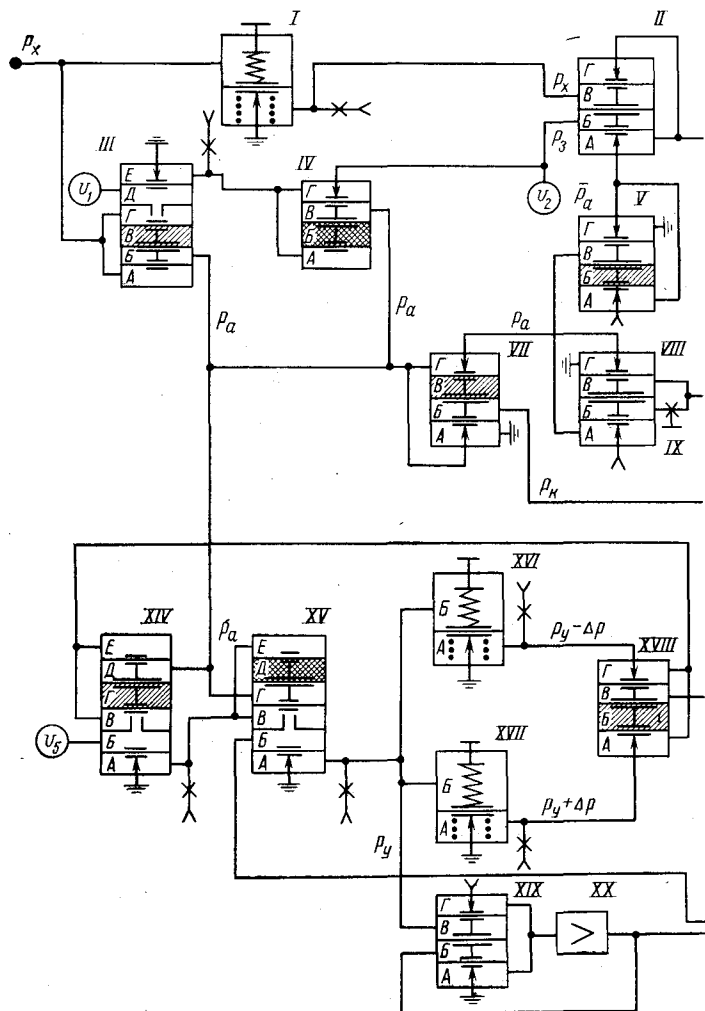
Пневматический самонастраивающийся регулятор APC-2-ОИ (рис. 72) работает по шаговому методу и предназначен для поддержания оптимального режима работы инерционных объектов [6]. Регулятор состоит из трех функциональных блоков: блока импульсного запоминания и сравнения, блока интегратора и блока ограничений (на схеме не показан). По схеме рис. 72 регулятор настроен на поиск максимума. Рассмотрим принцип действия регулятора.

Блок импульсного запоминания и сравнения, включающий в себя элементы I—XI, предназначен для сравнения текущего p_x и запомненного p_3 давлений, выдачи командного сигнала p_n и для генерирования импульсов, обеспечивающих шаговый поиск экстремума.

Давление p_x через повторитель I со сдвигом поступает в камеру B элемента сравнения II . Одновременно оно проходит в камеры A и Γ непрерывного элемента памяти III . В момент включения регулятора в работу давление в камере B равно атмосферному. Сопло в камере Γ_{III} под действием подпора в камере B_{III} открыто, и давление p_x попадает в камеру запоминания D_{III} , объем которой увеличен за счет емкости V_1 .

Выходным давлением элемента III является давление p_3 , которое формируется в камере E_{III} путем отслеживания давления p_x , поступающего в камеру D_{III} .

Если сопло в камере Γ_{III} закрыто, то p_3 равно тому значению p_x , которое было в камере D_{III} в момент закрытия сопла.



Для формирования равномерно чередующихся импульсов сжатого воздуха «0» и «1», обеспечивающих шаговый поиск экстремума, служит генератор с импульсатором (см. § 53 настоящей главы).

Генератор (элементы X, XI, V_3, V_4) и импульсатор (элементы VII, IX) формируют импульс p_a , который управляет работой элементов III и IV , а также, проходя через элемент V (операция НЕ), работой элемента сравнения II .

При выдаче импульса $p_a=1$ сопло в камере Γ_{III} закрыто, а сопло в камере Γ_{IV} открыто. Запомненное на предыдущем шаге давление p_3 проходит в камеру B_{II} элемента сравнения. Однако, так как сигнал на выходе элемента V (НЕ) $p_a=0$, пи-

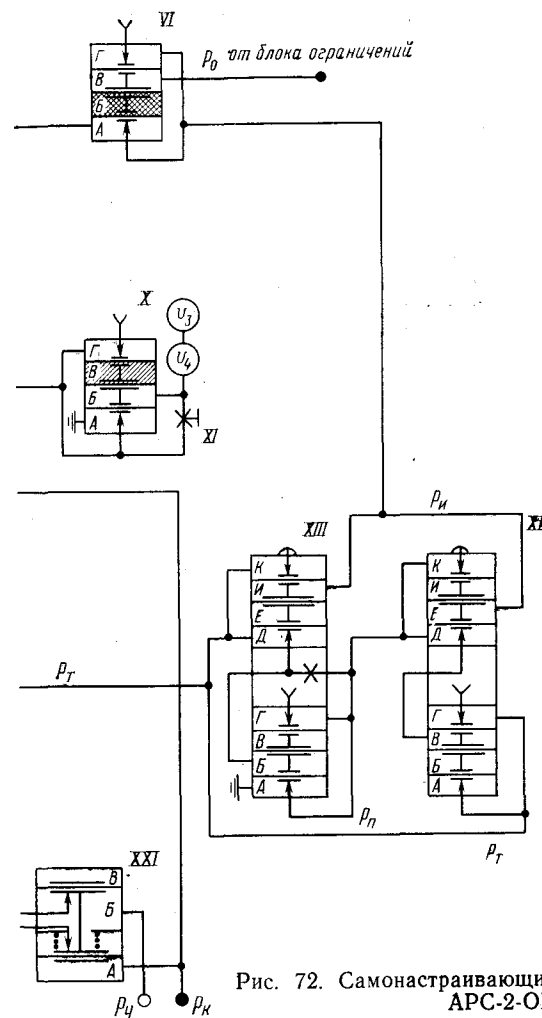


Рис. 72. Самонастраивающийся регулятор АРС-2-ОИ

тание к соплу в камере A_{II} не подводится. При $p_a=0$ ($\bar{p}_a=1$) сопло в камере Γ_{III} открывается, т. е. происходит снятие запомненного значения p_a на предыдущем шаге. Сопло в камере Γ_{IV} закрывается, а к соплу камеры A_{II} подводится питание от элемента V .

Если $p_a - p_x < \gamma$, сопло в камере A_{II} закрыто и давление на выходе элемента сравнения равно нулю. При $p_a - p_x = \gamma$ сопло в камере A_{II} открывается, на выходе элемента сравнения появляется сигнал $p_{II}=1$, который через промежуточное реле VI поступает на вход блока интегратора.

Величина γ — зона нечувствительности регулятора — задается с помощью повторителя I со сдвигом. Введение этой составляющей предотвращает преждевременное срабатывание элемента сравнения и, следовательно, ложный реверс выходного параметра регулятора.

Блок интегратора предназначен для изменения величины и направления выходного давления p_y регулятора по команде p_{II} элемента сравнения. Командный импульс p_{II} поступает на триггер, образованный элементами XII и $XIII$ и имеющий один выход p_T . Состояния триггера при изменении командного сигнала p_{II} :

p_{II}	0	1	0	1
p_T	0	1	1	0
p_{II}	1	1	0	0

Триггер меняет свое состояние лишь при появлении командного импульса p_{II} .

Выходной сигнал триггера p_T управляет работой реле $XVIII$, которое соединяет выходную линию регулятора p_y с одним из двух повторителей со сдвигом XVI или $XVII$. Элемент XX построен так, что он уменьшает выходное давление на постоянную величину Δp , а элемент VII — увеличивает его на величину Δp за каждый шаг.

Выходное давление регулятора p_y формируется в камере A элемента памяти XV , из которого оно проходит в камеры B повторителей XVI и $XVII$. Выходные камеры повторителей соединены с верхним и нижним соплами реле $VIII$.

При $p_T=0$ и $p_a=1$ (см. рис. 72) сопло в камере B_{XIV} закрыто, а сопло в камере B_{XV} открыто. На выходе регулятора имеем сигнал p_y , который проходит через повторитель со сдвигом VII и в виде $p_y + \Delta p$ — через нижнее сопло реле $XVIII$ — камеру B_{XIV} элемента памяти. При $p_a=0$ сопло в камере B_{XIV} открывается, а в камере B_{XV} закрывается. Давление $p_y + \Delta p$ запоминается в камере B_{XIV} . Далее, если сигнал на выходе триггера не меняется ($p_T=0$), к выходному сигналу ($p_y + \Delta p$) снова добавляется величина Δp . В момент, когда $p_a - p_x = \gamma$, $p_{II}=1$, триггер меняет свое состояние ($p_T=1$) и переключает реле $XVIII$, подключая повторитель с отрицательным сдвигом

XVI . Из выходного сигнала будет вычтена величина Δp , которая через элемент памяти XIV пройдет на выход. Таким образом, при изменении состояния триггера происходит реверс изменения выходного сигнала p_y . Теперь при каждом шаге выходное давление будет уменьшаться на величину Δp до следующей смены состояния триггера. Работа регулятора иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 73.

Сигнал о выходном давлении после усиления с помощью двухсоплового усилителя XIX и усилителя мощности XX проходит через выключающее реле XXI . При переходе на ручное управление к регулятору подводится сигнал $p_K=1$. Блок ограничений, который полностью аналогичен соответствующему блоку регулятора АРС-2-О и поэтому не показан на рис. 72,

выдает сигнал $p_0=1$ при выходе каких-либо других параметров за заданные пределы. В этом случае формируется сигнал $p_a=1$ и происходит реверс выходной величины регулятора.

Настроенные параметры регулятора можно изменять в следующих пределах: зона нечувствительности $\gamma=1,5-6,0$ кПа, шаг импульса (период колебаний генератора) 1—60 мин; длительность периода сравнения (импульса \bar{p}_a) 1—60 с.

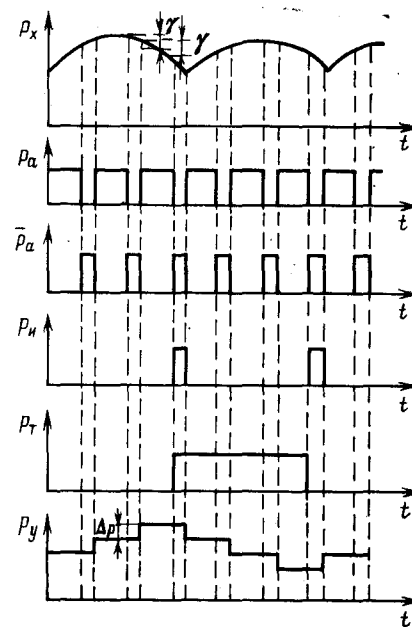


Рис. 73. Графики, отражающие принцип действия регулятора АРС-2-ОИ

ГЛАВА 9.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

§ 56. Гидравлические регуляторы

Технические средства, предназначенные для построения гидравлических систем, создаются в настоящее время преимущественно в составе агрегатного комплекса средств гидравлического регулирования (АСГР). В состав комплекса входят: средства получения информации (измерительные устройства с гидравлическим выходом), средства обработки информации (гидравлические регулирующие устройства), средства использования информации (гидравлические исполнительные устрой-

ства), вспомогательные устройства (например, усилители мощности).

Основные параметры и условия эксплуатации гидравлических устройств АСГР

Давление питания, МПа	0,4 ± 0,04
Диапазон изменений гидравлических входных и выходных сигналов, МПа	0,1—0,3
Давление в сливной линии, не более, МПа	0,04
Рабочая жидкость	Минеральные масла
Вязкость рабочей жидкости, м ² /с	(7—70) · 10 ⁻⁶
Температура рабочей жидкости, °С	15—70

Группу АСГР составляют датчики давления гидравлические (ДДГ) и датчики разности давления и разрежения гидравлические (ДРДГ и ДРДРГ). В них усилие, возникающее на чувствительном элементе, преобразуется в гидравлический выходной сигнал с помощью унифицированного преобразователя. Регулирующие устройства изготавливаются в двух модификациях: пропорциональное ГР-П и пропорционально-интегральное ГР-ПИ. Значение регулируемого параметра задается с помощью гидравлического задатчика, подключаемого на один из входов регулирующего устройства. Воздействие на объект осуществляется с помощью гидравлических поршневых исполнительных механизмов типа МГП-ПГ.

Систему АСГР применяют в одноконтурных локальных системах автоматического регулирования.

Технические средства гидравлического регулирования системы АСГР строятся на базе системы элементов гидравлической регулирующей автоматики (СЭГРА). Приведем основные элементы системы СЭГРА и построенные на их базе основные устройства системы АСГР [37, 43].

Гидравлическое постоянное сопротивление (рис. 74, а) представляет собой капилляр с малым проходным сечением и большой длиной l ($l/d \gg 20$), в котором силы вязкого сопротивления являются преобладающими. Зависимость между массовым расходом G и перепадом давления Δp на капилляре при ламинарном потоке жидкости определяется известным соотношением

$$\Delta p = \frac{128\eta l}{\pi d^4 \rho} G, \quad (9.1)$$

где η — динамическая вязкость жидкости; l , d — соответственно длина и диаметр капилляра; ρ — плотность жидкости.

Гидравлическое переменное сопротивление (рис. 74, б) состоит из корпуса 1 и штока 2 с винтовой канавкой, играющей роль вязкостного сопротивления. Вращая винт 3, можно изменять длину винтовой канавки и тем самым гидравлическое сопротивление.

Гидравлическая дифференцирующая емкость (рис. 74, в) состоит из двух полостей А и Б, заполненных жидкостью и раз-

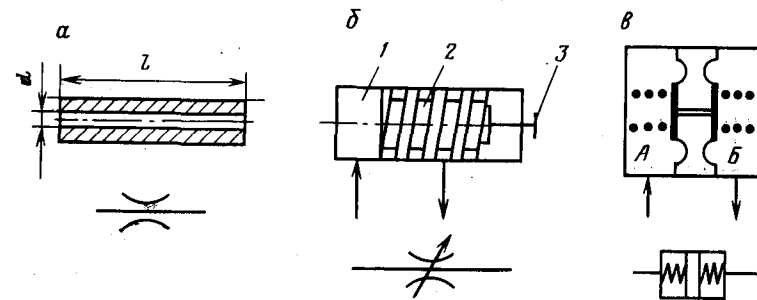


Рис. 74. Схемы и условные обозначения гидравлических элементов: постоянного сопротивления (а), переменного сопротивления (б) и дифференцирующей емкости (в)

деленных эластичными мембранами, которые поджаты с двух сторон цилиндрическими пружинами. При возникновении разности давлений в полостях А и Б мембранный блок перемещается, увеличивая объем одной полости и уменьшая объем другой. При этом небольшой объем жидкости заполняет одну полость, в то время как равный объем вытесняется из другой. Условие равновесия мембранного блока имеет вид

$$\Delta p F_m = x c_n, \quad (9.2)$$

где Δp — перепад давлений; F_m — эффективная площадь мембраны; x — перемещение сборки мембран; c_n — жесткость пружины.

Количество вытекающей из емкости жидкости зависит от перемещения сборки мембран:

$$Q = F_m \frac{dx}{dt}. \quad (9.3)$$

Решая совместно уравнения (9.2) и (9.3), будем иметь

$$Q = \frac{F_m^2}{c_n} \frac{d\Delta p}{dt}$$

или

$$\Delta p = \frac{1}{C} \int_0^t Q dt,$$

где $C = F_m^2 / c_n$.

Механогидравлический преобразователь (рис. 75, а) состоит из постоянного сопротивления (дресселя) 1, сопла 3 и заслонки 4. Рабочая жидкость под давлением питания $p_{пит}$ подводится к постоянному дресселю 1, а затем сливается через сопло 3. В сливной линии поддерживается давление $p_{сл}$. Гидролиния 2, соединяющая постоянный дрессель и сопло, называ-

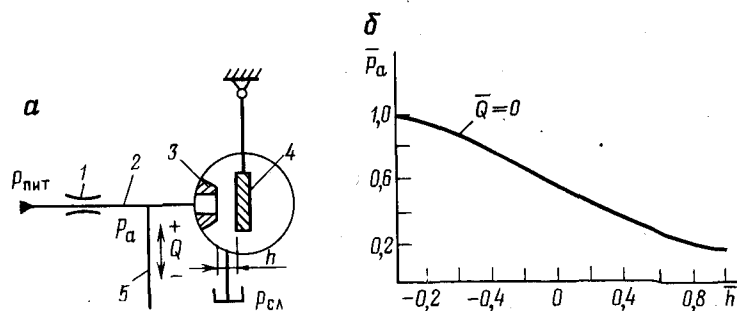


Рис. 75. Однощелевой механогидравлический преобразователь (а) и его перепадная характеристика (б)

ется междроссельной камерой. Она соединена с исполнительной линией 5, связывающей преобразователь, например, с рабочей полостью гидравлического исполнительного механизма. Начальным рабочим (опорным) давлением в междроссельной камере называют давление при отсутствии расхода в исполнительной гидролинии $Q=0$ и нейтральном положении заслонки h_0 . Прием перемещение заслонки вправо и расход в исполнительной гидролинии, направленный к междроссельной камере, как положительные.

При выводе уравнения обобщенной статической характеристики преобразователя используется идеализированная модель, которая строится на основании ряда допущений: рабочая жидкость невязкая, коэффициент расхода системы «сопло—заслонка» не зависит от перемещения заслонки, потери давления в соединительных гидролиниях и на нерегулируемых участках сопла отсутствуют, давление напора постоянно, а давление слива равно нулю. С учетом принятых допущений уравнение обобщенной статической характеристики будет иметь вид

$$Q = \alpha_c \pi d_c (h_0 + h) \sqrt{\frac{2p_a}{\rho}} - \alpha_d \frac{\pi d_d^2}{5} \sqrt{\frac{2(p_{\text{пит}} - p_a)}{\rho}}, \quad (9.4)$$

где Q — объемный расход; α_c , α_d — коэффициенты расхода соответственно сопла и дросселя; d_c , d_d — диаметры соответственно сопла и дросселя; h — расстояние от заслонки до сопла; p_a — давление в междроссельной камере; ρ — плотность рабочей жидкости; $p_{\text{пит}}$ — давление питания.

Поскольку это уравнение связывает три независимых переменных, по нему можно построить три типа графиков. Зависимость $p_a = f(h)_{Q=\text{const}}$ называется перепадной характеристикой, $Q = f(h)_{p_a=\text{const}}$ — расходной характеристикой, а $Q = f(p_a)_{h=\text{const}}$ — расходно-перепадной характеристикой. На рис. 75, б изображена перепадная характеристика, построенная в относительных величинах $\bar{p}_a = f(\bar{h})_{\bar{Q}=0}$ [$\bar{p}_a = p_a/p_{\text{пит}}$; $\bar{h} = h/h_0$; $\bar{Q} = Q/Q_0$]. Асимме-

трия перепадной характеристики, а также силовое воздействие потока жидкости на заслонку являются существенными недостатками однощелевого механогидравлического преобразователя. Поэтому в конструкциях гидравлических устройств часто применяют двухщелевой преобразователь (рис. 76), имеющий две междроссельные камеры с давлениями p_a и p_b .

Редукционный гидроклапан (рис. 77) применяется для стабилизации давления в гидролиниях. В корпусе 3 расположен золотник 2, поджимаемый пружиной 4. Давление $p_{\text{пит}}$ рабочей жидкости, подводимой к клапану, не оказывает влияния на положение золотника, так как эффективные площади буртов золотника равны. На золотник оказывают воздействие пружина и разность давлений на выходе $p_{\text{ред}}$ и в сливной гидролинии $p_{\text{сл}}$. При увеличении этой разности золотник, преодолевая упругость пружины, будет перемещаться вниз, уменьшая проходное сечение рабочего окна 1 клапана и тем самым уменьшая подачу жидкости на выход. При уменьшении перепада давления ($p_{\text{ред}} - p_{\text{сл}}$) (при увеличении расхода выходной гидролинии) золотник увеличит проходное сечение рабочего окна, восстанавливая давление на выходе ($p_{\text{ред}}$). Заданное давление на выходе устанавливается путем изменения натяжения пружины с помощью винта 5. Редукционный гидроклапан называют также стабилизатором давления.

Гидравлический операционный усилитель изображен на рис. 78. Мембранная сборка 1 образуется двумя эластичными мембранами с жесткими центрами, связанными между собой стойкой. В камеру В подводится входной гидравлический сигнал, камера Б соединена со сливной линией. Так как давление на входе и выходе операционного усилителя принято отсчитывать относительно некоторого опорного давления p_0 (условного нуля), в данной схеме предусмотрено поддержание такого давления в камере А с помощью редукционного клапана. Обычно опорное давление принимается равным половине давления питания. Так как давление питания в гидравлических элементах системы СЭГРА $p_{\text{пит}} = 0,4$ МПа, то опорное давление обычно $p_0 = 0,2$ МПа. Увеличение входного давления $p_{\text{вх}}$ в камере В по отношению к опорному давлению p_0 в камере А вызывает перемещение сборки мембран 1 и шарикового клапана 2 вниз. Проходное сечение нижнего рабочего окна уменьшится, а верхнего — увеличится. Это приведет к сливу части жидкости из выходной линии через камеру Б. Давление на выходе $p_{\text{вых}}$ уменьшится. При уменьшении входного давления шариковый клапан увеличит подачу питания в выходную линию и давление в ней увеличится.

Гидравлический операционный усилитель осуществляет усиление входного сигнала и его инвертирование.

Гидравлические регуляторы системы АСГР строятся на основе операционных усилителей. Схема пропорционального гидравлического регулирующего устройства ГР-П изображена на

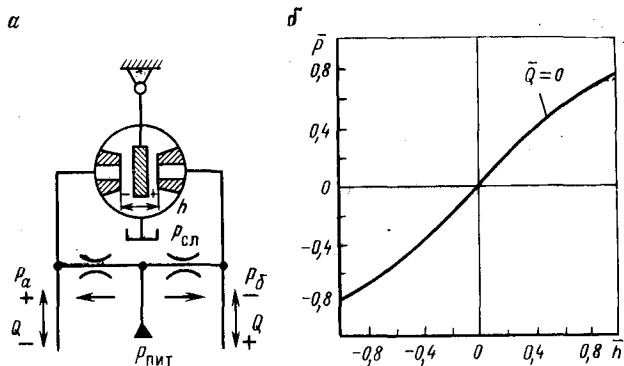


Рис. 76. Двухщелевой механогидавлический преобразователь (а) и его перепадная характеристика (б)

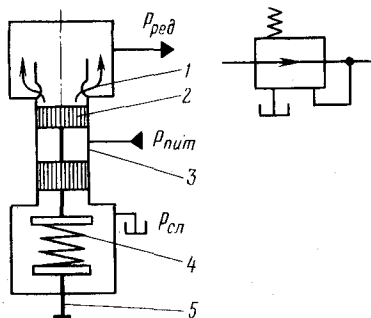


Рис. 77. Редукционный гидроклапан и его условное обозначение

рис. 79. Три входных давления $p_{вх1}$, $p_{вх2}$ и $p_{вх3}$ поступают на вход операционного усилителя через переменные сопротивления R_1 , R_2 и R_3 . В линии обратной связи операционного усилителя установлено переменное сопротивление обратной связи $R_{о.с}$. На основании электрогидравлической аналогии можно записать для точки $M\Sigma Q_i=0$, тогда при небольших перепадах давлений на сопротивлениях будем иметь

$$\frac{p_{вх1} - p_B}{R_1} + \frac{p_{вх2} - p_B}{R_2} + \frac{p_{вх3} - p_B}{R_3} + \frac{p_{внх} - p_B}{R_{о.с}} = 0, \quad (9.5)$$

где p_B — давление в камере B усилителя. В состоянии равновесия усилителя

$$p_B = p_A = p_0, \quad (9.6)$$

где p_A — давление в камере A усилителя. Подставив (9.5) в (9.6), получим

$$\frac{p_{внх} - p_0}{R_{о.с}} = - \frac{p_{вх1} - p_0}{R_1} - \frac{p_{вх2} - p_0}{R_2} - \frac{p_{вх3} - p_0}{R_3}. \quad (9.7)$$

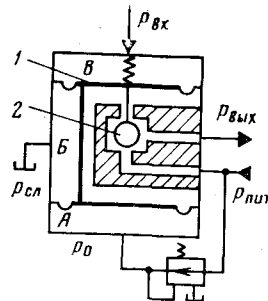


Рис. 78. Гидравлический операционный усилитель

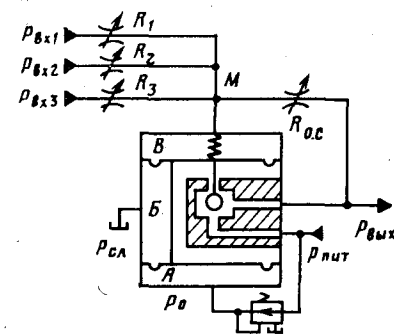


Рис. 79. Пропорциональное гидравлическое регулирующее устройство ГР-П

Обычно это уравнение записывается в виде

$$\Delta p_{внх} = -(K_1 \Delta p_{вх1} + K_2 \Delta p_{вх2} + K_3 \Delta p_{вх3}), \quad (9.8)$$

где Δp — изменение давления относительно условного нуля; $K = R_{о.с}/R_{вх}$ — коэффициент усиления по соответствующему каналу.

В регулирующем устройстве ГР-П коэффициент усиления настраивается в пределах 0,5—50. Относительная приведенная погрешность 1%. При использовании устройства ГР-П в системе автоматического регулирования на один из его входов подается сигнал, пропорциональный текущему значению регулируемого параметра, а на другой — сигнал задания.

Пропорционально-интегральное регулирующее устройство системы АСГР ГР-ПИ состоит из пропорционального 1 и интегрального 2 блоков (рис. 80). Пропорциональный блок 1 представляет собой рассмотренный пропорциональный регулятор, который вырабатывает сигнал

$$\Delta p_{внх1} = -(K_1 \Delta p_{вх1} + K_2 \Delta p_{вх2} + K_3 \Delta p_{вх3}). \quad (9.9)$$

Этот сигнал через делитель давления R_4 — R_5 и постоянное сопротивление R_6 поступает в камеру B операционного уси-

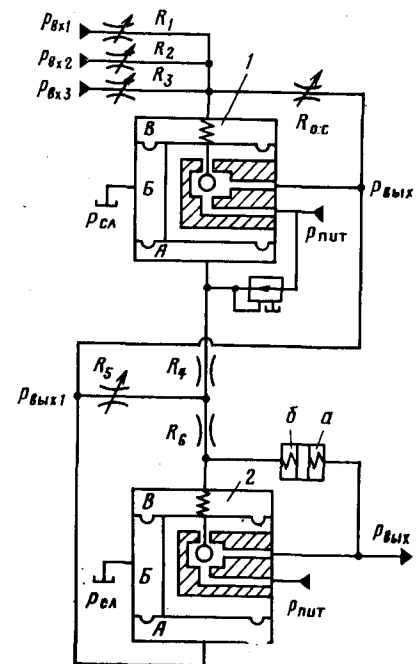


Рис. 80. Пропорционально-интегральное регулирующее устройство ГР-ПИ

лителя 2 интегрального блока и одновременно непосредственно в камеру А того же усилителя. В линии обратной связи этого усилителя установлена гидравлическая дифференцирующая емкость. При увеличении одного из входных давлений в соответствии с соотношением (9.8) выходной сигнал пропорционального блока уменьшится (часть жидкости сливается через камеру В усилителя 1), что приведет к уменьшению давления в камере А усилителя 2. Образовавшийся на операционном усилителе 2 перепад давления $p_B - p_A$ вызывает перемещение вниз шарикового клапана и уменьшение давления $p_{\text{вых}}$ на выходе усилителя 2. При этом камера а дифференциальной гидроемкости заряжается, а камера б — разряжается, уменьшая давление в камере В усилителя 2. На выходе появляется сигнал $\Delta p_{\text{вых}} = \Delta p_{\text{вых}1}$. Далее начинается действие интегральной составляющей устройства. Жидкость начинает перетекать из камеры А усилителя 2 через сопротивления R_5 и R_6 в камеру В. Сборка мембран при этом перемещается вниз, еще более уменьшая давление на выходе регулятора. Гидроемкость продолжает разряжать верхнюю камеру В усилителя 2, компенсируя приток в нее жидкости через сопротивления R_5 и R_6 .

Действие интегральной составляющей (в нашем случае уменьшение давления на выходе) будет продолжаться до тех пор, пока разность между текущим и заданными значениями регулирующего параметра не будет равна нулю.

Блок описывается уравнением

$$\Delta p_{\text{вых}} = \Delta p_{\text{вых}1} + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t \Delta p_{\text{вых}1} dt.$$

В этом выражении время интегрирования $T_{\text{и}}$ зависит от сопротивления R_6 , параметров гидроемкости и соотношения сопротивлений R_4/R_5 . Изменяя сопротивление R_5 , можно изменять время интегрирования в пределах 1 — 500 с.

Полное уравнение регулирующего устройства имеет вид

$$\Delta p_{\text{вых}} = -[(K_1 \Delta p_{\text{вх}1} + K_2 \Delta p_{\text{вх}2} + K_3 \Delta p_{\text{вх}3}) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t (K_1 \Delta p_{\text{вх}1} + K_2 \Delta p_{\text{вх}2} + K_3 \Delta p_{\text{вх}3}) dt].$$

Усилитель мощности системы АСГР (рис. 81) усиливает выходной сигнал гидравлического регулятора за счет энергии дополнительного гидравлического источника питания ($p_{\text{пит}} = 0,4 - 1,6$ МПа). Положение золотника 8 усилителя относительно окна втулки 7 определяется равновесием моментов сил на рычаге-заслонке 5 от мембраны 4, противодействующей пружины 1 и пружины обратной связи 6. При увеличении входного давления рычаг-заслонка смещается в сторону прикрытия

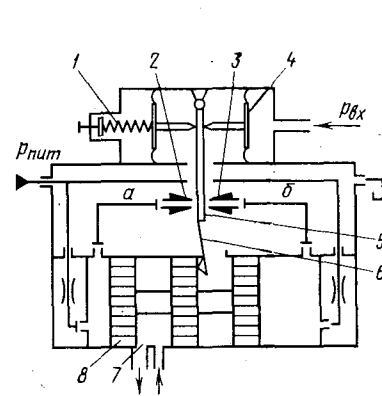


Рис. 81. Гидравлический усилитель мощности

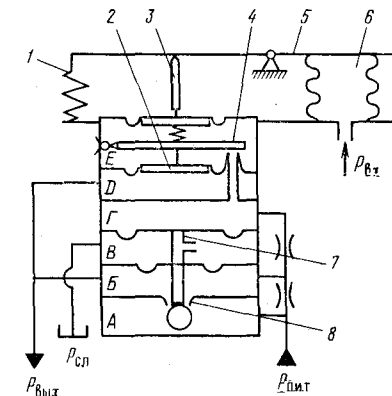


Рис. 82. Датчик-преобразователь системы АСГР

сопла 2 и открытия сопла 3. Давление в междроссельной камере а увеличивается, а в междроссельной камере б — уменьшается. Золотник перемещается во втулке в сторону меньшего давления, сжимая пружину обратной связи до восстановления равновесия сил на рычаге-заслонке. Это происходит при новом положении заслонки относительно сопел 2 и 3, пропорциональном входному давлению. При значении входного давления, равном нижнему пределу стандартного диапазона (0,1 МПа), положение золотника соответствует полному открытию окна втулки, а при значении верхнего предела (0,3 МПа) — его полному закрытию.

На рис. 82 изображена принципиальная схема гидравлического датчика давления типа ДДГ (измерительного устройства) системы АСГР. Усилие, развиваемое чувствительным элементом 6, передается через рычаг 5 и иглу 3 на жесткий центр мембраны 2 преобразователя, где оно сравнивается с усилием, развиваемым выходным давлением $p_{\text{вых}}$. При изменении, например увеличении, измеряемого параметра равновесие усилий на мембране 2 нарушается. Сопло 4 первого каскада усиления прикрывается, вызывая увеличение давления в камере Г. Мембранный блок 7 второго каскада перемещает шарик вниз, увеличивая поступление рабочей жидкости из камеры А в камеру В через отверстие 8. Давление на выходе и в камере Д обратной связи увеличивается. Новое состояние равновесия соответствует новому значению выходного сигнала $p_{\text{вых}}$, пропорционального входному сигналу $p_{\text{вх}}$. Настройка начального значения входного сигнала (с помощью пружины 1), а также диапазона его изменения (0,1—0,3 МПа) осуществляется заводом-изготовителем.

Класс точности датчиков-преобразователей системы АСГР — 1,0; 1,5.

§ 57. Электрические регуляторы

В состав Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации входит агрегатный комплекс электрических средств регулирования «Каскад» с сигналом связи постоянного тока. Система «Каскад» может использоваться для регулирования любых технологических параметров, которые с помощью соответствующих датчиков могут быть преобразованы в унифицированный электрический сигнал постоянного тока 0—5 или 0—20 мА.

Применение аппаратуры «Каскад» эффективно как в одноконтурных системах регулирования, так и в многоконтурных системах, использующих каскадное регулирование, корректирующие воздействия, перекрестные связи и команды от управляющей машины. Основными блоками системы «Каскад» являются [7] регулирующие, алгебраические и логические блоки, задающие устройства, усилители мощности.

Регулирующие блоки системы «Каскад» осуществляют формирование закона регулирования. В состав системы входят аналоговый и релейный регулирующие блоки. Выходной сигнал аналогового регулирующего блока изменяется в диапазоне 0—5 мА. Блок формирует ПИД-закон регулирования. На выходе релейного регулирующего блока образуется последовательность импульсов напряжения (24 В) постоянного тока. Работая в комплекте с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости, такой блок формирует ПИ-закон регулирования.

Алгебраические блоки являются устройствами статического преобразования сигналов. Они выполняют операции суммирования, умножения, деления, возведения в квадрат, извлечения квадратного корня. Эти блоки применяют для построения регуляторов соотношения, а также для внесения корректирующих импульсов.

Логические блоки осуществляют операцию аналого-релейного преобразования сигналов. Эти блоки используются в схемах защиты, сигнализации, выделения максимального и минимального сигналов, а также для переключения сигнальных или управляющих цепей.

Задающие устройства представляют собой регулируемый активный источник тока, сигнал которого изменяется в диапазоне 0—5 мА с установкой по шкале в диапазоне 0—100 %.

Усилители мощности предназначены для усиления аналогового сигнала 0—5 мА, усиления дискретного сигнала 0; ±24 В, а также для формирования сигнала, осуществляющего торможение электродвигателя. Аналоговые усилители мощности представляют собой бесконтактные тиристорные устройства с фазовым управлением. Они используются в комплекте с аналоговым регулирующим блоком. Релейные усилители мощности применяются в комплекте с релейными регулирующими бло-

ками и электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости. Используются два типа релейных усилителей: бесконтактные тиристорные усилители и магнитные пускатели.

В комплекте с системой «Каскад» используются электрические исполнительные механизмы постоянной скорости типа МЭО.

Устройства системы «Каскад» выполнены на базе ограниченного числа взаимозаменяемых модулей, характеристики которых нормализованы. В модулях используются полупроводниковые и ферритовые элементы, а преобразование сигналов ведется на повышенной частоте. Благодаря этому обеспечиваются малые габариты устройств, хорошая помехозащищенность, высокая технологичность изготовления.

Система «Каскад» содержит такие модули, как операционный усилитель, генератор, ограничитель, источник питания, компаратор и др. Упрощенная схема *операционного усилителя*, являющегося основным модулем системы, изображена на рис. 83. Этот усилитель относится к классу усилителей постоянного тока с управляемым генератором. Он содержит варикапную мостовую схему $B1$, $B2$ и высокочастотный усилитель $У$, который с помощью обмотки II трансформатора Tr охвачен обратной связью. Знак и глубина этой связи зависят от состояния равновесия мостовой схемы, которое, в свою очередь, определяется знаком и значением входного сигнала. Если на вход $Bx.1$ усилителя будет подано положительное или на вход $Bx.2$ отрицательное напряжение, мостовая схема разбалансируется таким образом, что обратная связь становится положительной, в контуре управляемого генератора возникает генерация с амплитудой, монотонно связанной со значением входного сигнала. Напряжение генерации выпрямляется переходом «база—эмиттер» транзистора T . Выпрямленное напряжение усиливается транзистором T , сглаживается емкостью C и прикладывается к нагрузке R_n . При обратном знаке входного сигнала обратная связь отрицательна и генерация отсутствует. Коэффициент усиления (при нагрузке 3 кОм) равен $4,5 \cdot 10^3$.

На рис. 84 изображена функциональная схема аналогового *регулирующего блока* типа Р12 для применения в системах автоматического регулирования. Основными элементами блока являются измерительная цепь 1, прямой канал, состоящий из операционного усилителя 2, узла ограничения 3 и нормирующего усилителя 4, а также реле 6 и источник питания 5. В измерительной цепи происходит преобразование токовых сигналов в сигналы напряжения и последовательное суммирование сигналов с целью определения сигнала рассогласования. Так как в системе «Каскад» используется несколько видов внутрисистемных сигналов связи, в измерительной цепи предусмотрено несколько различных входных диапазонов. На входе усилителя суммируется входной сигнал и сигнал обратной связи, формирующей ПИД-закон регулирования. Усилитель 4 преоб-

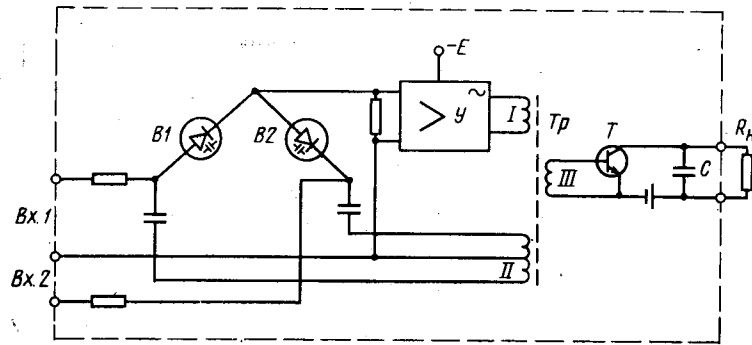


Рис. 83. Операционный усилитель системы «Каскад»

разует выходное напряжение узла ограничения 3 в токовый сигнал 0—5 мА, а также гальванически разделяет входные и выходные цепи блока. При ручном управлении переключатель П переводится в правое положение, замыкается контакт К, срабатывает реле б и блок переводится в режим слежения за токовым сигналом, поступающим на «Вход 5» от блока ручного управления. В этом режиме прямой канал блока Р12 охватывается жесткой отрицательной обратной связью, к его выходу подключается эквивалентная нагрузка и для ускорения процесса перезарядки конденсаторов шунтируется сопротивление в цепи обратной связи, определяющее время интегрирования. В результате таких переключений обеспечивается безударный перевод регулятора из режима ручного на режим автоматического управления. На клеммах А—Б контролируется сигнал рассогласования, а на клеммах В—Г—выходной сигнал.

Блок Р12 формирует П-, ПИ- и ПИД-закон регулирования с ограничением выходного сигнала по максимуму и минимуму (с помощью соответственно R_{max} и R_{min}). Уравнение блока в операторной форме имеет вид

$$x_{вых} = \frac{K}{1 + T_{дф}p} \left(1 + \frac{1}{T_{и}p} + T_{д}p \right) x_{вх},$$

при $x_{min} < x_{вых} < x_{max}$.

Вне указанного диапазона $x_{вых} = x_{min}$ или $x_{вых} = x_{max}$ независимо от $x_{вх}$. В этом выражении K — коэффициент усиления; $T_{дф}$ — постоянная времени демпфирования; $T_{и}$ — постоянная времени интегрирования; $T_{д}$ — постоянная времени дифференцирования; x_{max} — уровень ограничения по максимуму; x_{min} — уровень ограничения по минимуму.

В зависимости от диапазонов настройки блок Р12 выпускается в трех исполнениях: для медленно протекающих процессов, для процессов со средним временем протекания, для быстропротекающих процессов.

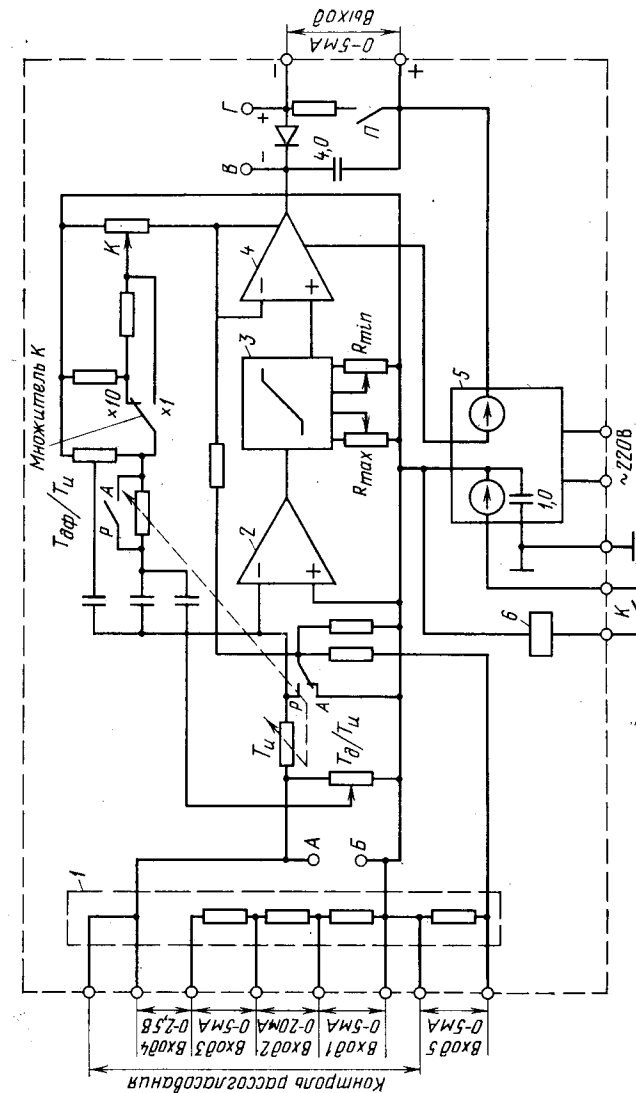


Рис. 84. Регулирующий блок Р12

Параметры настройки блока для медленно протекающих процессов изменяются в следующих пределах: K от 1 до 100 — с помощью переключателя диапазона K и переменного сопротивления K ; $T_{и}$ от 20 до 2000 с — изменением сопротивления $T_{и}$; $T_{д}/T_{и}$ от 0 до 0,25 — изменением сопротивления $T_{д}/T_{и}$; $T_{дф}/T_{и}$ от 0 до 0,1 — изменением сопротивления $T_{дф}/T_{и}$.

§ 58. Применение микропроцессоров в качестве регулирующих устройств

Как уже указывалось, в промышленности иногда применяются комбинированные регуляторы, причем наиболее часто измерительное и регулирующее устройство выполняются электрическими, а исполнительное устройство — пневматическим или гидравлическим. В этом случае в систему автоматического регулирования дополнительно включаются электропневматические или электрогидравлические преобразователи. Такая система может быть реализована, например, на основе функциональных блоков системы «Каскад». Вместе с тем в последние годы наметилось новое направление в приборостроительной промышленности. Достигнутые успехи в области технологии изготовления полупроводниковых больших интегральных схем (БИС) привели к созданию микропроцессоров и микропроцессорных наборов БИС, пригодных для построения устройств контроля и управления.

Появление микропроцессоров, характеризующихся высокой надежностью, низкой стоимостью, малыми габаритами и потреблением энергии, породило совершенно новые, нетрадиционные сферы их применения, где ранее вычислительные средства были неприемлемы по различным соображениям.

Микропроцессор (МП) аналогично процессору мини-ЭВМ представляет собой функционально законченное устройство, состоящее из арифметико-логического устройства, устройства управления, внутренних регистров и средств интерфейса (аппаратуры и шин, обеспечивающих связь перечисленных устройств между собой и с внешней аппаратурой). При помощи набора команд микропроцессор осуществляет арифметико-логическую обработку информации, а также обращение к запоминающему устройству, устройству ввода-вывода и другим периферийным устройствам. Он реализуется в виде автономного полупроводникового прибора, состоящего из одной или нескольких программно-управляемых БИС. Приставка «микро» в слове микропроцессор указывает на высокую степень интеграции схем процессора.

Эволюция разработки БИС от специализированных, предназначенных для выполнения конкретных функций обработки и управления, к универсальным БИС с программируемой логикой привела к появлению микропроцессоров. По существу, микропроцессор — это БИС с программируемой (настраиваемой)

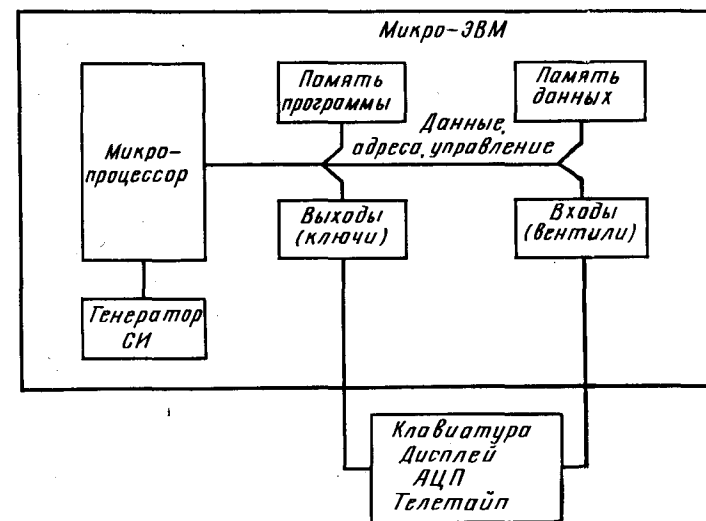


Рис. 85. Структурная схема типовой микро-ЭВМ

логикой. Вследствие своей универсальности микропроцессоры могут производиться большим тиражом, что обуславливает их низкую стоимость и доступность.

Реализованные на базе БИС микропроцессор, запоминающее устройство, устройства ввода-вывода и внешнего интерфейса со своим автономным питанием и комплексом программного обеспечения образуют микро-ЭВМ (рис. 85).

Внедрение микропроцессоров позволяет создать децентрализованные комплексы управления технологическими процессами, при которых местная обработка данных осуществляется автономным микропроцессором, а центральный процессор берет на себя только наиболее сложные задачи.

Создание эффективных систем автоматического регулирования на базе микропроцессоров осуществляется в два этапа. На первом этапе на микропроцессорную технику переводятся регулирующие устройства, в то время как измерительные и исполнительные устройства остаются аналоговыми. При этом между измерительным устройством и микропроцессором устанавливается преобразователь аналог-цифра, а между микропроцессором и исполнительным устройством — преобразователь цифра-аналог. Современные системы автоматического управления нижнего уровня иерархии в нефтяной и газовой промышленности являются в основном одноконтурными. Использование микропроцессоров позволяет организовать многоконтурное управление, при котором один микропроцессор управляет работой нескольких контуров, оптимизируя протекание процесса в целом. Существенным преимуществом такой системы, в частности,

является управление по программе, заложенной в микропроцессоре, которая при необходимости может быть изменена.

На втором этапе аналоговые измерительные и исполнительные устройства будут заменены цифровыми. При этом первые будут иметь выходные сигналы в виде двоичных кодов, а вторые — воспринимать эти коды, что исключит необходимость применения соответствующих преобразователей. Цифровые измерительные и исполнительные устройства превратятся в стандартные терминальные устройства цифровой микропроцессорной системы.

ГЛАВА 10.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 59. Общая характеристика и классификация исполнительных устройств

Как уже указывалось, исполнительное устройство предназначено для реализации сигнала управления, вырабатываемого регулирующим устройством автоматического регулятора. Воздействие на процесс осуществляется изменением расхода проходящей через исполнительное устройство среды таким образом, чтобы это воздействие вызвало изменение регулируемого параметра в нужном направлении. Схема типичного исполнительного устройства, применяемого в нефтяной и газовой промышленности, изображена на рис. 86, а. Оно состоит из двух основных частей — исполнительного механизма I и регулирующего органа II. Перестановочное усилие в одном направлении создается давлением сжатого воздуха на эластичную мембрану 1 в рабочей полости исполнительного механизма, а в противоположном — за счет усилия упругости пружины 3. Опорный диск 2, к которому жестко прикреплен шток 4, лежит на верхнем торце пружины. Нижним торцом пружина опирается на шайбу 5, которая поджата резьбовой втулкой 6. Последняя может перемещаться по резьбе в кронштейне 9. Шток исполнительного механизма соединен со штоком 12 регулирующего органа при помощи соединительной гайки 7, снабженной указателем. К кронштейну прикреплена шкала 8 исполнительного устройства. В корпус 13 регулирующего органа ввинчены два седла 15, образующие вместе с затвором 14 проходное сечение для регулируемой среды. Уплотнение штока 12 регулирующего органа осуществляется при помощи сальника 11, выполненного из шевронных фторопластовых колец, опирающихся на пружину. В процессе эксплуатации сальник может быть подтянут гайками 10. Конструкция и размеры сальниковой камеры позволяют заменить набивку из фторопластовых колец асбестовой. При этом вместо пружины в сальниковой камере устанавливается промежуточный фонарь, а в резьбовое отвер-

стие сальниковой камеры вместо пробки помещают лубрикатор для подачи смазки. Под действием давления сжатого воздуха мембрана 1, преодолевая противодействие пружины 3, перемещает шток 4 исполнительного механизма, шток 12 регулирующего органа и затвор 14. Последний, перемещаясь относительно неподвижных седел 15, изменяет проходное сечение регулирующего органа, а следовательно, и расход проходящей через него среды.

Технологическая обвязка исполнительного устройства 2 при его установке на трубопроводе (рис. 86, б) предусматривает запорные задвижки 1 и 3, а также регулирующийся вентиль 4 на обводной линии. Такая схема позволяет осуществлять ремонт или замену исполнительного устройства при направлении потока через обводную линию.

Определим основные характеристики исполнительных устройств [42]. Рассматривая орган как сужающее устройство, установленное на трубопроводе, можно выразить расход протекающей через него несжимаемой среды (жидкости) в соответствии с известным соотношением

$$Q = c \frac{F}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}},$$

где Q — расход среды; c — коэффициент, зависящий от выбранной системы единиц; F — площадь сечения; $(p_1 - p_2)$ — перепад давлений на регулирующем органе; ξ — безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый экспериментальным путем и учитывающий сумму сопротивлений, вызываемых потерями на трение в регулируемом и нерегулируе-

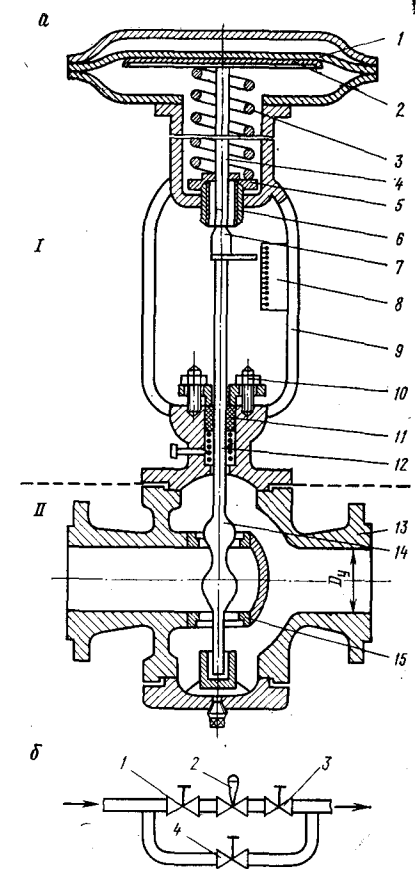


Рис. 86. Пневматическое двухседельное исполнительное устройство: а — принципиальная схема; б — схема технологической обвязки

мом проходах корпуса, а также потерями из-за изменения направления потока в регулирующем органе; ρ — плотность среды.

Выражение (10.1) обычно представляют в виде

$$Q = K_V \sqrt{\Delta p / \rho}, \quad (10.2)$$

где

$$K_V = cF / \sqrt{\xi}. \quad (10.3)$$

Величина K_V называется *пропускной способностью* исполнительного устройства.

При использовании единиц измерения системы СИ выражение (10.2) примет вид

$$Q = 100K_V \sqrt{\Delta p / \rho}. \quad (10.4)$$

В соответствии с последним выражением пропускная способность K_V численно равна расходу среды (в м³/ч) с плотностью 1000 кг/м³, пропускаемой регулирующим органом при перепаде давления на нем 0,1 МПа.

Условной пропускной способностью (K_{Vy}) называется номинальное значение пропускной способности исполнительного устройства при максимальном (условном) ходе затвора.

Условная пропускная способность K_{Vy} всех промышленных исполнительных устройств указывается в соответствующих каталогах.

Максимальная действительная пропускная способность (K_{V100}) определяется гидравлическими испытаниями проверяемого образца при перемещении затвора на 100 % его возможного хода и отличается от условной пропускной способности K_{Vy} , которая определяется как средняя величина для серии регулирующих органов одного типоразмера.

Пропускная характеристика устанавливает зависимость пропускной способности от перемещения затвора $K_V = f(S)$ при постоянном перепаде давления. В настоящее время выпускаются исполнительные устройства с линейной и равнопроцентной характеристиками. При линейной пропускной характеристике приращение пропускной способности пропорционально перемещению затвора:

$$dK_V = AdS.$$

При равнопроцентной пропускной характеристике приращение пропускной способности по ходу пропорционально текущему значению пропускной способности:

$$\frac{dK_V}{dS} = BK_V. \quad (10.5)$$

Обычно пропускные характеристики строятся в относительных единицах. В этом случае выражения (10.4) и (10.5) соответственно имеют вид

$$d\sigma = Adl, \quad (10.6)$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = B\sigma, \quad (10.7)$$

где $\sigma = K_V / K_{Vy}$ — относительная пропускная способность; $l = S / S_y$ — относительный ход затвора.

После интегрирования выражения (10.6)

$$\sigma = Al. \quad (10.8)$$

Разделим переменные и проинтегрируем обе части уравнения (10.7)

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} = \int_0^l Bdl.$$

После интегрирования получим

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = Bl,$$

откуда

$$\sigma = \sigma_0 e^{Bl}, \quad (10.9)$$

где σ_0 — относительная начальная пропускная способность в момент открытия затвора (как правило, $\sigma_0 \leq 0,004$).

Коэффициент пропорциональности B определяется из условия, что в конце хода пропускная способность максимальна, т. е. $\sigma = 1$ при $l = 1$. Подставив эти значения в (10.9), получим

$$B = -\ln \sigma_0. \quad (10.10)$$

Тогда уравнение равнопроцентной характеристики будет иметь вид

$$\sigma = \sigma_0 e^{-l \ln \sigma_0} \quad (10.11)$$

или

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - l \ln \sigma_0,$$

откуда

$$\sigma = \sigma_0 e^{1-l}. \quad (10.12)$$

Графики линейной (по уравнению (10.8)) и равнопроцентной (по уравнению (10.12)) пропускных характеристик изображены на рис. 87,а.

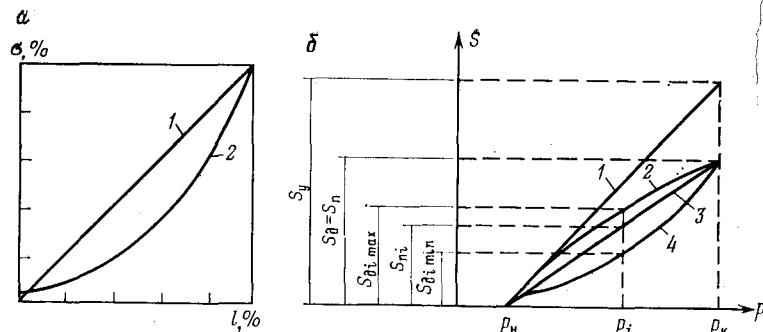


Рис. 87. Характеристики исполнительного устройства:
а — линейная 1 и равнопроцентная 2 пропускные; б — ходовые

Минимальной пропускной способностью ($K_{V\min}$) называется наименьшая пропускная способность, при которой сохраняется пропускная характеристика.

Диапазоном изменения пропускной способности называется отношение условной пропускной способности K_{Vy} к минимальной величине $K_{V\min}$. Например, двухседельные исполнительные устройства (см. рис. 86,а) изготавливаются с диапазоном 25 — 50.

Условным проходом (D_y) называется номинальный размер диаметра прохода в присоединительных патрубках (см. рис. 86,а).

Различают **условное давление** p_y регулируемой среды (давление при температуре 20 °С) и **рабочее давление** p_p (давление при фактической температуре).

Перепад давления (Δp) на регулирующем органе, равный разности давлений на входе p_1 и выходе p_2 из регулирующего органа, определяет усилия, на которые рассчитываются исполнительный механизм и все подвижные детали исполнительного устройства. Существует ряд причин, ограничивающих максимально допустимый перепад давления Δp . Это — ускоренный износ деталей регулирующего органа при высоких перепадах давления, появление шума и вибрации исполнительного устройства, необходимость увеличения перестановочного усилия. Кроме того, дросселирование жидкости при повышенных перепадах может вызвать явление **кавитации**, которое заключается в выделении из жидкости в процессе дросселирования пузырьков газа с последующим обратным переходом их в жидкость. Кавитация вызывает быстрое разрушение элементов регулирующего органа.

Исполнительные устройства принято также характеризовать их **ходовыми характеристиками** (рис. 87,б).

Условным ходом S_y называют номинальное значение полного хода затвора исполнительного устройства, а **действительным** S_d — ход данного исполнительного устройства при заданном командном сигнале. Например, для пневматического ис-

полнительного устройства действительный ход будет разным при прямом (кривая 2, рис. 87,б) и обратном (кривая 4) движении затвора и отличаться от теоретической ходовой характеристики (прямая 1). Для определения погрешности хода введено понятие приведенного хода S_{π} . Зависимость приведенного хода S_{π} от изменения командного сигнала в пределах ($p_n - p_k$) линейная (прямая 3) и определяется графически соединением двух точек, соответствующих положениям затвора при значениях командного сигнала p_n и p_k . Значение действительного хода S_{di} при данном командном сигнале может быть больше или меньше значения приведенного хода $S_{\pi i}$.

Основной статической приведенной погрешностью δ называется абсолютное отношение наибольшей разности действительного и приведенного ходов к значению условного хода при незаполненном регулирующем органе и затяжке сальника, обеспечивающей герметичность штока в рабочих условиях, выраженное в процентах:

$$\delta = \left| \frac{S_d - S_{\pi}}{S_y} \right|_{\max} 100 \% \quad (10.13)$$

Класс точности исполнительного устройства определяется основной статической приведенной погрешностью.

Негерметичностью называют расход через полностью закрытое исполнительное устройство, выраженный в процентах от условной пропускной способности.

Исполнительные устройства принято классифицировать по различным признакам [33]. В зависимости от условной пропускной способности различают:

исполнительные устройства больших расходов с пропускной способностью от 40 до 25 000 м³/ч (условные проходы от 50 до 1000 мм);

исполнительные устройства средних расходов с условной пропускной способностью от 2 до 5000 м³/ч (условные проходы от 10 до 300 мм);

исполнительные устройства малых расходов с условной пропускной способностью от 0,1 до 4 м³/ч (условные проходы от 6 до 25 мм);

исполнительные устройства микрорасходов с условной пропускной способностью 0,1 м³/ч и менее (условные проходы 10 мм и менее). В зависимости от вида используемой энергии исполнительные устройства подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические.

По значению условного давления исполнительные устройства делятся на группы: низких давлений (до 1,6 МПа), средних давлений (до 16 МПа), высоких давлений (до 150 МПа).

В зависимости от допустимой температуры регулируемой среды выпускаются исполнительные устройства для низких температур (до —225 °С), для средних температур (до 225 °С), для высоких температур (до 450 °С).

В зависимости от конструкции регулирующего органа различают исполнительные устройства: односедельные, двухседельные, трехходовые, шланговые, диафрагмовые, шаровые, заслоночные и клеточные.

В зависимости от материала основных деталей регулирующего органа выпускаются исполнительные устройства: чугунные, стальные (из углеродистой стали), нержавеющие (из нержавеющей стали) и специальные.

В зависимости от расположения входного и выходного патрубков исполнительные устройства могут быть проходными и угловыми.

По виду действия исполнительные устройства подразделяются на нормально-открытые (НО), в которых при прекращении подвода энергии, создающей перестановочное усилие, проходное сечение полностью открывается, и нормально-закрытые (НЗ), в которых при прекращении подвода энергии, создающей перестановочное усилие, проходное сечение полностью закрывается.

По защищенности от воздействия окружающей среды исполнительные устройства изготавливаются в обыкновенном и взрывозащищенном исполнениях.

§ 60. Регулирующие органы

Регулирующим органом (рис. 88) называется звено исполнительного устройства, представляющее собой переменное гидравлическое сопротивление, которое воздействует на расход среды, изменяя свое проходное сечение [32].

В *двухседельных* регулирующих органах (рис. 88,а) корпус имеет два седла 1, а затвор 2, проходящий через эти седла, — два утолщения с дросселирующими и запирающими поверхностями. Перемещение затвора относительно седел изменяет площадь прохода среды. Основным преимуществом двухседельного регулирующего органа является возможность разгрузки затвора от одностороннего действия силы, создаваемой статическим давлением среды. В большинстве случаев на затворах двухседельных регулирующих органов кроме дросселирующих имеются запирающие поверхности, и поэтому с целью обеспечения возможности сборки и разборки регулирующего органа диаметр прохода верхнего седла делают большим, чем диаметр прохода нижнего седла, для того чтобы через него прошло нижнее утолщение затвора. Разные размеры проходов седел создают неуравновешенность сил гидростатического давления среды на затвор, но она невелика, так как мала разность диаметров верхнего и нижнего седел. Важным преимуществом двухседельных регулирующих органов так же, как односедельных и трехходовых, является возможность изготовления дросселирующих поверхностей различной конфигурации для получения нужной пропускной характеристики. Необходимо отметить, что из-за

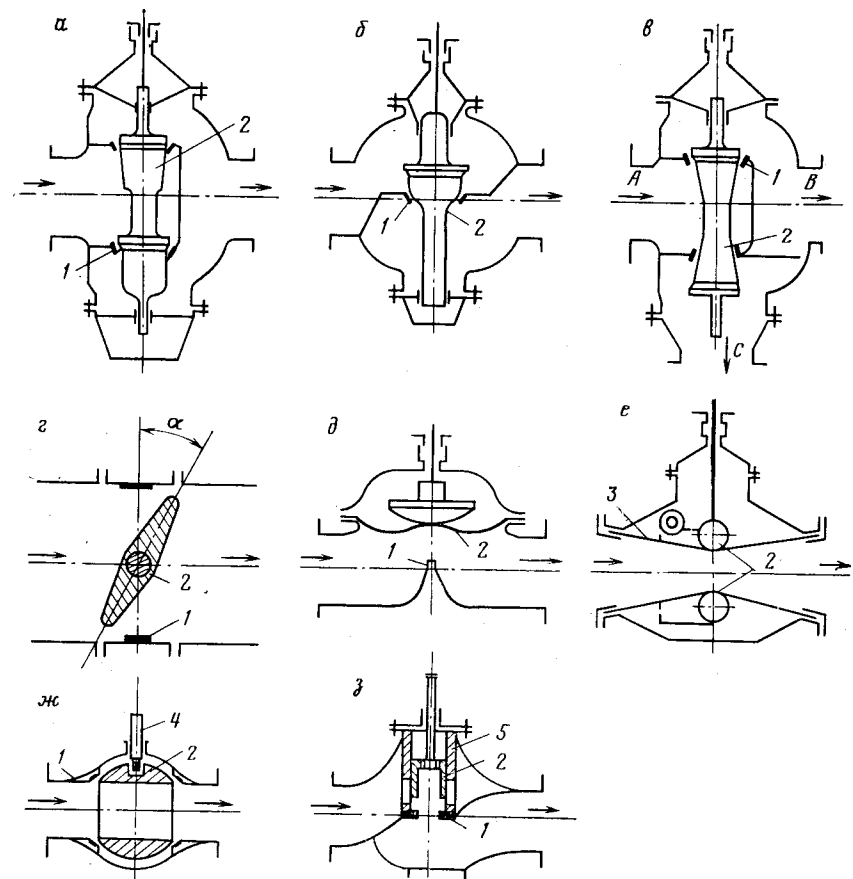


Рис. 88. Схемы регулирующих органов промышленных пневматических устройств

сложной конфигурации проходов внутри двухседельного регулирующего органа не рекомендуется его применять при сверхкритических скоростях газов и паров, так как в таких случаях появляются значительный шум и вибрация.

Двухседельные регулирующие органы характеризуются относительно большими значениями допустимой негерметичности затвора, которая объясняется различными изменениями размеров корпуса и затвора под действием температуры, а также разным износом верхней и нижней запирающих поверхностей из-за различного воздействия на них потока среды. Допустимая негерметичность двухседельных регулирующих органов в состоянии поставки составляет примерно $(0,05 - 0,01) K_{vy}$.

Двухседельные регулирующие органы всегда проектируются таким образом, чтобы изменение их исполнения с нормально

открытого на нормально закрытое осуществлялось лишь перемонтированием относительного расположения затвора и седла при сохранении всех деталей.

Односедельные регулирующие органы (рис. 88,б) могут быть проходными и угловыми. В проходных регулирующих органах направление потока среды при входе и выходе не изменяется, а в угловых — при выходе изменяется на 90° по отношению к направлению на входе. Одностороннее действие статического давления среды создает необходимость применения исполнительных механизмов большой мощности. При движении со стороны, противоположной расположению штока, т. е. «под затвор», она отжимает затвор 2 от седла 1. Исполнительный механизм должен создать перестановочное усилие, способное преодолеть силу давления среды на затвор. Это усилие зависит от перепада давления на затворе и площади прохода в седле. При движении среды со стороны расположения штока, т. е. «на затвор», давление среды способствует закрытию затвора, прижимая его к седлу. В этом случае при определении силы, действующей на затвор, необходимо кроме статического давления среды учитывать «затягивание» затвора. Последнее объясняется тем, что под затвором образуется вакуумная полость, размеры которой в связи с турбулентностью потока изменяются. Поэтому при неизменном положении затвора его «затягивает» в проход седла с переменной силой.

Односедельные регулирующие органы используют лишь в случаях, когда невозможно применение разгруженных двухседельных регулирующих органов, — при малых условных проходах трубопроводов, при регулировании потоков вязких жидкостей и неоднородных сред (взвесей, пульп и т. п.), а также в случаях, когда необходимо полностью перекрыть поток при закрытии регулирующего органа. Возможность обеспечения герметичности закрытия прохода является важным преимуществом односедельных регулирующих органов.

Трехходовые регулирующие органы (рис. 88,в) могут применяться для непрерывного или двухпозиционного регулирования. Для непрерывного регулирования применяются конструкции двух видов: разделительные и смесительные. Первые служат для разделения потока в изменяющихся соотношениях между двумя линиями ($A = B + C$), как это показано на рис. 88,в, вторые применяются в случаях, когда необходимо смещение двух потоков с переменным соотношением в один ($B + C = A$). При этом в отличие от конструкции, изображенной на рис. 88,в, меняются направление потока C и конфигурация внутренних перегородок корпуса. Для двухпозиционного регулирования они применяются в том случае, когда поток попеременно направляется то в одном, то в другом направлении или когда два потока поочередно двигаются в одном направлении.

В трехходовых регулирующих органах направление потока осуществляется таким образом, чтобы исключить явление «за-

тягивания» затвора в проходы седла. Конструкция регулирующего органа выбирается такой, чтобы давление среды отжимало каждую из двух дросселирующих частей затвора от соответствующего седла (см. рис. 88, в).

Регулирующие заслонки (рис. 88,г) изменяют свою пропускную способность при повороте диска под действием исполнительного механизма. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с рассмотренными регулируемыми органами. Так, в открытом положении гидравлическое сопротивление регулирующей заслонки значительно ниже, чем у двухседельных, односедельных и трехходовых регулирующих органов (регулирующих клапанов). Поэтому при одних и тех же технологических параметрах условный проход регулирующей заслонки может быть меньше условного прохода регулирующего клапана. В регулирующей заслонке нет зон, в которых могут скапливаться механические частицы и грязь. Поток регулируемой среды незначительно меняет свое направление при проходе через регулирующую заслонку, поэтому сопряженные дросселирующие поверхности изнашиваются меньше, чем в регулирующих клапанах. Кроме того, регулирующие заслонки имеют сравнительно несложную конструкцию, небольшие габариты, массу и низкую стоимость.

Основными недостатками регулирующих заслонок являются сложность обеспечения плотного перекрытия регулируемого потока; наличие значительных неразгруженных усилий, действующих на диск заслонки; трудность получения расчетных пропускных характеристик. Принципиальная сложность создания плотного перекрытия потока регулируемой среды связана с тем, что запорный элемент заслонки (диск) вращается и его рабоче перемещение нельзя использовать для герметизации. Разработан целый ряд запорно-регулирующих заслонок, которые кроме своей основной функции — регулирования потока среды — выполняют и функцию перекрытия потока.

Неразгруженность диска заслонки объясняется следующими обстоятельствами. При проходе среды (см. рис. 88, г) давления на обе половины диска уравновешены только в момент полного перекрытия потока. При промежуточных положениях диск разделяет поток на две неравные части: большая часть потока проходит сверху, а меньшая — снизу. В результате на заслонку будет действовать крутящий момент, стремящийся ее закрыть. При переходе диска в диапазон угла поворота $\alpha = 60\text{—}90^\circ$ из-за неравномерного распределения скорости сверху и снизу заслонки крутящий момент достигает максимума в зоне $65\text{—}75^\circ$, а затем резко падает до 0 в момент полного открытия.

Трудность получения расчетных пропускных характеристик заслонок связана с тем, что при углах поворота диска больше 60° расход среды не увеличивается пропорционально углу поворота диска. Поэтому угол поворота заслонки обычно ограни-

чивается 60° , хотя это и снижает ее потенциальную пропускную способность.

До недавнего времени регулирующие заслонки находили весьма ограниченное применение. Однако в настоящее время, в частности, при увеличении условных проходов трубопроводов применение заслонок следует признать перспективным.

Диафрагмовые регулирующие органы (рис. 88, д) применяют, как правило, для регулирования потоков агрессивных сред. В них затвор 2 изготавливается в виде упругого элемента — мембраны, которая, перемещаясь под действием исполнительного механизма относительно седла 1, изменяет площадь прохода среды. Одновременно диафрагма является разделительной перегородкой, предохраняющей все подвижные металлические детали от соприкосновения со средой. При этом диафрагма изготавливается из кислотостойкого материала, а на внутреннюю поверхность чугунного корпуса регулирующего органа наносится кислотостойкое покрытие.

Основные преимущества диафрагмовых регулирующих органов — возможность применения дешевых антикоррозионных материалов взамен дорогостоящих нержавеющей сталей, а также отсутствие сальника. К их недостаткам относятся неразгруженность затвора и ограничения давления и температуры регулируемых сред.

В *шланговых* регулирующих органах (рис. 88, е) регулируемая среда проходит через эластичный патрубок 3 (шланг). Затвор 2 представляет собой два валика, между которыми расположен шланг. Валики сближаются или расходятся в плоскости, перпендикулярной к оси прохода корпуса. При движении вниз верхнего валика, управляемого штоком регулирующего органа, нижний валик перемещается вверх; при движении верхнего валика вверх нижний валик перемещается в обратном направлении. Передача усилия с верхнего валика на нижний осуществляется с помощью цепной или рычажной передачи.

Шланговые регулирующие органы обладают рядом преимуществ. Ввиду прямоточной конструкции исключается застой продукта; дроссельная часть герметично перекрыта и отделена от штока привода, что позволяет обойтись без уплотнения штока; обеспечивается надежное перекрытие трубопровода; возможна быстрая и удобная замена эластичного патрубка при выходе его из строя.

Основными недостатками шланговых регулирующих органов являются невысокие температура регулируемых сред (до 80°C) и ограниченное рабочее давление (до 1 МПа); значительная неуравновешенность затвора; сравнительно небольшой срок службы эластичного патрубка.

Шланговые и регулирующие органы могут регулировать потоки самых разнообразных сред. В зависимости от среды их эластичные патрубки изготавливают из бензостойких, маслостойких, маслобензостойких, химически стойких, эрозионностойких

материалов. Применение таких материалов вместо дорогостоящих нержавеющей сталей дает большой экономический эффект.

Шаровые регулирующие органы (рис. 88, ж) оборудуются затвором поворотного типа, выполненным в виде сферы с цилиндрическим отверстием. При повороте вала привода сфера поворачивается, изменяя сечение прохода. Они конструктивно несложные, надежные в эксплуатации, дешевые, легкие и герметичные в широком диапазоне регулируемых сред, условных проходов и рабочих давлений. Седла шаровых регулирующих органов изготавливают обычно из эластичного материала (фторопласт, резина, нейлон и т. п.). Благодаря прямоточной конструкции эти регулирующие органы особенно эффективны при регулировании потоков высоковязких сред, пульп с абразивными частицами и т. п.

Шаровые регулирующие органы могут быть как полнопроходными, так и суженными. Полнопроходные имеют диаметр прохода в шаре, равный диаметру прохода присоединительных концов, а суженные — приблизительно на 20 % меньше. В некоторых конструкциях выходной патрубков выполняется по форме расширяющейся части сопла Вентури.

Полнопроходные регулирующие органы характеризуются весьма малым гидравлическим сопротивлением, практически равным сопротивлению такого же по длине участка трубопровода. Их используют в основном для двухпозиционного регулирования и тогда, когда необходимо обеспечить минимальную потерю давления на клапане. Суженные шаровые клапаны имеют значительное гидравлическое сопротивление, на них создается большой перепад давления. Поэтому в системах регулирования эти устройства применяются чаще полнопроходных. Ввиду малого гидравлического сопротивления шаровые регулирующие клапаны монтируют, как правило, на трубопроводах с меньшим условным проходом, используя для этой цели конусные переходы.

Клеточные регулирующие органы (рис. 88, з) свое название получили по характерной для них детали — клетке, внутри которой перемещается затвор. Клетка зажимается седлом и верхней крышкой корпуса. Шток регулирующего органа жестко связан с затвором. Применяются два варианта конструкции клеточного регулирующего органа. В одном из них профилированные отверстия делаются в клетке 5, а затвор 2 имеет вид обычного поршня (см. рис. 88, з). В другом варианте на затворе делаются профилированные отверстия, а на клетке — цилиндрические или прямоугольные отверстия. При перемещении затвора относительно клетки меняется проходное сечение регулирующего органа. Благодаря каналам в затворе давления среды под затвором и над затвором равны и, следовательно, затвор уравновешен. Отличительная особенность клеточных регулирующих органов — отсутствие резьбовых соединений внутри корпуса, что позволяет их ремонтировать без демонтажа кор-

пуса регулирующего органа с трубопровода. Хорошая ремонтно-пригодность дает при эксплуатации значительную экономию средств. Клеточные регулирующие органы могут быть как проходными, так и угловыми.

§ 61. Исполнительные механизмы

Исполнительные механизмы предназначены для управления регулирующими органами в соответствии с выходным сигналом регулирующего устройства. Для объективной оценки параметров и характеристик исполнительных механизмов необходимо определить основные требования, предъявляемые к ним со стороны регулирующего органа и системы регулирования в целом. Исполнительный механизм должен обеспечить перемещение затвора регулирующего органа на заданное расстояние. При этом следует учитывать, что перемещение затвора регулирующего органа может быть как поступательным (одно- и двухседельные, трехходовые, шланговые и диафрагмовые регулирующие органы), так и вращательным (шаровые и заслоночные регулирующие органы). Как уже было сказано, регулирующие органы разных типов характеризуются при прочих равных условиях различными величинами неуравновешенности затвора, а также различными силами трения при перемещении затвора. Поэтому одним из основных показателей исполнительного механизма является развиваемое и перестановочное усилие.

Для обеспечения требуемого качества переходного процесса системы регулирования исполнительный механизм должен перемещать затвор регулирующего органа с достаточной скоростью, а также иметь необходимые метрологические характеристики. Исполнительный механизм должен быть удобным в эксплуатации, иметь высокую ремонтнопригодность. В зависимости от вида энергии, используемой для создания перестановочного усилия, исполнительные механизмы подразделяются на электрические, пневматические и гидравлические.

Основные преимущества электрических исполнительных механизмов — значительные перестановочные усилия, большая (практически любая) величина хода штока. Недостатки — относительно большая масса; сложность наладки, обслуживания и ремонта; высокая стоимость; необходимость взрывозащищенного исполнения. Последнее обстоятельство значительно ограничивает область применения электрических исполнительных механизмов.

Преимущества пневматических исполнительных механизмов — простота конструкции, низкая стоимость, пожаро- и взрывобезопасность. Недостатки — ограниченность расстояния между исполнительным механизмом и регулирующим устройством, а также необходимость создания системы снабжения сжатым воздухом.

Основное преимущество гидравлических исполнительных механизмов — большие перестановочные усилия; недостатки — не-

обходимость создания специальной гидравлической системы питания и сложность обслуживания.

В нефтяной и газовой промышленности применяются в основном пневматические исполнительные механизмы. Пневматические исполнительные механизмы классифицируют по различным признакам.

В зависимости от вида чувствительного элемента, воспринимающего энергию сжатого воздуха и преобразующего ее в перестановочное усилие на выходном элементе, различают *мембранные, поршневые, сильфонные и лопатные* исполнительные механизмы. В зависимости от характера движения выходного элемента существуют *прямоходные и поворотные* исполнительные механизмы.

Различают пружинные и беспружинные исполнительные механизмы. Наибольшее распространение получили мембранно-пружинные и поршневые исполнительные механизмы.

Мембранно-пружинные пневматические исполнительные механизмы (рис. 89) работают по принципу компенсации усилий. Давление сжатого воздуха действует на эластичную мембрану 2, герметично заделанную по краю между верхней 1 и нижней 4 крышками. Центральная часть мембраны опирается на опорный диск 3, жестко связанный с выходным звеном исполнительного механизма — штоком 5. Противодействующее усилие создается пружиной 6. С помощью гайки 8 и шайбы 7 можно корректировать предварительное натяжение пружины и тем самым задавать давление в рабочей полости, при котором начинается перемещение выходного штока.

Усилие, развиваемое мембраной, определяется соотношением

$$Q_m = F_s (p_k - p_n),$$

где F_s — эффективная площадь мембраны; p_n , p_k — давления сжатого воздуха соответственно в начале и конце хода штока.

Эффективная площадь мембраны обычно определяется по формуле

$$F_s = \pi/12 (D^2 + Dd + d^2),$$

где D — диаметр заделки мембраны; d — наружный диаметр опорного диска мембраны (обычно $d \approx 0,8D$). Усилие со стороны пружины $Q_n = cS$, где c — жесткость пружины; S — ход

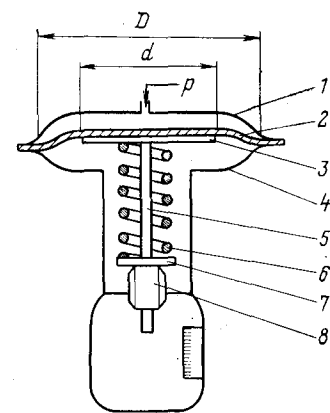


Рис. 89. Мембранно-пружинный пневматический исполнительный механизм

штока. Для ненагруженного исполнительного механизма в состоянии равновесия имеем

$$F_s(p_k - p_n) = cS,$$

откуда ход штока

$$S = F_s(p_k - p_n)/c.$$

Перестановочные усилия исполнительных механизмов определяются из соотношения

$$Q = pF_s - Q_n,$$

где Q — перестановочное усилие механизма; p — максимальное давление воздуха в рабочей полости; Q_n — усилие пружины. В рабочих условиях ходовая характеристика $S(p)$ претерпевает значительные изменения, что учитывается классом точности исполнительного механизма.

Современные пневматические мембранно-пружинные исполнительные механизмы характеризуются: классом точности 4,0, диаметром заделки мембраны 160—500 мм, перестановочными усилиями 300—35500 Н, условным ходом штока 4—100 мм. Относительно невысокий класс точности пневматических исполнительных механизмов объясняется, в частности, влиянием внешних сил на подвижную систему. Значительный объем рабочей полости исполнительного механизма при большой длине соединительных линий между регулирующим и исполнительным устройствами снижает динамические свойства последнего.

Для улучшения статических и динамических свойств пневматических исполнительных механизмов применяют специальные устройства — *позиционеры*. Основная роль позиционера — обеспечение пропорциональной зависимости между входным (изменение давления сжатого воздуха) и выходным (перемещение штока) сигналами исполнительного механизма.

Чувствительным элементом позиционера (рис. 90) является сборка двух мембран с различной эффективной площадью. Так как эффективная площадь нижней мембраны 5 больше эффективной площади верхней мембраны 4, поступающее в мембранную полость давление с выхода регулирующего устройства PY создает усилие, направленное вниз. Это усилие уравновешивается усилием пружины обратной связи. Позиционер крепится к исполнительному механизму $ИМ$ таким образом, что опорный диск последнего непосредственно перемещает шток 8 позиционера. Пружина обратной связи одним концом упирается в гайку 7, а другим — в мембранную сборку. С другой стороны к штоку 3 мембранной сборки с помощью пружины 1 прижимается золотник 2 (шарик). Перемещением гайки 7 относительно штока 8 осуществляется предварительный натяг пружины обратной связи с целью обеспечения начала работы позиционера при минимальном давлении на входе в камеру А. Работа позиционера совместно с исполнительным механизмом сводится к следующему.

При увеличении давления в камере А сборка мембран прогибается вниз, преодолевая упругость пружины 6. При этом шарик 2 также опускается, закрывая отверстие между камерами В и Б (последняя соединена с атмосферой). Сжатый воздух из линии питания начинает поступать в рабочую полость исполнительного механизма, что вызовет перемещение опорного диска исполнительного механизма. В этом случае шток 8 позиционера переместится вверх и сожмет пружину 6 обратной связи. В момент, когда эта пружина уравновесит усилие со стороны сборки мембран, нарастающее давление в камере В позиционера и в рабочей полости исполнительного механизма прекратится. Система придет в состояние равновесия при новом положении мембраны исполнительного механизма (а следовательно, и его штока), пропорциональном приращению давления на выходе регулирующего устройства.

Таким образом, позиционер представляет собой пневматический усилитель с обратной связью по положению выходного штока исполнительного механизма. Необходимый ход штока настраивается перемещением гайки 7 относительно пружины обратной связи 6, что приводит к изменению числа рабочих витков последней.

Позиционер ПР-10 устанавливается на исполнительных устройствах с условным ходом 10 мм. Давление питания (0,2—0,25) МПа. Позиционер ПР-10-25 снабжен редуктором сжатого воздуха для поддержания определенного давления питания. Условный ход исполнительного механизма 10—25 мм. Позиционер ПР-10-100 имеет дополнительную рычажную передачу с переменным передаточным отношением, что обеспечивает возможность работы с исполнительными механизмами, имеющими условный ход до 100 мм.

Применение позиционера уменьшает гистерезис исполнительного механизма, увеличивает его перестановочное усилие (за счет использования увеличенного давления питания позиционера). При настройке автоматического регулятора на небольшое значение коэффициента усиления (большой предел пропорциональности) в случае незначительного отклонения текущего значения регулируемого параметра от заданного приращение давления воздуха в рабочей полости исполнительного механизма будет также незначительным. В этих условиях для обеспечения пропорционального перемещения регулирующего органа необходимо применять позиционер.

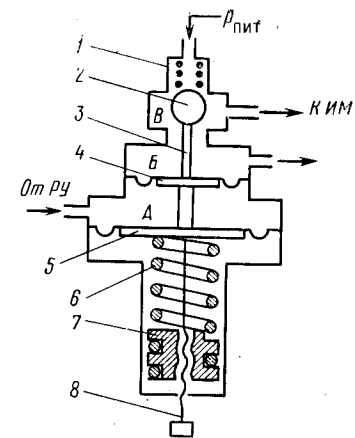


Рис. 90. Принципиальная схема позиционера ПР-10

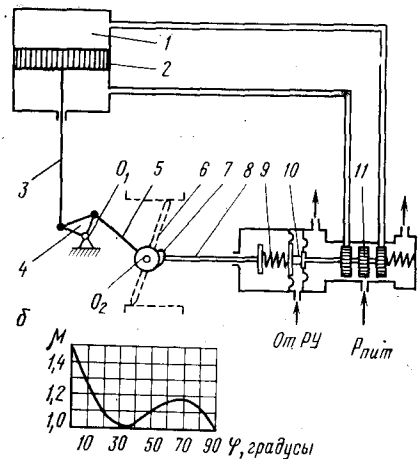


Рис. 91. Поршневой поворотный пневматический исполнительный механизм:

а — принципиальная схема с позиционером; б — график изменения относительного крутящего момента в зависимости от угла поворота выходного элемента

Класс точности пневматических исполнительных механизмов с позиционером равен 2,5. Современные позиционеры выпускаются в двух исполнениях — блочном и встроенном непосредственно в исполнительный механизм. Встроенные позиционеры обычно используются в комплекте с поршневыми механизмами. Современные конструкции блочных позиционеров характеризуются универсальностью и обладают большими функциональными возможностями. В частности, блочные позиционеры позволяют получать различные пропускные характеристики исполнительного устройства за счет введения нелинейного преобразователя в обратную связь. Это реализуется путем установки в линии обратной связи позиционера специального кулачка.

На поршневых пневматических исполнительных механизмах устанавливают реверсивные позиционеры, которые направляют сжатый воздух питания в одну либо в другую полость поршневого привода в зависимости от знака изменения регулируемого параметра.

В связи с перспективой развития электрических систем управления на базе ЭВМ, а также ограниченностью области применения электрических исполнительных механизмов представляют интерес комбинированные системы. Одним из возможных вариантов реализации такой системы может быть сочетание электрического устройства управления, пневматического исполнительного механизма и электропневматического позиционера.

Пневматические исполнительные механизмы часто снабжаются *ручными дублерами*. Они предназначены для ручного механического перемещения затвора регулирующего органа при аварийном отключении сжатого воздуха. Выпускаются дублеры двух видов — верхний и боковой. В первом случае ручной дублер монтируется на верхней крышке исполнительного механизма и воздействует на его мембрану. Боковой ручной дублер монти-

руется на кронштейне исполнительного механизма и с помощью системы рычагов воздействует на его выходной шток.

На рис. 91, а изображена схема *поршневого поворотного* пневматического исполнительного механизма с реверсивным позиционером. Поршневой привод состоит из цилиндра 1, поршня 2 и штока 3 и преобразует энергию сжатого воздуха в поступательное перемещение штока. Передаточный механизм, включающий в себя щеки 4, закрепленные на оси O_1 , и поводок 5, преобразует поступательное перемещение штока 3 в поворотное перемещение поводка 5, а следовательно, и оси O_2 , на которой закреплена, например, заслонка 6. Основными элементами позиционера являются кулачок 7, шток 8, пружина обратной связи 9, мембранная сборка 10 и золотник 11. Схема работает следующим образом. При увеличении давления сжатого воздуха, поступающего от регулирующего устройства (РУ), сборка двух мембран 10 в виду их различной эффективной площади перемещается влево. Золотник 11 пропускает воздух питания в нижнюю полость цилиндра 1 привода, соединяя верхнюю полость с атмосферой. Поршень 2 поднимается, перемещает вверх шток 3, который, в свою очередь, поворачивает с помощью щек 4 поводок 5 по часовой стрелке. Заслонка 6 открывается. При повороте поводка 5 кулачок 7 толкает шток 8 позиционера. Пружина обратной связи 9 сжимается, перемещая сборку мембран 10, а следовательно, и золотник 11 вправо. Последний перекрывает каналы, соединяющие позиционер с цилиндром привода. При уменьшении давления сжатого воздуха от регулирующего устройства золотник 11 направляет воздух питания в верхнюю полость цилиндра привода, соединяя нижнюю полость с атмосферой. Перемещение поршня 2 вниз вызывает закрытие заслонки. Установка кулачка 7 позиционера на поводке 5 передаточного механизма обеспечивает пропорциональную зависимость между приращением входного пневматического сигнала (от РУ) и углом поворота регулирующего органа (в нашем примере — заслонки). Поршневые поворотные исполнительные механизмы предназначены для работы с шаровыми и заслоночными регулирующими органами. С учетом условий работы этих регулирующих органов на потоке регулируемой среды конструкцией рассмотренного исполнительного механизма предусмотрено создание переменного крутящего момента, зависящего от угла поворота выходного элемента (поводка 5).

График изменения относительного крутящего момента μ на выходном элементе привода по отношению к номинальному (при 30 и 90°) в зависимости от угла поворота φ выходного элемента изображен на рис. 91, б. Как видно из графика, наибольшие крутящие моменты развиваются в начале поворота и при углах поворота 65—75°. Это объясняется тем, что для открытия шара, прижатого к седлу статическим давлением среды, необходим большой крутящий момент в начале поворота. В случае же применения поршневого поворотного механизма для при-

вода заслонки необходим значительный крутящий момент при ее повороте на 65—75°, так как именно в этих условиях значительное неравенство сил, действующих на нижнюю и верхнюю половинки заслонки, в наибольшей степени препятствует ее повороту.

Основные технические данные поршневых поворотных исполнительных механизмов

Диаметр цилиндра, мм	80—320
Ход поршня, мм	60—320
Крутящий момент на оси поводка при давлении в рабочей полости цилиндра 0,6 МПа, Н	100—8000
Класс точности с позиционером	2,5

§ 62. Расчет и выбор исполнительных устройств

Необходимым условием качественной работы системы автоматического регулирования является правильный расчет и выбор размера исполнительного устройства, определяемого условной пропускной способностью K_{vy} . Занижение и завышение K_{vy} весьма нежелательны. В результате занижения размера регулирующего органа невозможно обеспечить проектную производительность установки. Завышение размера уменьшает диапазон рабочего хода, снижает точность отработки управляющего воздействия.

Пропускная способность с учетом формулы (10.2) рассчитывается исходя из соотношения

$$K_v = Q \sqrt{\rho/\Delta p}. \quad (10.14)$$

Определение перепада давления Δp на регулирующем органе осложняется тем, что имеющийся в системе напор распределяется между регулирующим органом и трубопроводом с местными сопротивлениями. Падение давления в трубопроводе возрастает с увеличением расхода по квадратической зависимости, в результате чего перепад давления на регулирующем органе соответственно падает. Поэтому расчетом определяют так называемую предварительную максимальную пропускную способность регулирующего органа $K_{v \max пр}$, исходя из минимального перепада давления на нем при максимальном расходе:

$$K_{v \max пр} = Q_{\max} \sqrt{\rho/\Delta p_{\min}}.$$

Это соотношение, как и выражение (10.2), справедливо только для несжимаемых жидкостей. Однако, определяя так называемую среднюю плотность сжимаемой жидкости $\rho_{ср}$, можно использовать для расчета соотношение

$$Q = K_v \sqrt{\Delta p/\rho_{ср}}. \quad (10.15)$$

Конкретный вид соотношения (10.15) определяется способом вычисления $\rho_{ср}$.

В соответствии с выражением (10.3) пропускная способность K_v для регулирующего органа определенной формы зависит от

коэффициента гидравлического сопротивления ξ . Опытном установлено, что постоянные ξ , а следовательно, и K_v наблюдаются при турбулентных режимах, характеризующимися числами Рейнольдса, превышающими некоторое предельное значение, причём оно зависит от конструкции регулирующего органа.

В практических расчетах режим течения учитывается индексом вязкости z (модифицированным числом Рейнольдса), определяемым по формуле

$$z = \frac{a Q_{\max}}{v_t \sqrt{K_{v \max пр}}},$$

где a — коэффициент, зависящий от типа ИСУ: для односедельных ИСУ $a = 700$, для двухседельных и заслоночных $a = 500$.

При $z \geq 10^4$ режим течения будет турбулентным, на который и проектируются промышленные исполнительные устройства. При $z < 10^4$ режим течения будет отличаться от турбулентного и в расчеты максимальной пропускной способности необходимо вносить поправку на вязкость:

$$K_{v \max} = \Psi_{Kv} K_{v \max пр}.$$

Как уже указывалось, при прохождении жидкости через узкое сечение исполнительного устройства статическое давление может снизиться до давления ее насыщенных паров, при котором наступает явление кавитации.

На рис. 92 изображена зависимость расхода жидкости Q от перепада давления в исполнительном устройстве $\sqrt{\Delta p}$ при фиксированном положении затвора [33]. В бескавитационном турбулентном режиме зависимость $Q = f(\sqrt{\Delta p})$ линейна.

Начиная с момента кавитации эта зависимость становится нелинейной, а после некоторого значения $\sqrt{\Delta p}$ расход Q вообще перестает зависеть от перепада давления. Образующаяся после узкого сечения между затвором и седлом парожидкостная смесь «запирает» исполнительное устройство, так как ее скорость при данном положении затвора достигает критического значения и не может превзойти его несмотря на дальнейшее увеличение перепада давления.

При прочих равных условиях кавитация начинается в различных исполнительных устройствах при различных перепадах давления:

$$\Delta p_{\text{кав}} = K_c (p_1 - p_n),$$

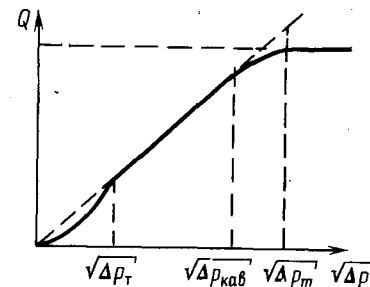


Рис. 92. Зависимость расхода жидкости от перепада давления в исполнительном устройстве при фиксированном положении затвора

где K_c — коэффициент начала кавитации; p_1 — давление среды на входе исполнительного устройства; p_n — давление насыщенных паров жидкости при температуре дросселирования.

Для обеспечения работы исполнительного устройства в бескавитационном режиме необходимо, чтобы перепад давления на нем не превышал величины $\Delta p_{\text{кав}}$. Это может быть достигнуто несколькими способами, например устанавливая последовательно два исполнительных устройства, в результате чего их общий коэффициент начала кавитации повысится, или выбирая исполнительное устройство с большим коэффициентом K_c , или устанавливая регулирующий орган ближе к источнику напора. Если практические условия не позволяют обеспечить бескавитационную работу исполнительного устройства, то определяют эффективный перепад давления Δp_m , при котором еще можно регулировать расход, по формуле

$$\Delta p_m = K_m (p_1 - r p_n),$$

где K_m — коэффициент кавитации, определяемый конструкцией ИСУ, степенью его открытия и направлением потока; r — поправочный коэффициент.

Коэффициент r определяется по формуле

$$r = 0,96 - 0,28 \sqrt{p_1/p_{\text{кр}}},$$

где $p_{\text{кр}}$ — абсолютное критическое давление регулируемой среды. В таком случае максимальная пропускная способность определяется с учетом Δp_m по формуле

$$K_{V \text{ max}} = Q_{\text{max}} \sqrt{\rho/\Delta p_m}.$$

Значения коэффициентов K_c и K_m для различных исполнительных устройств при их полном открытии приведены в табл. 23.

Исходя из полученного расчетом значения максимальной пропускной способности $K_{V \text{ max}}$, по каталогу промышленных исполнительных устройств выбираются условная пропускная способ-

Таблица 23

Конструкция регулирующего органа	Направление потока	K_c	K_m
Односедельный угловой	На затвор	0,4	0,5
	Под затвор	0,85	0,85
	С расширяющимся выходом	0,2	0,25
Односедельный проходной	На затвор	0,4	0,5
	Под затвор	0,85	0,85
Двухседельный	—	0,4	0,55
	—	0,35	0,55
	—	0,25	0,28

ность K_{Vy} и условный проход D_y . Выбор считается правильным при соблюдении следующих условий:

$$0,25D_T \leq D_y \leq D_T; \quad (10.16)$$

$$\omega < 5 \text{ м/с — для жидкости;} \\ \omega < 75 \text{ м/с — для газа и пара;} \quad (10.17)$$

$$K_{Vy} \geq \eta K_T K_{V \text{ max}}, \quad (10.18)$$

где D_T — диаметр трубопровода; ω — скорость среды на входе в исполнительное устройство; η — коэффициент запаса, равный при линейной расходной характеристике 1,25; при равнопроцентной расходной характеристике 1,6; при заслоночном регулирующем органе 1,35; K_T — коэффициент влияния сужения трубопровода (рис. 93).

Расчет и выбор исполнительного устройства по $K_{V \text{ max}}$ обеспечивает пропуск определенного количества регулируемой среды при заданных значениях параметров технологической системы.

Рассматривая исполнительное устройство как элемент системы автоматического регулирования, следует уделить особое внимание выбору его пропускной характеристики. При этом в расчетах наряду с пропускной характеристикой используется расходная характеристика регулирующего органа $Q = f_1(S)$. Обычно расход и перемещение затвора задаются в относительных долях от максимальных соответственно условного расхода Q_y и условного хода S_y . Тогда расходная характеристика имеет вид $q = f_2(l)$, где $q = Q/Q_y$ — относительный расход; $l = S/S_y$ — относительный ход затвора. Пропускная характеристика также обычно строится в относительных единицах $\sigma = f_3(l)$.

Для любого положения затвора отношение между расходом и пропускной способностью можно определить по соответствующей формуле. Например, используя соотношение (10.14), можно записать

$$K_V/Q = \sqrt{\rho/\Delta p}.$$

Если параметры среды ρ и Δp постоянны во всем диапазоне перемещения хода, т. е. не зависят от расхода, то пропускная и расходная характеристики совпадают по форме, отличаясь лишь масштабным коэффициентом. Заданные в относительном виде [$q = f_2(l)$ и $\sigma = f_3(l)$] эти характеристики полностью совпадают при постоянных параметрах среды ρ и Δp . Однако в

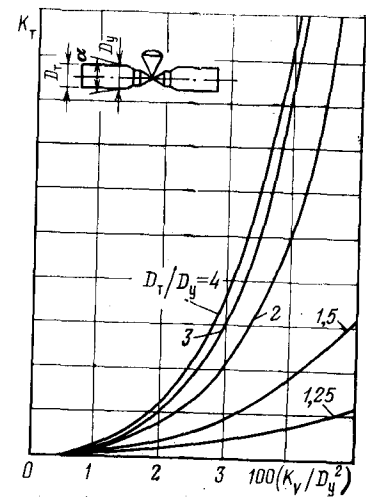


Рис. 93. График изменения коэффициента сужения трубопровода

большинстве случаев режимные параметры среды зависят от расхода, что вызывает отклонение расходной характеристики от пропускной.

С другой стороны, расходная характеристика, определяя коэффициент усиления регулирующего органа, влияет на динамические свойства всей системы регулирования, т. е. изменение параметров среды может вызвать изменение расходной характеристики, а следовательно, и коэффициента усиления регулирующего органа и исполнительного устройства в целом. Поэтому предпочтительной расходной характеристикой является такая, которая, несмотря на изменения параметров среды, обеспечивает постоянное значение коэффициента усиления. Но расходная характеристика регулирующего органа зависит не только от параметров среды, но и от профиля проходного сечения, т. е. от пропускной характеристики $K_V = f(S)$. В этих условиях задача выбора формы предпочтительной пропускной характеристики (которая только и указывается в каталогах) разбивается на два этапа: выбор формы расходной характеристики, обеспечивающей постоянство коэффициента усиления во всем диапазоне хода затвора; выбор формы пропускной характеристики, обеспечивающей при данных параметрах среды желаемую форму расходной характеристики.

На основании результатов исследований, проведенных группой авторов [14], рекомендуется выбирать расходную характеристику исполнительного устройства путем анализа системы регулирования по принципу инвариантности его коэффициента усиления к основным возмущениям, действующим в системе. Если основные возмущения в системе регулирования таковы, что они влекут за собой изменение расхода среды через регулирующий орган при фиксированном положении затвора, то для сохранения постоянства коэффициента усиления предпочтительна равнопроцентная расходная характеристика. Если же изменение расхода среды через регулирующий орган происходит лишь при перемещении его затвора, то предпочтительна линейная расходная характеристика.

Далее выбирается форма пропускной характеристики. В соответствии с ГОСТ 16443—70 это следует делать путем анализа отклонений действительных расходных характеристик, построенных на основании полученных расчетов параметров исполнительного устройства, от предварительно выбранной теоретической расходной характеристики (линейной или равнопроцентной). При этом вводится понятие гидравлического модуля системы $n = K_{Vy}/K_{Vt}$, где K_{Vt} — пропускная способность трубопроводной сети, определяемая по формуле

$$K_{Vt} = Q_{\max} \sqrt{\rho/\Delta p_t}$$

Для облегчения расчетов построены графики расходных характеристик различных исполнительных устройств при различных гидравлических модулях системы n [26]. На рис. 94 изобра-

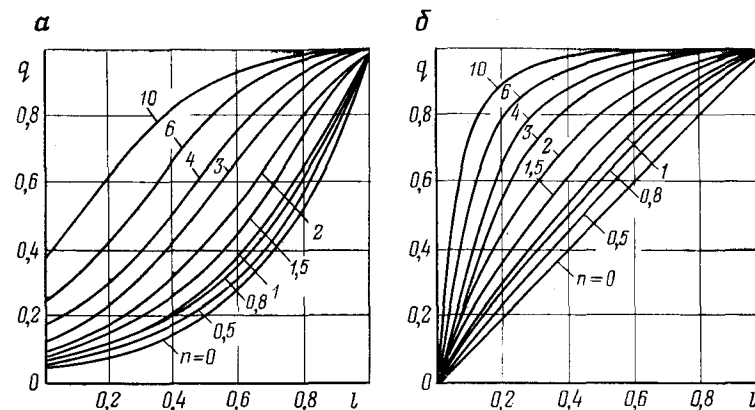


Рис. 94. Относительные расходные характеристики исполнительных устройств

жены такие графики для исполнительных устройств клапанного типа. Суть этих графиков заключается в следующем. Если трубопроводная сеть не оказывает влияния на работу исполнительного устройства ($K_{Vt} \rightarrow \infty$), то гидравлический модуль системы n равен нулю и расходная характеристика совпадает с пропускной. При увеличении влияния трубопроводной сети ($n > 0$) действительная расходная характеристика начинает отклоняться от пропускной (теоретической расходной). На рис. 94, а показаны отклонения действительной расходной характеристики от теоретической расходной, совпадающей с равнопроцентной пропускной, на рис. 94, б — от теоретической расходной совпадающей с линейной пропускной. Анализ заключается в выборе типа пропускной характеристики (линейной или равнопроцентной), которая бы при рассчитанном гидравлическом модуле системы n приближалась бы к предварительно выбранному типу расходной характеристики.

Исследования [14] показали, что если анализ действующих на систему возмущений выявил желательность равнопроцентной расходной характеристики, то наилучшее приближение к ней дает также равнопроцентная пропускная характеристика. В случае же предварительного выбора линейной расходной характеристики необходимо анализировать отклонение графиков действительной расходной характеристики и от линейной, и от равнопроцентной пропускной. В соответствии с изложенным предварительные значения максимального и минимального относительных расходов определяются через пропускную способность, так как при $n = 0$ эти характеристики совпадают:

$$q_{\max \text{ пр}} (\sigma_{\max}) = K_{V \max} K_{T \max} / K_{Vy},$$

$$q_{\min \text{ пр}} (\sigma_{\min}) = K_{V \min} K_{T \min} / K_{Vy}.$$

Действительные значения относительных расходов q_{\max} и q_{\min} и относительных ходов l_{\max} и l_{\min} при рассчитанном гидравлическом модуле системы n определяются по графикам на рис. 94 следующим образом. Откладывают на оси q значения $q = q_{\max}$ пр (q_{\min} пр) и через полученную точку проводят горизонтальную прямую до пересечения с расходной характеристикой при $n = 0$; затем из этой точки восстанавливают перпендикуляр до пересечения с расходной характеристикой при данном гидравлическом модуле системы n . Тогда абсцисса полученной точки даст величину действительного относительного хода l_{\max} (l_{\min}), а ордината — величину действительного относительного расхода q_{\max} (q_{\min}).

В качестве меры приближения действительной расходной характеристики к предварительно выбранной теоретической принята максимальная величина относительного отклонения коэффициента усиления K (в случае теоретической линейной) или коэффициента равнопроцентности K_p (в случае теоретической равнопроцентной):

$$\delta_K = |\Delta K|_{\max}/K;$$

$$\delta_{K_p} = |\Delta K_p|_{\max}/K_p;$$

Коэффициент усиления K и коэффициент равнопроцентности K_p вычисляются по формулам

$$K = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}};$$

$$K_p = \frac{\ln(q_{\max}/q_{\min})}{l_{\max} - l_{\min}}.$$

Отклонения ΔK определяются для максимального и минимального значений K или K_p (при q_{\max} и q_{\min}) с помощью специально построенных графиков (рис. 95). Они представляют собой зависимости относительного расхода от коэффициентов усиления (рис. 95, а, б) и коэффициентов равнопроцентности (рис. 95, в, г) [33].

Необходимую пропускную характеристику определяют по минимальной величине δ_K или δ_{K_p} . Если для всех рассмотренных случаев δ_K (δ_{K_p}) > 1 , то следует применить исполнительное устройство со специальной пропускной характеристикой.

Приведенные соотношения справедливы для несжимаемой жидкости. При регулировании расходов газов и паров необходимо вносить соответствующие коррективы в расчеты. Полностью методика расчета исполнительных устройств приведена в работе [33]. Здесь же укажем укрупненный алгоритм расчета и выбора исполнительного устройства при регулировании расхода несжимаемой жидкости:

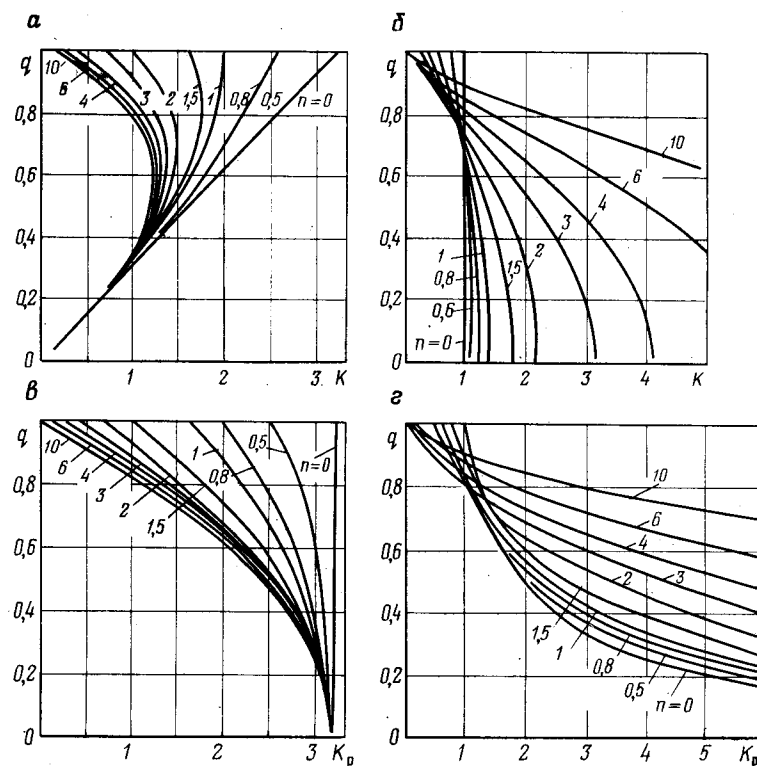


Рис. 95. Зависимость относительного расхода от коэффициента усиления (а, б) и коэффициента равнопроцентности (в, г): а, в — с равнопроцентной пропускной характеристикой; б, г — с линейной пропускной характеристикой

1. Выбор типа исполнительного устройства (НО или НЗ), а также типа конструкции регулирующего органа в соответствии с требованиями технологии.
2. Определение минимального перепада давления Δp_{\min} в исполнительном устройстве при максимальном расходе Q_{\max} .
3. Проверка ИСУ на кавитацию при максимальном расходе ($\Delta p_{\text{кав}} \geq \Delta p_{\min}$).
4. Вычисление предварительного значения максимальной пропускной способности $K_{V\max}$ пр.
5. Определение индекса вязкости z .
6. Выбор условной пропускной способности $K_{Vу}$ и диаметра условного прохода D_y по каталогу промышленных исполнительных устройств.
7. Проверка выбранного ИСУ на кавитацию при минимальном расходе ($\Delta p_{\text{кав}} > \Delta p_{\max}$).
8. Определение гидравлического модуля системы n при определенной пропускной способности трубопроводной сети $K_{Vт}$.

9. Вычисление предварительных (при $n=0$) q_{\max} пр, q_{\min} пр в действительных (при рассчитанном n) q_{\max} , q_{\min} , l_{\max} , l_{\min} , значений относительных расходов и относительных ходов.

10. Вычисление коэффициентов усиления K или K_p и их максимальных относительных отклонений δ_K или δ_{K_p} .

11. Выбор вида пропускной характеристики.

Рассматривая исполнительное устройство в динамике как элемент системы автоматического регулирования, необходимо знать его дифференциальное уравнение.

Согласно работе [33] исполнительное устройство описывается нелинейным дифференциальным уравнением третьего порядка. Однако, так как значения коэффициентов при второй и третьей производных на несколько порядков меньше коэффициента при первой производной, можно с достаточной степенью точности ограничить дифференциальное уравнение исполнительного устройства первым порядком. Пренебрегая силами трения в салнике, определяющими нелинейность исполнительного устройства, можно использовать идеализированное уравнение с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$$

Постоянная времени в этом выражении для исполнительных устройств с мембранным приводом может быть определена по формуле

$$T = \frac{(p_n F + c S_0) F}{\alpha R \theta}$$

где p_n — давление сжатого воздуха в мембранной камере, соответствующее началу перемещения подвижной системы; F — эффективная площадь мембраны; c — жесткость противодействующей пружины; S_0 — приведенный ход ($S_0 = V_n/F$); V_n — начальный объем мембранной камеры; α — коэффициент пропорциональности $\alpha = Q_{\text{ср}}/(p_n - p_k)$; $Q_{\text{ср}}$ — средний расход воздуха в мембранную камеру; p_n — давление сжатого воздуха, подводимого к мембранной камере; p_k — давление сжатого воздуха в мембранной камере; R — газовая постоянная; θ — абсолютная температура сжатого воздуха.

Коэффициент усиления K представляет собой произведение коэффициентов усиления исполнительного механизма $K_{\text{им}}$ и регулирующего органа K_p :

$$K = K_{\text{им}} K_p$$

Эти коэффициенты обычно задаются в относительных единицах.

Конструкция современных исполнительных механизмов обеспечивает коэффициент усиления $K_{\text{им}} = 1$ с точностью 4% без позиционера и с точностью 2,5% с позиционером. Поэтому относительный коэффициент усиления исполнительного устрой-

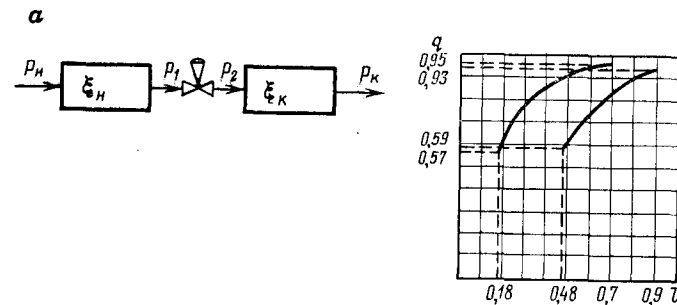


Рис. 96. Схема расчетного участка (а) и полученные расходные характеристики (б) к примеру расчета

ства будет определяться коэффициентом усиления регулирующего органа.

Таким образом, найденное по приведенной в данном параграфе методике значение коэффициента усиления (K или K_p) может быть использовано при определении передаточной функции исполнительного устройства.

Приведем пример расчета и выбора исполнительного устройства в соответствии с изложенной методикой:

✓ 1. Исходные данные (в соответствии со схемой расчетного участка — рис. 96, а)

Регулируемая среда	Вода
Абсолютное давление среды, МПа:	
в начале расчетного участка p_n	22
в конце расчетного участка, p_k	17
Температура среды t , °C	10
Расход среды, м³/ч:	
максимальный Q_{\max}	35
минимальный Q_{\min}	18
Плотность ρ , кг/м³	1000
Вязкость кинематическая при 10 °C ν_{10} , м²/с (см²/с)	130 (0,013)
Условный проход трубопровода D_T , мм	80
Приведенный коэффициент гидравлического сопротивления участков трубопроводной сети, мм:	
до ИСУ ξ_n	$0,026 \cdot 10^{-4}$
после ИСУ ξ_k	$0,026 \cdot 10^{-4}$
Расходная характеристика (предпочтительная)	Линейная
Тип исполнительного устройства	Двухседельное

2. Определение минимального перепада давления при максимальном расходе [33]

$$p_{1 \min} = p_n - 63,8 Q_{\max}^2 \rho \xi_n = 2,2 - 63,8 \cdot 35^2 \cdot 10^3 \cdot 0,026 \cdot 10^{-4} = 2,2 - 0,203 = 1,997 \text{ МПа};$$

$$p_{2 \max} = p_k + 63,8 Q_{\max}^2 \rho \xi_k = 1,7 + 0,203 = 1,903 \text{ МПа};$$

$$\Delta p_{\min} = p_{1 \min} - p_{2 \max} = 1,997 - 1,903 = 0,094 \text{ МПа}.$$

3. Проверка ИСУ на кавитацию при максимальном расходе

$$\Delta p_{\text{кав}} = K_c (p_{1 \min} - p_n) = 0,4 (1,997 - 0,001) = 0,798 \text{ МПа}.$$

Так как $\Delta p_{\text{кав}} > \Delta p_{\text{мин}}$ ($0,798 > 0,094$), то кавитация в ИСУ при $Q = Q_{\text{max}}$ отсутствует.

4. Вычисление предварительного значения максимальной пропускной способности [см. соотношение (10.4)]

$$K_{V \text{ max пр}} = \frac{Q_{\text{max}}}{100} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_{\text{мин}}}} = \frac{35}{100} \sqrt{\frac{1000}{0,094}} = 36,1 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

5. Определение индекса вязкости

$$z = \frac{a Q_{\text{max}}}{v_t \sqrt{K_{V \text{ max пр}}}} = \frac{500 \cdot 35}{0,013 \sqrt{36,1}} = 2,24 \cdot 10^5.$$

Так как $z > 10^4$ (характер течения — турбулентный), принимаем $K_{V \text{ max}} = K_{V \text{ max пр}} = 36,1 \text{ м}^3/\text{ч.}$

6. Пользуясь каталогом промышленных исполнительных устройств, выбираем ИСУ с условным проходом $D_y = 50$ мм и условной пропускной способностью $K_{Vy} = 40 \text{ м}^3/\text{ч.}$

Проверим выполнение условий (10.16), (10.17) и (10.18). Условие $0,25 D_T \leq D_y \leq D_T$ выполняется. Скорость среды на входе

$$\omega = \frac{353 Q_{\text{max}}}{D_y^2} = \frac{353 \cdot 35}{50^2} = 4,9 \text{ м/с} < 5 \text{ м/с,}$$

т. е. условие (10.17) выполняется.

При $100(K_{V \text{ max}}/D_y^2) = 1,4$ по рис. 93 $K_T = 1,2$; $40 \geq 1,25 \cdot 1,02 \cdot 36,1$; $40 \geq 46,02$,

т. е. условие (10.18) не выполняется, поэтому выбираем по каталогу $D_y = 50$ мм, $K_{Vy} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ (например, ИСУ типа К-40).

7. Проверка выбранного исполнительного устройства на кавитацию при минимальном расходе (максимальном перепаде давления)

$$p_{1 \text{ max}} = p_n - 63,8 Q_{\text{мин}}^2 \rho \xi_n = 2,2 - 63,8 \cdot 18^2 \cdot 10^3 \cdot 0,026 \cdot 10^{-4} = 2,2 - 0,054 = 2,146 \text{ МПа;}$$

$$p_{2 \text{ min}} = p_k - 63,8 Q_{\text{мин}}^2 \rho \xi_k = 1,7 + 0,054 = 1,754 \text{ МПа;}$$

$$\Delta p_{\text{max}} = p_{1 \text{ max}} - p_{2 \text{ min}} = 2,146 - 1,754 = 0,392 \text{ МПа.}$$

Необходимо проверить условие $\Delta p_{\text{кав}} > \Delta p_{\text{max}}$ при $\Delta p_{\text{кав}} = K_c (p_{1 \text{ max}} - p_n)$.

Уточненная величина коэффициента начала кавитации K_c (по сравнению с данными табл. 22) определяется по графикам [33] в зависимости от максимального коэффициента гидравлического сопротивления, зависящего от параметров выбранного ИСУ:

$$K_c = f(\xi_{\text{max}}), \quad \xi_{\text{max}} = \frac{25,4 F_y^2}{K_{V \text{ min}}},$$

где F_y — площадь проходного сечения ИС.

Для нашего случая $K_c = 0,27$

$$\Delta p_{\text{кав}} = 0,27 (2,146 - 0,001) = 0,579 \text{ МПа.}$$

Так как $\Delta p_{\text{кав}} > \Delta p_{\text{max}}$ ($0,579 > 0,392$), при $Q = Q_{\text{мин}}$ кавитация отсутствует.

8. Определение гидравлического модуля системы.

Перепад давления в трубопроводной сети при максимальном расходе

$$\Delta p_T = p_n - (p_k + \Delta p) = 2,2 (1,7 + 0,094) = 0,594 \text{ МПа.}$$

Пропускная способность трубопроводной сети

$$K_{VT} = \frac{Q_{\text{max}}}{100} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_T}} = \frac{35}{100} \sqrt{\frac{1000}{0,594}} = 14,4 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Гидравлический модуль системы

$$n = K_{Vy}/K_{VT} = 50/14,4 \approx 3,5.$$

9. Определение значений относительных расходов и относительных ходов. Предварительные значения расходов

$$q_{\text{max пр}} = \frac{K_{V \text{ max}} K_{T \text{ max}}}{K_{Vy}} = \frac{36,1 \cdot 1,02}{50} = 0,7;$$

$$q_{\text{min пр}} = \frac{K_{V \text{ min}} K_{T \text{ min}}}{K_{Vy}} = \frac{9,1 \cdot 1,0}{50} = 0,18.$$

Минимальная пропускная способность

$$K_{V \text{ min}} = \frac{Q_{\text{min}}}{100} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_{\text{max}}}} = \frac{18}{100} \sqrt{\frac{1000}{0,392}} = 0,91 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

$K_{T \text{ min}}$ определяем по графикам на рис. 93 для

$$100 (K_{V \text{ min}}/D_y^2) = 0,36; \quad K_{T \text{ min}} \approx 1.$$

Пользуясь графиками на рис. 94, находим значения относительных действительных расходов и ходов.

Пропускная характеристика	q_{max}	q_{min}	l_{max}	l_{min}	Δl
Линейная характеристика	0,95	0,57	0,7	0,18	0,52
Равнопроцентная характеристика	0,93	0,59	0,9	0,48	0,42

Так как путем анализа возмущений в системе предварительно была выбрана линейная теоретическая расходная характеристика (см. исходные данные), будем искать приближение к ней под влиянием трубопроводной сети и линейной, и равнопроцентной пропускных характеристик. Обе полученные расходные характеристики изображены на рис. 96, б (l — при линейной пропускной, 2 — при равнопроцентной пропускной). Вначале проверим соблюдение предварительных условий по относительному ходу: $l_{\text{min}} \geq 0,1$; $l_{\text{max}} \leq 0,9$ $\Delta l \geq 0,25$ — соблюдаются для обеих характеристик.

10. Вычисление коэффициента усиления K (так как теоретическая характеристика — линейная) и его отклонений

$$K = \frac{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}}{e_{\text{max}} - l_{\text{min}}};$$

при линейной пропускной характеристике

$$K_1 = \frac{0,95 - 0,57}{0,7 - 0,18} = 0,73;$$

при равнопроцентной пропускной характеристике

$$K_2 = \frac{0,93 - 0,59}{0,90 - 0,48} = 0,81.$$

Пользуясь графиками на рис. 95, находим максимальное и минимальное действительные значения коэффициентов усиления K_{max} , K_{min} (при q_{max} и q_{min}). Далее вычисляем верхнее и нижнее отклонения K_v и K_n от K_1 и K_2 , а затем — максимальные относительные отклонения δ_{K_1} и δ_{K_2} . Запишем полученные результаты.

Пропускная характеристика	K	K_{max}	K_{min}	ΔK_v	ΔK_n	δ_K
Линейная характеристика	0,73	2	0,45	1,27	-0,28	1,74
Равнопроцентная характеристика	0,81	1,3	0,6	0,49	-0,21	0,6

11. Отвергнув вариант при $\delta_K = 1,74 (> 1)$, выбираем исполнительное устройство с равнопроцентной пропускной характеристикой.

ГЛАВА 11.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ

Нефтяная и газовая скважины представляют собой технологические объекты, сооружение которых можно условно разделить на три этапа: подготовительные работы, проводку скважины и заключительные работы. Подготовительные работы включают прокладку подъездных путей, подвод воды, электроэнергии, земляные работы, сооружение и монтаж. Проводка скважины заключается в бурении ствола скважины (вертикального или наклоннонаправленного), разобщении пластов и креплении стенок. Заключительные работы сооружения скважины включают перфорацию и опробование. Наиболее длительным трудоемким этапом является проводка скважины. Основным технологическим процессом проводки скважины принято считать процесс бурения. Бурение скважины заключается в разрушении горных пород, выносе их на дневную поверхность и выполнении спуско-подъемных операций с целью наращивания (увеличения длины) колонны бурильных труб и подъема и спуска всей колонны при смене затупившегося долота и после завершения бурения.

Совершенствование технологических процессов подготовительных и заключительных работ, а также спуско-подъемных операций осуществляется механизацией их. Совершенствования процесса бурения можно достигнуть его автоматизацией.

§ 63. Теоретические основы автоматического управления процессом бурения

Процесс вращательного бурения скважин характеризуется независимыми и зависимыми параметрами. К независимым параметрам процесса бурения относятся осевая нагрузка на долото частота его вращения и расход промывочной жидкости. От этих параметров режима бурения, а также от механических свойств горных пород, конструкции и состояния долота зависят вращающий момент и скорость проходки (зависимые параметры).

Задачей автоматизации процесса бурения является автоматическое регулирование независимых параметров в функции изменения механических свойств горных пород и состояния бурильного инструмента (долота и бурильных труб). При этом режим бурения должен обеспечивать максимальную скорость проходки. Это достигается рациональным сочетанием нагрузки

на долото, его частоты вращения и расхода промывочной жидкости.

При ручном управлении процессом бурения нагрузка на долото регулируется изменением подачи бурильного инструмента при помощи тормозного устройства лебедки. Подача инструмента осуществляется уменьшением усилия на лентах тормозного барабана. При этом бурильные трубы (бурильный инструмент) под действием силы тяжести опускается вниз (подача бурильного инструмента) до тех пор, пока бурильщик не затормозит барабан лебедки. При подаче бурильного инструмента осевая нагрузка ступенчато увеличивается. По мере разбуривания горных пород и соответственно углубления долота осевая нагрузка уменьшается. Отпуская тормоз лебедки, бурильщик снова осуществляет подачу. При этом, очевидно, подача осуществляется не плавно, а ступенчато.

Частоту вращения бурильного инструмента при роторном способе бурения можно изменять ступенчато, меняя передачу от привода к ротору. При бурении электробуром изменить частоту вращения сложнее, так как для этого требуется применение громоздких частотных преобразователей. При турбинном бурении частота вращения зависит от нагрузки на долото. Расход промывочной жидкости можно изменять сменой рубашек бурового насоса, т. е. также ступенчато.

Исследования показывают, что наиболее эффективным при бурении с нерегулируемым приводом является автоматизация подачи долота. Автоматическое регулирование подачи инструмента обеспечивает регулирование нагрузки на долото, что приводит к соответствующей скорости проходки (углубления скважины) при необходимом режиме промывки забоя скважины.

Рассмотрим характер изменения проходки в функции изменения нагрузки на долото при ручной и автоматической подачах бурильного инструмента. При ручной подаче бурильщик на короткое время освобождает тормоз барабана, который за этот отрезок времени делает поворот на определенный угол. При этом бурильный инструмент опускается и часть веса колонны передается на забой, увеличивая нагрузку на долото. По мере срезания породы долотом последнее опускается, осевая нагрузка на него, а следовательно, и момент, передаваемый через бурильные трубы и долото, уменьшаются до нулевого значения. Цикл этот изображен на рис. 97, где AB — начальная нагрузка на забой при освобождении тормоза, AB — проходка. Площадь треугольника ABB пропорциональна работе, выполненной долотом за период рассмотренного цикла. Возьмем на этой диаграмме точку K , причем $AK = AB/2$. Если из точки K провести линию KL , параллельную оси абсцисс, то площадь прямоугольника $AKLB$ будет равна площади треугольника ABB . Следовательно, по аналогии с предыдущим рассуждением такая же работа может быть выполнена долотом при нагрузке и крутящем моменте вдвое меньших, если их под-

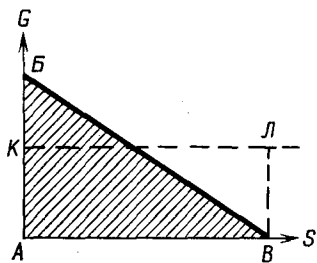


Рис. 97. График изменения нагрузки на забой G и проходки S при ручной и автоматической подаче

держивать в течение всего цикла постоянными. Если начальную нагрузку AB все время поддерживать постоянной, то работа долота при тех же предельных напряжениях бурильного инструмента и всего оборудования будет в 2 раза больше, чем при периодической подаче долота. Износ всего оборудования, обусловленный постоянной нагрузкой, в отличие от переменных динамических нагрузок, характерных для ручной подачи, будет меньшим.

Таким образом, автоматическая подача бурильного инструмента обеспечивает увеличение механической

скорости, относительное снижение крутящего момента в бурильных трубах, уменьшение износа долота и соответственное увеличение проходки.

Для управления осевой нагрузкой можно воздействовать на перемещение верхнего или нижнего конца бурильной колонны. В первом случае устройство подачи долота (УПД) располагается на поверхности. Такие устройства называются наземными устройствами подачи долота. Во втором случае УПД устанавливаются в скважине вблизи забоя и называются они глубинные устройства подачи долота.

Схема управления процессом бурения изображена на рис. 98. Бурильщик, наблюдая показания прибора при отклонении нагрузки на долото, с целью приведения ее к заданному значению перемещает на величину S рукоятку тормоза лебедки. При этом изменяются усилие F тормозных колодок на шкив барабана лебедки, подача инструмента и осевая нагрузка на долото. При уменьшении тормозного усилия увеличиваются подача и осевая нагрузка на долото. При увеличении усилия подача и осевая нагрузка уменьшаются. Таким образом, роль бурильщика сводится к перемещению рукоятки управления тормозом лебедки в функции изменения показаний прибора (изменения нагрузки на долото). При этом бурильщик приводит нагрузку на долото в соответствие с нагрузкой, заданной геологическим нарядом на бурение. С помощью тормоза он управляет подачей ΔS бурильного инструмента, которая определяется выражением

$$\Delta S = k \Delta G, \quad (11.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, показывающий, какое перемещение инструмента приходится на единицу отклонения нагрузки на долото; ΔG — отклонение осевой нагрузки от заданного значения.

Управление по формуле (11.1) можно осуществить автоматически, если бурильщика в схеме 98, а заменит исполнитель-

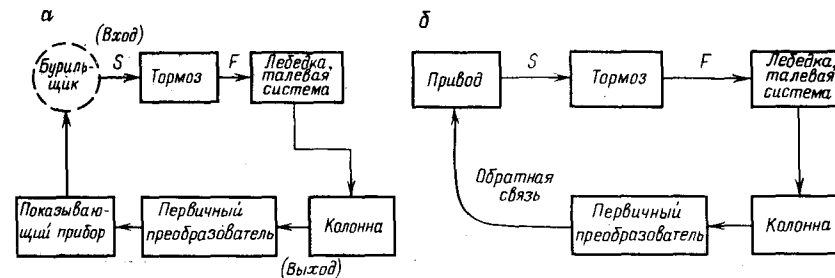


Рис. 98. Схемы ручного (а) и автоматического (б) управления подачей долота

ный механизм (привод), управляемый первичным преобразователем и воздействующий на тормоз буровой лебедки (рис. 98, б). В этом случае будет схема автоматического регулирования по отклонению.

Сопоставляя схемы 98, а и 98, б, мы видим, что система автоматического управления замкнутая, в отличие от разомкнутой при ручном управлении. Обратная связь в этой замкнутой системе осуществляется первичным преобразователем, в качестве которого применяется трансформатор давления гидравлического индикатора веса или первичный преобразователь электрического индикатора веса. Входной величиной для управления приводом служит значение нагрузки на долото. Поскольку мощность сигнала первичного преобразователя в большинстве случаев может оказаться недостаточной для управления приводом в схему вводят промежуточное звено-усилитель (рис. 99). Кроме рассмотренных элементов в этой схеме предусмотрены блок сравнения и задатчик. С помощью задатчика устанавливается нагрузка на долото, которая должна автоматически поддерживаться регулятором подачи. Блок сравнения выполняет функцию выработки управляющего сигнала, пропорционального разнице между существующей и заданной нагрузками на долото. В данном случае само рассогласование является источником воздействия, направленного на его устранение. При автоматическом управлении подачей долота бурильная колонна используется как передаточное звено. Поэтому для успешного решения задачи автоматизации процесса бурения весьма важно исследовать статические и динамические характеристики бурильной колонны, ее влияние на процесс бурения.

Бурильная колонна в процессе бурения находится под действием осевых сил и крутящих моментов, как распределенных по длине, так и приложенных в отдельных точках. На нижнем конце колонны приложены осевая реакция забоя и реактивный крутящий момент долота, а по длине распределены силы веса, инерционные, а также вязкого и сухого трения. Все эти силы, действующие на колонну, приводят к тому, что нарушается согласованность в перемещениях верхнего и нижнего концов

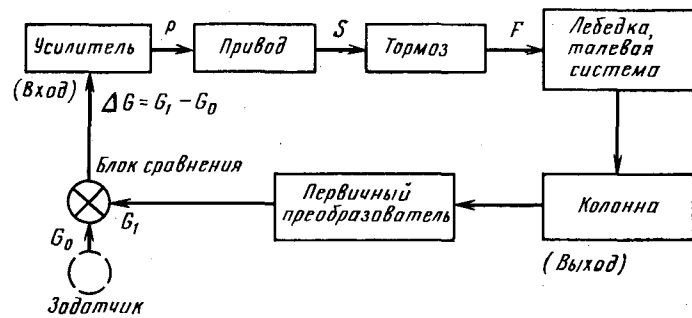


Рис. 99. Схема автоматического регулятора подачи долота

колонны, резко снижается точность измерения осевой нагрузки на долото наземными измерителями, ухудшается качество управления процессом бурения.

Изучение динамических характеристик велось различными исследователями [27] как на механических, так и на электрических моделях. При этом колонна бурильных труб рассматривалась как упругий растянутый стержень, подверженный продольным и крутильным колебаниям:

$$\frac{\partial P}{\partial S} = m \frac{\partial V}{\partial t} + f_v + f_c + mg; \quad (11.2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = EF \frac{\partial V}{\partial S}; \quad (11.3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial S} = J_0 \frac{\partial \omega}{\partial t} + M_v + M_c; \quad (11.4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = GJ_0 \frac{\partial \omega}{\partial S}, \quad (11.5)$$

где P — растягивающая сила в сечении колонны, m — масса бурильных труб; S — ордината вдоль оси колонны; V — продольная скорость точки колонны; t — время; f_v — сила вязкого трения на единицу длины колонны; f_c — сила сухого трения на единицу длины колонны; g — ускорение свободного падения; EF — жесткость сечения колонны; M — крутящий момент в сечении колонны; J_0 — момент инерции длины колонны; ω — угловая скорость в сечении колонны; M_v — момент вязкого трения на единицу длины колонны; M_c — момент сухого трения на единицу длины колонны; GJ_0 — крутильная жесткость колонны.

Ввиду малости длины сжатой части колонны по сравнению с растянутой ($L_{\text{раст}} \gg L_{\text{сж}}$) вся колонна считается растянутой. Ввиду малой разницы в диаметрах скважины и колонны по сравнению с ее длиной можно принять, что ось колонны совпадает с осью скважины.

Проведенные на механической и электрической моделях исследования динамики бурильной колонны как передаточного звена системы автоматического регулирования подачи долота показали, что бурильная колонна искажает передаваемые через нее механические импульсы и поэтому является источником возмущающих воздействий при автоматическом регулировании подачи долота. Влияние сил сухого трения колонны о стенки скважины особенно сильно проявляется в переходных режимах. При этом фактическая осевая нагрузка на долото может отличаться от измеренной на поверхности на силу сухого трения.

Силы сухого трения продольного движения колонны на порядок больше сил сухого трения вращательного движения. Это по-видимому, следствие «зависания» колонны выступами замковых соединений о стенки скважины.

Чтобы лучше понять работу устройств подачи долота (УПД) представим колонну бурильных труб в виде пружины, жесткость и вес которой равны жесткости и весу реальной колонны (рис. 100), а масса пренебрежительно мала.

Такая модель позволит упрощенно выразить зависимость между медленными изменениями перемещений, скоростей и усилий в верхней и нижней точках бурильной колонны. При этом не учитываются инерционные усилия, возникающие при перемещении частей колонны, обладающих массой. Модель не учитывает также сил трения между частями колонны, стенками скважины и буровым раствором, что достаточно справедливо в тех случаях, когда бурильные трубы вращаются. При этом основная составляющая сил трения снимается моментом, вращающим бурильную колонну. При турбинном бурении и бурении с помощью электробурра, когда бурильная колонна неподвижна, указанное допущение справедливо только для вертикальных скважин глубиной не более 2—3 тыс. м.

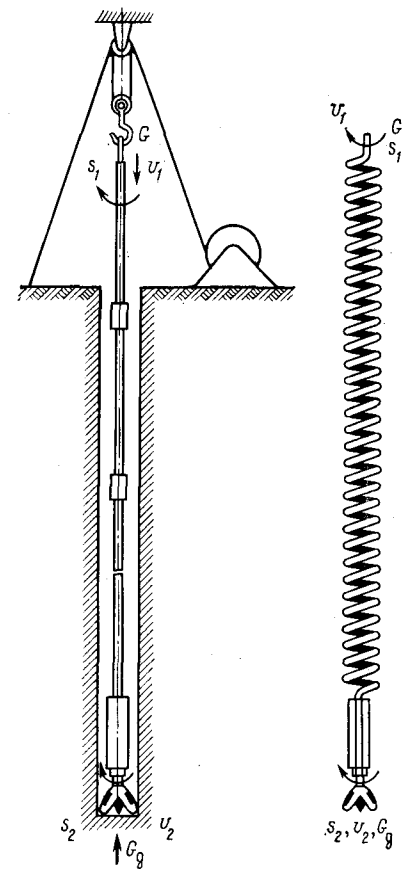


Рис. 100. Схема колонны бурильных труб

Для принятой схемы справедливы следующие соотношения:

$$G_d = G_0 - G; \quad (11.6)$$

$$S_1 - S_2 = \frac{L}{EF} G_d; \quad (11.7)$$

$$v_1 - v_2 = \frac{L}{EF} \cdot \frac{dG_d}{dt}, \quad (11.8)$$

где G_d — осевая нагрузка на долото; G_0 — полная сила веса бурильной колонны; G — сила веса бурильной колонны, измеряемая на верхнем конце ее (на крюке); S_1 и S_2 — перемещения соответственно верхнего и нижнего концов колонны; L — длина бурильной колонны; v_1 и v_2 — скорости верхнего и нижнего концов колонны.

Преобразовав (11.8) в $v_1 = v_2 + (L/EF) (dG_d/dt)$, мы видим, что значение скорости v_1 должно быть больше максимального значения v_2 , чтобы был запас скорости, равный $(L/EF) (dG_d/dt)$, для деформации колонны с целью изменения нагрузки на долото. Соотношения (11.6) и (11.7) показывают, что для управления осевой нагрузкой G_d при заданной длине буровой колонны L и ее весе G_0 можно воздействовать на перемещение верхнего или нижнего конца бурильной колонны.

Наземные УПД могут работать в функции поддержания постоянства одной из следующих величин: осевой нагрузки на долото, частоты вращения долота, тока электробура. Осевая нагрузка на долото G_d создается частью веса бурильной колонны, т. е. путем перераспределения величин G_0 и G в формуле (11.6). Это осуществляется перемещением верхнего конца бурильной колонны с помощью УПД. При этом нижний конец бурильной колонны опускается со скоростью v_2 , равной механической скорости бурения:

$$v_2 = ke^{-at} G_d^\beta n^\alpha, \quad (11.9)$$

где k — коэффициент буримости, зависящий от крепости породы, типа долота, количества и качества промывочной жидкости; a — коэффициент, зависящий от типа долота и свойств породы; t — текущее время механического бурения; n — частота вращения долота; β — показатель, близкий к единице (для пород твердых и средней твердости); α — показатель, изменяющийся в диапазоне 0,3—0,8 и возрастающий с уменьшением твердости породы.

В интервалах однородной породы в короткие отрезки времени устанавливается постоянная механическая скорость проходки. Приняв, что в этих интервалах величина $ke^{-at} n^\alpha = C$ постоянная и $\beta \approx 1$, получим

$$v_2 = CG_d. \quad (11.10)$$

Подставив v_2 из (11.10) в (11.8), получим

$$v_1 = \frac{L}{EF} \cdot \frac{dG_d}{dt} + CG_d. \quad (11.11)$$

При установившемся режиме скорость v_1 подачи верхнего конца колонны равна механической скорости бурения v_2 . Следовательно, все сечения бурильной колонны должны равномерно опускаться. В процессе работы УПД скорость v_1 может изменяться в широких пределах и менять знак на обратный (в переходных режимах). Для равномерной подачи долота датчиком УПД измеряется осевая нагрузка на долото, которая сравнивается с заданной, затем выдается импульс на подачу (S_1 либо v_1 , либо G) такой величины и знака, чтобы регулируемый параметр (осевая нагрузка на долото G_d либо частота вращения долота n , либо ток электробура) поддерживался постоянным. Как уже указывалось, изменение осевой нагрузки может осуществляться перемещением верхнего конца бурильной колонны с помощью различных УПД. Управление частотой вращения долота осуществляется различными способами, зависящими от типа применяемого привода долота. В роторном бурении для этой цели воздействуют на первичный двигатель (дизель, двигатель постоянного тока), либо изменяют передаточное число между валом двигателя и ротором (с помощью коробки передач, гидротрансформатором и т. п.). В электробурении частоту вращения долота можно изменять воздействием на частоту питающего напряжения. Для турбинного бурения одним из способов управления частотой вращения долота является изменение количества прокачиваемой жидкости. Перечисленные способы управления частотой вращения непосредственно не зависят от нагрузочного момента на долото.

Если привод имеет мягкую внешнюю характеристику, частоту вращения долота можно изменять воздействием на осевую нагрузку. К таким приводам относятся привод долота от турбины, а также привод с помощью ротора, вращение которому передается от гидравлического или электрического двигателя с серийной характеристикой.

По степени автоматизации процесса бурения УПД можно разделить на механизмы подачи долота (МПД) и автоматы подачи долота (АПД). МПД представляют собой устройства, обеспечивающие равномерную подачу долота. При использовании МПД бурильщик освобожден от физического труда, но он должен наблюдать за приборами, измеряющими параметры процесса бурения, и управлять МПД для поддержания параметров на заданном уровне. АПД представляют собой автоматические регуляторы, осуществляющие подачу долота с поддержанием заданного режима бурения (осевая нагрузка на долото, частота вращения долота, сила тока привода, мощность на выходном валу, расход промывочной жидкости). Схема АПД включает измерительные устройства, задатчики,

элементы сравнения, устройства обратной связи.

По принципу действия УПД делятся на фрикционные, гидравлические и электромашинные. По месту воздействия на бурильную колонну УПД делят на наземные и глубинные. Наземные УПД воздействуют на верхнюю часть бурильной колонны, а глубинные — на нижнюю. У наземных УПД конструкция, схема и габариты не зависят от размеров скважины и условий работы долота на забое. У глубинных УПД механизм подачи расположен в скважине, вблизи забоя, что накладывает ограничения на конструкцию, схему, габариты устройства из-за ограниченного диаметра ствола скважины, высокого давления заполняющей скважину буровой жидкости, высокой температуры, ударов и вибраций, сопровождающих работу долота. Однако глубинные УПД позволяют лучше осуществлять управление подачей долота, особенно в глубоких скважинах, так как из контура управления исключается колонна бурильных труб, вносящая помехи из-за рассмотренных выше сложных условий, в которых она работает.

§ 64. Фрикционные устройства подачи долота

Силовым узлом этих УПД является фрикционный тормоз. Он удерживает часть веса бурильной колонны G и, таким образом, обеспечивает поддержание необходимой осевой нагрузки на долото G_1 . В качестве тормозного механизма используется непосредственно ленточный тормоз буровой лебедки. Для ленточного тормоза связь между нагрузкой на долото и натяжением в сбегавшем конце тормозной лебедки выражается равенством

$$G_1 = G_0 - f_1 - p \frac{2mD_2}{D_1} (e^{\mu\alpha} - 1), \quad (11.12)$$

где G_1 — нагрузка на долото; G_0 — вес колонны бурильных труб; f_1 — сумма сил трения в буровой лебедке, талевой системе и бурильной колонне о стенки скважины, приведенная к верхней точке бурильной колонны; p — натяжение в сбегавшем конце тормозной ленты; m — число роликов талевого блока; D_2 — диаметр тормозной шайбы; D_1 — диаметр барабана лебедки; μ — коэффициент трения ленты о тормозную шайбу барабана; α — угол охвата тормозной шайбы лентой.

Из равенства (11.12) видно, что нагрузка на долото G_1 при постоянных силе трения f_1 и коэффициенте трения μ линейно зависит от натяжения тормозной ленты p . Таким образом, изменяя p , можно осуществить регулирование нагрузки на долото.

Одним из первых УПД этого типа является устройство подачи Шахназарова, разработанное в начале 30-х годов (рис. 101). Один конец стального каната 4, переброшенного через ролики 2, 3, прикреплен к свободному концу тормозной

рукоятки 5. К другому концу каната подвешен груз 1, состоящий из набора пластин. Сила тяжести груза обеспечивает определенный натяг тормозных лент 6 и тем самым заданную нагрузку на долото. Изменение скорости подачи достигается добавлением или снятием грузовых пластин. Из-за несовершенства конструкции, неоперативности управления (снятие и добавление грузов) это устройство не получило распространения. Тормозная система буровой лебедки была использована в пневматическом УПД Капелюшников — Залкина, в котором усилие, создаваемое сжатым воздухом, на тормозную ленту передавалось через пневматический сервопривод. Изменение натяжения тормозной ленты, а следовательно, и скорости подачи бурильного инструмента осуществлялось в этом УПД дросселированием сжатого воздуха на выходе пневмопривода специальным вентиляем. Позднее был предложен ряд конструкций УПД с воздействием на ленточный тормоз буровой лебедки, в которые были внесены различные усовершенствования.

На рис. 102, а изображено фрикционное УПД типа СВМ для автоматической подачи бурового инструмента при турбинном и роторном бурении, обеспечивающее постоянство заданной осевой нагрузки на долото. Устройство состоит из поршневого пневматического механизма 1, механически связанного с тормозной рукояткой лебедки, механизма обратной связи 2 и электрического пульта управления 3. Контроль осевой нагрузки на долото осуществляется электроконтактным манометром ЭКМ, соединенным с гидравлической системой гидравлического трансформатора давления индикатора веса ГИВ-6. ЭКМ расположен на пульте управления и дает сигнал на подачу инструмента при снижении нагрузки на долото менее заданной и на прекращение подачи, если нагрузка на долото достигла заданного значения.

Электрическая схема СВМ изображена на рис. 102, б. При включении тумблера В1 контакт КР1 поляризованного реле Р1 переходит из нейтрального положения в крайнее левое, подготавливая цепь базы транзистора ПП1. Одновременно размыкающий контакт включает аварийный электропневматический клапан ЭМ2, подготавливающий линию к подаче воздуха в исполнительный механизм. Если фактическая осевая нагрузка на долото будет меньше заданной, контакт ЭКМ подает напряжение на базу транзистора ПП1, который сработает и включит реле Р2. При этом через контакты К1Р2 и К2Р2 будет подано напряжение на соленоид рабочего электропневмоклапана,

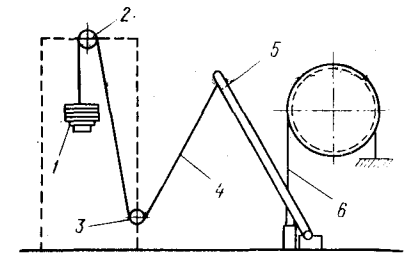


Рис. 101. Схема устройства подачи долота Шахназарова

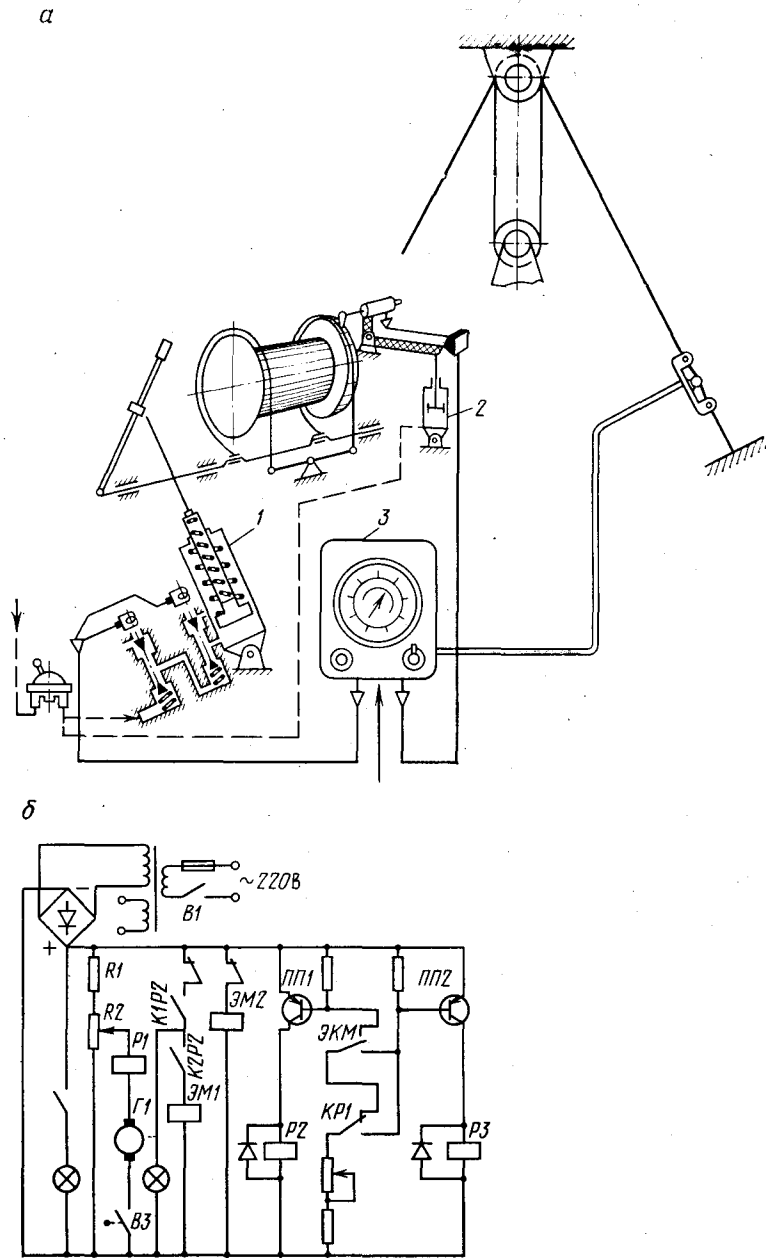


Рис. 102. Функциональная (а) и электрическая (б) схемы регулятора подачи долота СВМ

который откроет доступ сжатого воздуха в цилиндр исполнительного механизма 1. Поршень исполнительного механизма приподнимет рукоятку тормоза и осуществит подачу инструмента. Вращение барабана лебедки передается тахогенератору Г1, включенному встречно с источником питания через катушку реле Р1. Когда напряжение тахогенератора сравняется с падением напряжения на катушке реле Р1 от источника питания, контакт КР1 займет нейтральное положение. В результате электропневмоклапан ЭМ1 отключится, подача инструмента прекратится, напряжение на генераторе Г1 уменьшится и реле Р1 снова включится, возобновив подачу инструмента. Процесс будет повторяться, пока вес бурильного инструмента сравняется с заданным.

Резистором Р2 регулируется скорость подачи и устанавливается продолжительность импульса подачи. Если осевая нагрузка возрастает сверх заданной на 30—50 кН или произойдет переподача инструмента, то в цепи транзистора ПП2 замкнутся контакты ЭКМ, что приведет к срабатыванию реле Р3 и включению аварийного и рабочего пневмоклапанов. При превышении заданной частоты вращения барабана лебедка замыкается контакт реле Р1 в цепи базы транзистора ПП2, что вызовет срабатывание аварийной цепи торможения лебедки. Обрыв цепи тахогенератора и катушки реле Р1 вызовет прекращение подачи, так как реле Р1 при этом установится в нейтральном положении. Если ролик тахогенератора отойдет от реборды барабана, разомкнется конечный выключатель В3, что приведет к обесточиванию Р1, а также к прекращению подачи. Воздух от системы пневмопитания подводится через двухклапанный пневмокран к поршню 1 исполнительного механизма (см. рис. 102, а) и к прижимному цилиндру 2 механизма дополнительной обратной связи тахогенератора. При прекращении рейса и переходе к спуско-подъемным операциям двухклапанный кран отключается. При этом прекращается подача воздуха не только к исполнительному механизму, но и к механизму обратной связи, который под действием пружины отходит от тормозного барабана. Этой блокировкой предотвращается повреждение схемы автомата СВМ при большой частоте вращения барабана во время спуско-подъемных операций. Конструкция штока исполнительного механизма СВМ допускает вмешательство бурильщика в его работу в любой момент. Независимо от положения штока исполнительного механизма бурильщик может нажатием на рукоятку тормоза приостановить подачу, что весьма важно в условиях аварийной ситуации. Для сцепления и расцепления исполнительного механизма с тормозной рукояткой необходимо всего лишь несколько секунд.

Существенным недостатком принципа регулирования подачи долота воздействием на тормозную систему лебедки является то, что эта система предназначена для удержания грузов большого веса, спускаемых со скоростью 2—3 м/с. Поэтому

тормозная система не может обеспечить плавную подачу с необходимой скоростью, которая значительно меньше скорости спуска инструмента. Кроме того, изменение температуры окружающей среды, попадание масла и влаги приводят к существенному изменению коэффициента трения между тормозными накладками и шкивами. Опыт показал, что из-за указанных причин барабан лебедки проскальзывает, инструмент срывается и не удается достигнуть необходимого при бурении плавного изменения скорости подачи.

§ 65. Гидравлические устройства подачи долота

В гидравлических УПД вес бурового инструмента воспринимается силовым узлом, в качестве которого в общем случае принимается гидронасос. Расход жидкости такого гидронасоса пропорционален скорости подачи инструмента:

$$Q = vS/k, \quad (11.13)$$

где Q — расход; v — скорость подачи; S — площадь поршня гидроцилиндра; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от сопротивления протеканию жидкости.

Из (11.13) видно, что изменяя расход, можно регулировать скорость подачи бурового инструмента. Расход можно изменять, дросселируя поток жидкости. На этом принципе основано управление скоростью подачи гидравлическими УПД.

Опыт показывает, что гидравлические УПД обладают эффектом самовыравнивания нагрузки при изменении твердости породы. Если увеличивается твердость породы, возрастает нагрузка на долото, что приводит к уменьшению веса инструмента на крюке, а следовательно, и к уменьшению скорости подачи. С уменьшением твердости породы снижается нагрузка на долото, а скорость подачи и скорость бурения соответственно увеличиваются. Одним из первых устройств этого типа является УПД Грицай — Оловянова. Основным узлом устройства является двухцилиндровый гидронасос, связанный с лебедкой буровой установки. Преобразование вращательного движения лебедки в возвратно-поступательное движение поршней осуществляется кривошипно-шатунным механизмом (рис. 103). Цилиндры гидронасоса 1 и 6 установлены на раме под углом 90° друг к другу в вертикальной плоскости. Внутренние полости каждого из цилиндров, разделенные поршнями, соединены трубопроводами 2 и 4 и заполнены маслом. С помощью регулируемого вентиля 3 осуществляется ручная регулировка скорости подачи и соответственно нагрузки на долото. Штоки 7 и 9 поршней соединены с коленчатым валом 8. Шток 9 жестко связан с подшипником коленчатого вала, а шток 7 связан с этим же подшипником шарнирно. Передние крышки цилиндров обращены к коленчатому валу, а задние имеют цапфы 5, посредством которых цилиндры шарнирно связываются с рамой. Ось

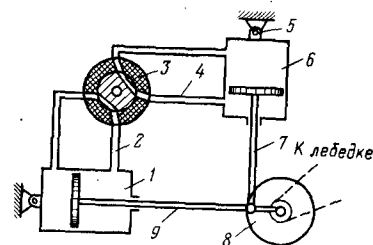


Рис. 103. Схема устройства подачи долота Грицай—Оловянова

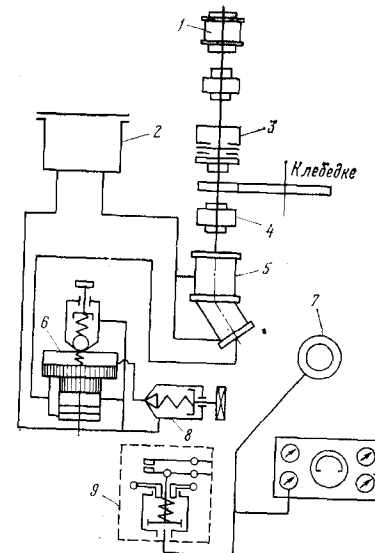


Рис. 104. Схема гидравлического УПД буровой установки БУ-50Бр1

коленчатого вала цепной передачей связана с буровой лебедкой. При вращении коленчатого вала цилиндры качаются на осях цапф 5 и поршни возвратно-поступательно перемещаются внутри цилиндров. Таким образом, момент на валу лебедки, создаваемый весом инструмента, преобразуется в усилие, приложенное к поршням гидроцилиндров. При повороте вентиля 3 буровый вентиль изменяет проходное сечение гидравлической системы одновременно обоих цилиндров, вследствие чего меняется скорость перетока жидкости из одной полости каждого цилиндра в другую. Соответственно изменяется и скорость подачи инструмента. Необходимо изменить скорость подачи инструмента и нагрузку на долото буровый вентиль устанавливает, согласуясь с показаниями индикатора веса. К достоинствам рассматриваемого устройства относится возможность осуществления плавной регулировки скорости подачи в широких пределах. Однако в этом устройстве невозможен подъем инструмента в процессе бурения, скорость подачи неравномерна и зависит от вязкости жидкости в гидросистеме (а следовательно, и от изменения температуры окружающей среды).

МИНХиГП им. И. М. Губкина усовершенствовали УПД Грицай — Оловянова, введя автоматическое управление краном в зависимости от нагрузки бурового двигателя. Дальнейшее усовершенствование гидравлических УПД было сделано С. Б. Годжаевым, который применил автоматическое управление проходным сечением для жидкости, перетекающей из одной полости цилиндра в другую, в функции осевого давления на долото.

На рис. 104 изображена схема гидравлического УПД буровой установки БУ-50Бр1. Пятиплунжерный аксиальный насос 5 типа НПА-64, смонтированный на корпусе редуктора, связан с ведущим валом последнего через муфту 4. Ведомый вал редуктора соединяется через трубчатую передачу с приводным валом лебедки. Малая шестерня этой передачи связана с блокировочным выключателем, который отключает электродвигатели привода лебедки при включении устройства подачи долота. Усиление на крюке, создаваемое весом бурового инструмента, через талевую систему, лебедку и редуктор передается на вал насоса, который нагнетает масло из бака 2 в гидравлическую линию. Давление масла определяется весом бурового инструмента. В гидрوليнии установлен предохранительный клапан 6 с переливным золотником. Управление клапаном осуществляется дистанционно посредством дросселя 8, с помощью которого бурильщик может установить заданную осевую нагрузку. При полностью закрытом дросселе 8 предохранительный клапан не пропускает масло по гидросистеме, насос 5 не вращается и подача инструмента прекращается. При давлении, превышающем максимально допустимое для гидросистемы, предохранительный клапан сработает, несмотря на то что дроссель дистанционного управления будет закрыт. Для осуществления подачи инструмента бурильщик дросселем 8 уменьшает давление в цепи управления клапаном 6. При этом срабатывает переливной золотник клапана 6 и масло перетекает из нагнетательной линии в бак 2. Датчиком нагрузки является сам насос 5, давление на выходе которого пропорционально разности полного веса колонны и нагрузки на долото (без учета трения колонны о стенки скважины и трения в талевой системе и редукторе). Регулирующим элементом является предохранительный клапан с переливным золотником 6.

В состав рассматриваемого УПД кроме гидрорегулятора подачи входит также механизм, предохраняющий колонну бурильных труб от скручивания, принцип действия которого заключается в следующем. Давление, создаваемое в преобразователе 7 крутящим моментом на приводе ротора, передается реле давления 9, которое настраивается по заданному предельному моменту. Если крутящий момент превысит предельное значение, сработает реле давления, которое включит электромагнитную муфту 3. При этом электродвигатель 1 осуществит подъем инструмента, вследствие чего бурильные трубы будут разгружены. Обгонная муфта 4 обеспечивает подъем инструмента без отключения гидравлического регулятора подачи. Настройка механизма осуществляется регулировкой реле давления по показаниям прибора, контролирующего крутящий момент и установленного на контрольном пульте бурильщика.

Достоинством гидравлических УПД является возможность использования в системах серийно изготавливаемых промышленностью стандартных гидравлических узлов (сервоприводы, зо-

лотники, клапаны и др.). Кроме того, гидравлические УПД имеют сравнительно меньшую массу и габариты. Однако необходим тщательный монтаж гидравлических систем для предотвращения от попадания песка в гидросистему при эксплуатации. Для работы с гидросистемами необходимы высококвалифицированные гидромеханики и хорошо оборудованные мастерские.

§ 66. Электромашинные устройства подачи долота

Устройства подачи долота, где в качестве исполнительных двигателей используются электрические машины постоянного и переменного тока, а также электромагнитные муфты, получили наибольшее распространение. Одним из наиболее ранних устройств этого типа является автомат М. М. Скворцова, первая конструкция которого появилась на нефтяных промыслах в 1925 г. В усовершенствованном виде этот автомат начал использоваться в 1929 г. Автомат осуществлял автоматическую подачу долота в функции тока нагрузки бурового двигателя.

В 1938 г. был предложен автоматический регулятор Островского — Ратмана с электродифференциальным редуктором (рис. 105). Коническая шестерня 3 приводится во вращение с постоянной скоростью от асинхронного электродвигателя 1 через цилиндрические шестерни 1 и 9. Коническая шестерня 5 вращается в противоположную сторону от двигателя постоянного тока III через шестерни 8 и 10. Конические шестерни 3 и 5 связаны сателлитами 4, имеющими возможность вращаться в цапфах вала 7. Звездочка 6, соединяемая с валом лебедки цепной передачей, связана через шестерни 2 и 11 с водилом 7. На одном валу с асинхронным двигателем устанавливается генератор постоянного тока II, который питает по системе ГД-двигатель подачи III. Для питания обмоток возбуждения генератора и двигателя, а также схемы управления регулятора имеется отдельный мотор-генератор. Если скорости вращающихся в разные стороны конических шестерен 3 и 5 дифференциального редуктора равны, то водило 7, а вместе с ним и звездочка 6 будут оставаться неподвижными. Чтобы осуществить подачу или подъем инструмента, необходимо изменить в ту или иную сторону частоту и направление вращения двигателя III, что достигается воздействием на цепи возбуждения машин постоянного тока I и III. На базе этого электродифференциального редуктора был создан буровой автоматический регулятор БАР. С помощью БАР можно регулировать подачу долота при бурении роторном, турбинном и электробуром на трубах. В зависимости от способа бурения выбираются датчик, измеряющий регулируемую величину, по постоянству которой осуществляется подача инструмента, а также электрическая схема преобразования сигнала от этого датчика в регулирующее воздействие на обмотки возбуждения системы ГД-регулятора.

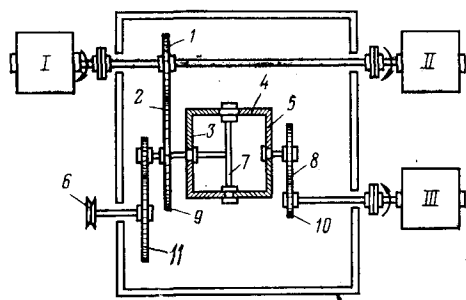


Рис. 105. Кинематическая схема электродифференциального редуктора

Дальнейшее развитие автоматических регуляторов подачи долота пошло по пути замены дифференциального редуктора обычным. Раньше этой возможности не было из-за отсутствия средств автоматики, позволяющих изменять частоту вращения исполнительной машины мотор-генераторного агрегата в широких пределах.

Силовой узел с обычным редуктором имеет следующие преимущества по сравнению с электродифференциальным механизмом:

установленная мощность электрических машин, используемых при обычном редукторе, более чем в 1,5 раза меньше мощности машин в электродифференциальном механизме; данные силовых узлов обычного и дифференциального редукторов, рассчитанные на одинаковые грузоподъемность (200 т) и скорость подачи (57 м/ч), показывают, что суммарная мощность электрических машин мотор-генераторного агрегата составляет 147 кВт для обычного и 230 кВт для дифференциального редукторов;

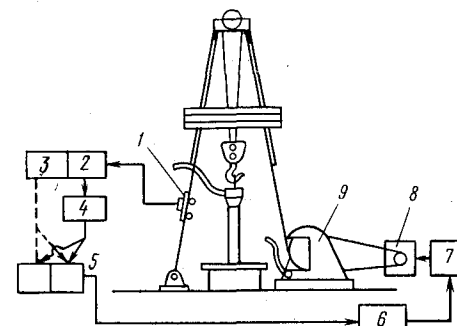
в случае применения обычного редуктора рядом с лебедкой устанавливают один электродвигатель вместо трех в силовом узле с дифференциальным редуктором;

конструкция дифференциального редуктора сложнее конструкции обычного редуктора; следует учитывать, что в силовом узле с дифференциальным редуктором при малых частотах вращения выходного вала через дифференциал протекает полная мощность (при работе с полным моментом), поэтому дифференциальный редуктор изнашивается в большей степени, чем обычный.

К автоматам подачи, в которых приводной двигатель автомата связан с лебедкой через обычный редуктор, относятся:

АВЭ — автоматы веса электрические, обеспечивающие поддержание постоянной нагрузки на долото и при наличии приставки ПЭБ поддержание тока статора электробура; для определения веса инструмента и установки нагрузки на долото применяются бесконтактные сельсины; в качестве усилителей используются фазочувствительный электронный усилитель и электромашинный усилитель ЭМУ;

Рис. 106. Схема регулятора РПДЭ-3



АВТ — автомат веса тока для электробурения;

РПДЭ — автоматические регуляторы подачи электрические различных модификаций и др.

К числу наиболее распространенных относятся автоматические регуляторы типа РПДЭ-3, которые с 1967 г. выпускаются серийно и входят в комплект буровых установок «Уралмаш-125-БД», «Уралмаш-125-БЭ», БУ-80-БрД и БУ-80-БтЭ и др.

РПДЭ-3 обеспечивает поддержание заданного значения осевой нагрузки на долото, поддержание постоянной скорости подъема или подачи инструмента. Установку нагрузки на долото или скорости подачи осуществляет бурильщик с пульта управления.

Упрощенная схема регулятора РПДЭ-3 изображена на рис. 106. Стрелками показаны направления регулирующих воздействий. Регулятор состоит из следующих основных узлов: рессорного датчика веса 1 типа ДВР-26; узла установки веса 2 и скорости 3, находящихся на пульте управления; полупроводникового усилителя 4 (ППУ-1) и магнитных усилителей 5 в станции управления; мотор-генератора 6; силового узла, состоящего из двигателя постоянного тока 7 и редуктора 8; редуктор соединяется через цепную передачу с лебедкой 9.

Регулятор работает следующим образом. В режиме поддержания заданного значения нагрузки на долото с помощью переключателя на пульте управления подается питание на сельсин датчика веса 1 и полупроводниковый усилитель 4 (ППУ-1) и отключается питание уставки скорости 3. Сельсин датчика веса 1 работает в паре с сельсином уставки веса 2. Напряжение с выхода сельсинной пары, которое зависит от угла несогласования сельсинов, поступает на усилитель ППУ-1. Усиленный сигнал подается на магнитные усилители 5 и далее на генератор постоянного тока 6, который управляет частотой вращения двигателя 7 силового узла, а следовательно, и скоростью подачи (или подъема) инструмента. В режиме поддержания заданного значения скорости, подачи или подъема инструмента ППУ-1 и датчик веса не принимают участия и сигнал с сельсина уставки 2 поступает непосредственно на магнитные

усилители 5. Этот режим может применяться для проработки скважины, аварийного подъема инструмента при отказе главного привода, для подъема или опускания вышки при монтаже буровой.

Электрическую схему регулятора РПДЭ-3 (рис. 107) можно разделить на измерительную, усилительную и силовую части. В измерительную часть входят: преобразователь веса ДВР-26, который воздействует на сельсин установки веса СЛ, сельсин установки скорости СЗ, тахогенератор ТГ и прибор для измерения механической скорости бурения. Усилительную часть составляют полупроводниковый фазочувствительный усилитель ППУ-1, трехфазные магнитные усилители 1МУ и 2МУ, генератор постоянного тока ГП и приводной двигатель АДГ. Силовая часть состоит из исполнительного двигателя ДП, редуктора аварийного тормоза с электрогидравлическим толкателем типа ТКТГ и вентилятора с приводным двигателем АДВ. Используемый в схеме регулятора полупроводниковый усилитель ППУ-1 питается переменным напряжением и усиливает сигнал как переменного, так и постоянного тока. В зависимости от фазы и знака входных сигналов выходной ток протекает в разных плечах усилителя, причем он зависит от входного сигнала. От усилителя питаются встречно включенные высокоомные обмотки трехфазных усилителей второго каскада. Сигнал с выхода сельсина-приемника СЛ преобразователя веса подается на обмотку W1 входного трансформатора 1Тр. Конденсатор IC предназначен в схеме для компенсации фазовых сдвигов и улучшения формы напряжения сигнала. На резисторы R1 и R2 поступает сигнал обратной связи по скорости двигателя регулятора, снимаемый с выхода тахогенератора ТГ. Для двухстороннего ограничения входного сигнала в схему включены кремниевые диоды Д1 и Д2. Резистор R5 служит для регулирования коэффициента усиления полупроводникового усилителя ППУ-1, который питается напряжением 8 В от обмотки W2 силового трансформатора 3Тр. Включением в цепь эмиттеров транзисторов Т1 и Т2 небольших сопротивлений R3 и R4 осуществлена обратная связь. Первый каскад ППУ-1 работает в классе АВ. Введение транзисторов в режим класса АВ осуществляется сопротивлениями R6 и R7, через которые на базы триодов поступает сигнал смещения с обмотки W2 трансформатора 3Тр. Диод Д3 служит для уменьшения обратного тока триодов Т1 и Т2, а также для защиты усилителя от обратной полуволны напряжения. Для компенсации фазовых сдвигов используют конденсатор 2С. Сигнал с выхода первого каскада усилителя ППУ-1 поступает на обмотки W1 и W2 согласующего промежуточного трансформатора 2Тр. Второй каскад усилителя ППУ-1 выполнен на триодах типа П214 и является двухполупериодным фазочувствительным каскадом с дифференциальной нагрузкой. Он питается от обмоток W3, W3', W4, W4' трансформатора 3Тр. Транзисторы работают в режиме класса В. В эмит-

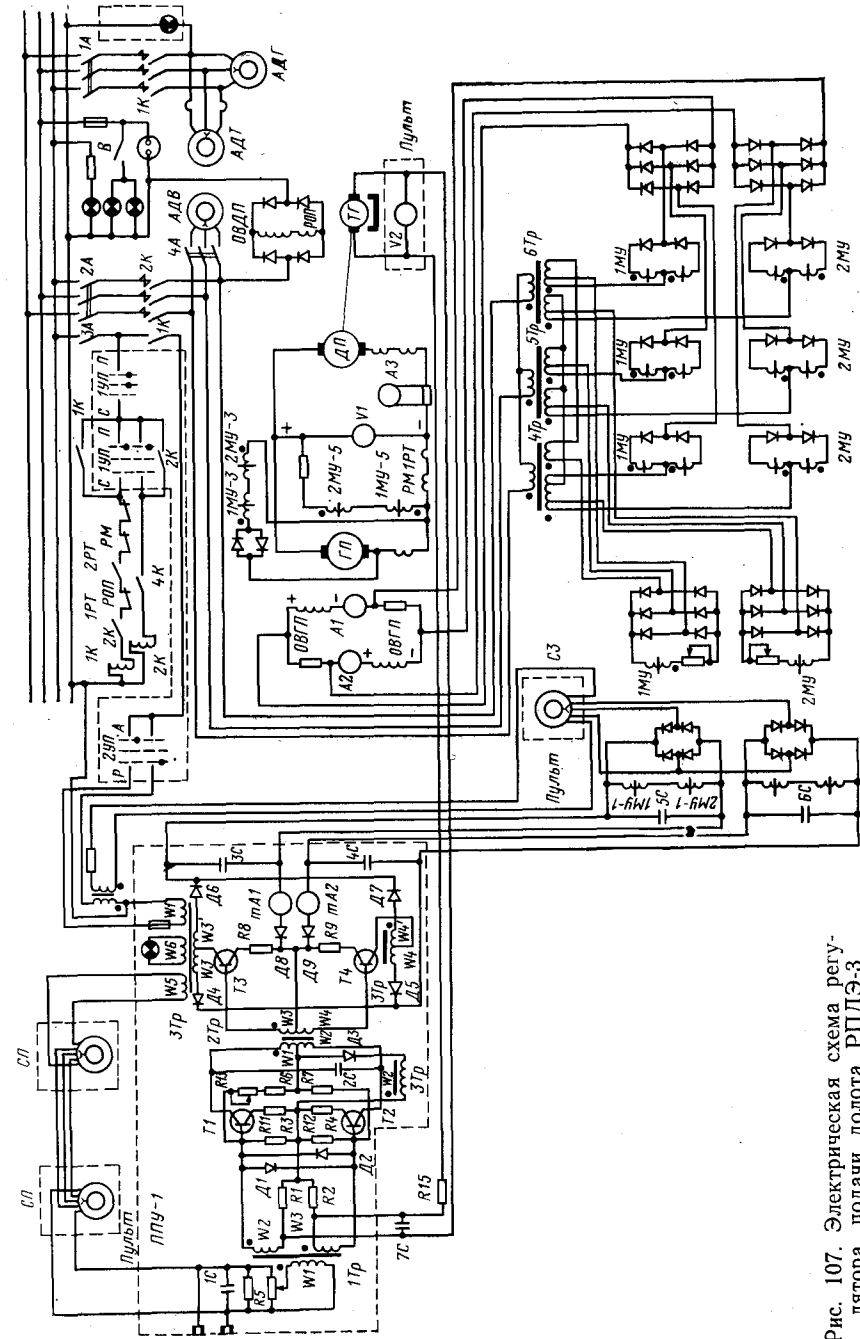


Рис. 107. Электрическая схема регулятора подачи долота РПДЭ-3

терные цепи триодов $T3$ и $T4$ включены низкоомные сопротивления $R8$ и $R9$ для обеспечения отрицательной обратной связи и температурной стабилизации. В соответствии с направлением вектора э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора в различные полупериоды будут открыты триоды $T3$ и $T4$. При этом ток потечет соответственно через обмотки управления трехфазных магнитных усилителей $1МУ-1$, $2МУ-1$, включенные встречно, полуобмотку трансформатора $3Tr$, диод $D6$ или через обмотку $2МУ-1$, $1МУ-1$, полуобмотку трансформатора $3Tr$ и диод $D7$. Таким образом, через обмотки управления $1МУ-1$ и $2МУ-1$ протекает ток в течение обоих полупериодов. Изменение фазы выходного напряжения трансформатора $2Tr$ на 180° относительно напряжения питания приводит к тому, что в течение обоих полупериодов ток будет протекать уже через обмотки управления $1МУ-1$, $2МУ-2$. Параллельно обмоткам управления подключены конденсаторы $5C$, $6C$ для уменьшения пульсации выпрямленного тока. Выбор режима подачи инструмента осуществляется с помощью переключателя $2УП$. Для автоматического режима включается усилитель $ППУ-1$. По шкале нагрузок поворотом рукоятки сельсина-приемника устанавливают требуемую нагрузку на долото. Заданное значение поддерживают регулятором с отклонениями ± 10 кН. Чтобы улучшить статические и динамические характеристики системы, предусмотрены обратные связи. В режиме автоматического управления действуют обратная связь по скорости с тахогенератором $ТГ$, жесткая отрицательная обратная связь по напряжению генератора и отсечка по току, включенная на падение напряжения дополнительных полюсов машин. В режиме ручного управления отключается усилитель $ППУ-1$ и сигнал с выхода задающего сельсина подается непосредственно на обмотки магнитных усилителей. Скорость регулятора устанавливают поворотом той же рукоятки, что и в автоматическом режиме. В режиме ручного управления производятся также аварийный подъем инструмента и бурение при малых нагрузках в начале долбления.

Пуск и защита регулятора осуществляются в следующем порядке. Автоматическими включателями $1А$, $2А$, $3А$, $4А$ и универсальным $1УП$ осуществляется включение регулятора. Переключатель $1УП$ замыкает цепь питания контактора $2К$, который срабатывает и самоблокируется блок-контактом $2К$, подключает напряжение возбуждения к обмотке $ОВГП$ двигателя $ДП$. При этом срабатывает реле обрыва $РОП$ и замыкает цепь питания катушки контактора $1К$, которая также блокируется контактом $1К$. Контакт $1К$ включает двигатель привода генератора $АДГ$ и электрогидравлического толкателя $АДТ$. Одновременно подается питание на усилитель $ППУ-1$ или сельсин $СЗ$. Если переключатель $2УП$ находится в нейтральном положении, то питание на $ППУ-1$ и на $СЗ$ не подается и система работает в режиме динамического торможения. В схеме регу-

лятора предусмотрены три вида защиты генератора $ГП$ и двигателя $ДП$: от коротких замыканий с помощью реле максимального тока $РМ$, от длительной перегрузки с помощью реле $1РТ$, от перегрузок в переходных режимах. Применение регулятора подачи долота РПДЭ-3 позволяет увеличить механическую скорость бурения на 10—15 % и проходку на 6—10 %.

В автоматическом регуляторе подачи долота РПДЭ-6 вместо электропривода по системе «генератор-двигатель» применен электропривод по системе «тиристорный преобразователь-двигатель», который обладает высоким быстродействием, повышенным к. п. д., имеет меньшую массу и габариты и более экономичен вследствие уменьшения числа электрических машин на буровой. Регулятор обеспечивает все необходимые режимы работы и позволяет в широких пределах изменять частоту вращения двигателя. Для буровых установок грузоподъемностью 125 т и выше целесообразно использовать электропривод с нереверсивным тиристорным преобразователем, обеспечивающим работу как при подъеме инструмента (выпрямительный режим преобразователя), так и при спуске (инверторный режим преобразователя). Регулятор (рис. 108) состоит из блока преобразователей, включающих преобразователь веса $СПр$, сельсин установки нагрузки $СП$, сельсин установки скорости $СЗ$, фазочувствительный блок $БФЧ$, тахогенератор и силовой блок, включающий двигатель $ДП$, редуктор, аварийный тормоз с электрогидравлическим толкателем, имеющим приводной двигатель $АДТ$ и вентилятор с приводным двигателем $АДВ$. Двигатель $ДП$ питается от тиристорного преобразователя $ПМ$. Силовая часть этого преобразователя питается через анодные реакторы от сети трехфазного переменного тока напряжением 380 или 220 В. Преобразователь обеспечивает возможность регулирования этого напряжения. Схема тиристорного преобразователя выполнена в виде непрерывного трехфазного моста, состоящего из шести управляемых выпрямителей типа ВКДУ-150-9. Последовательно с каждым тиристором включены быстродействующие предохранители типа ПНБ-2, которые защищают его от перегрузок, возникающих при внутренних коротких замыканиях. Блок-контакты предохранителей подключены к блоку световой сигнализации $БС$, который служит для замыкания цепей предупредительной сигнализации при сгорании одного предохранителя в плече моста преобразователя и для замыкания цепей аварийного отключения преобразователей. Предусмотрена защита тиристоров от коммутационных перенапряжений, возникающих при переходе из открытого состояния к закрытому. Эта защита обеспечивается цепочками $РС$, а защита от перенапряжений, возникающих в силовой цепи со стороны переменного тока, — емкостью, включенной на напряжение сети через выпрямитель, собранный по трехфазной мостовой схеме в блоке разрядника перенапряжений $РП$. Для защиты тиристорного преобразователя

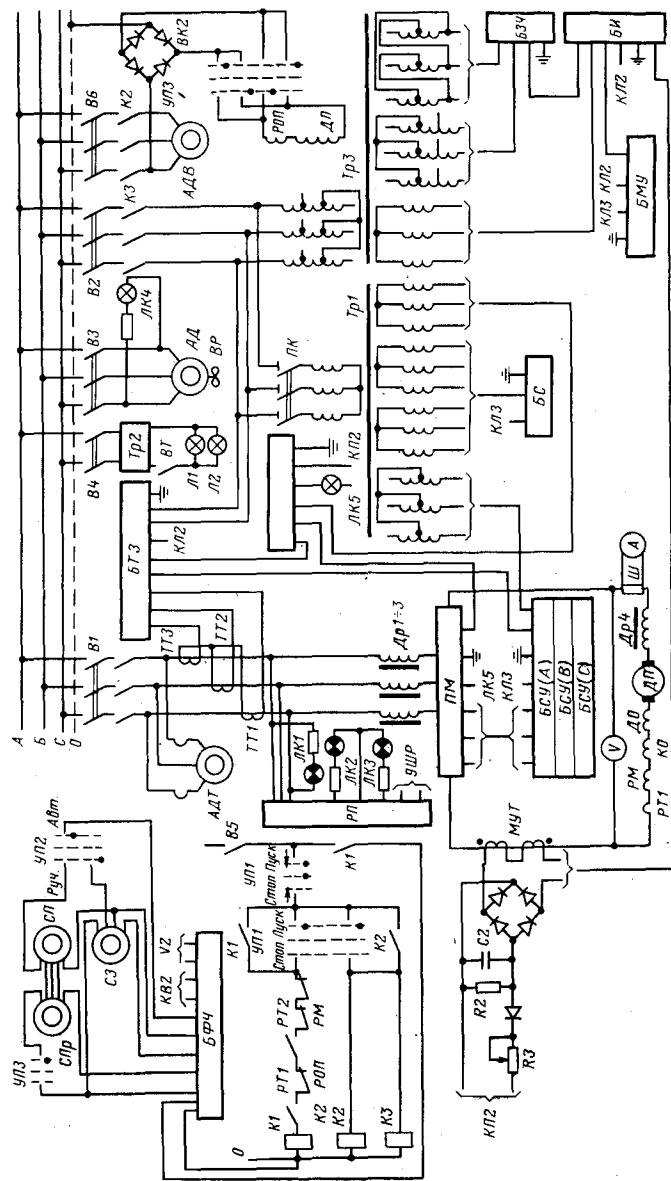


Рис. 108. Схема регулятора подачи долота РПДЭ-6

от токовых перегрузок путем снятия управляющих импульсов и отключения автоматического выключателя используют блок токовой защиты *БТЗ*, который осуществляет также сигнализацию аварийного отключения. Блок токовой защиты предназначен для выявления аварийных режимов работы тиристорных преобразователей, ограничения токов перегрузки и ликвидации дальнейшего развития аварии. Состоит устройство защиты из преобразователя тока, блока управления и автоматического выключателя. Когда в тиристорном преобразователе возникают аварийные режимы, вызывающие возрастание тока выше допустимого, преобразователь тока выдает пропорциональный току сигнал в блок управления и защиты. Преобразователь тока, выполненный в виде трех проходных трансформаторов тока типа ТК-120, соединенных звездой, устанавливают со стороны напряжения питания преобразователя. При срабатывании защиты загорается красная лампа.

Блок магнитного усилителя *БМУ*, получающий питание от статического преобразователя частоты, состоящего из блока задатчика частоты *БЗЧ* и блока инвертора *БИ*, предназначен для управления блоком системы управления и суммирования управляющих сигналов системы регулирования. Он представляет собой комплексное устройство, состоящее из серийного двухтактного магнитного усилителя БДК.11.01, охваченного жесткой отрицательной обратной связью по напряжению, которая обеспечивает большую линейность и стабильность выходной характеристики управления *БМУ* при колебаниях напряжения питающей сети и температуры окружающего воздуха. К выходу *БМУ* подключен фазорегулятор системы управления. Блок задатчика частоты служит для формирования импульсов, управляющих тиристорами блока инвертора. Блок смещения *БС* предназначен для получения сигнала смещения, с помощью которого производят точную фазировку управляющих импульсов с напряжением сети. Сигнал смещения поступает на фазорегулятор. Кроме того, в блоке смещения установлены источники стабилизированного и нестабилизированного напряжений постоянного тока, которые используются для питания обмоток магнитных усилителей блоков системы управления *БСУ(A)*, *БСУ(B)*, *БСУ(C)*, соединенных по трехфазной схеме. *БСУ* состоит из трехфазного индуктивно-емкостного фазорегулятора, обеспечивающего регулирование выходного напряжения по фазе, и устройства усиления и формирования прямоугольных отпирающих импульсов, выполненного на транзисторах КТ 802А. Блок фазочувствительного узла применяют в качестве задающего устройства для регулирования скорости.

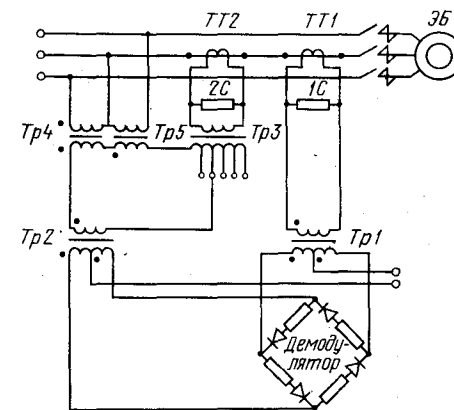
Регулятор подачи включается автоматическими выключателями *В1—В6* и переключателем *УП1*. Переключатель *УП1* замыкает цепь питания катушки контактора *К2*, который самоблокируется блок-контактом *К2*. Включается в работу также двигатель вентилятора *АДВ*, служащий для обдува двигателя

ДП. При этом срабатывает реле обрыва поля РОП и замыкает цепь питания катушки контактора К1, которая блокируется блок-контактом К1. Контакт К1 подключает питание к тиристорному преобразователю ПМ и двигателю аварийного тормоза АДТ. Через блок-контакт К1 подается питание также на фазочувствительный блок БФЧ. При работе регулятора в режиме поддержания заданного значения нагрузки на долото универсальный переключатель УП2 устанавливают в положение «автомат». В результате этого переключается напряжение питания к сельсину СП, работающему в паре с сельсином уставки веса СПр. В зависимости от угла рассогласования сельсинов изменяется напряжение на выходе сельсинной пары, которое поступает на вход фазочувствительного блока БФЧ. Если долото не касается забоя скважины, то натяжение неподвижного конца каната соответствует весу бурильной колонны и ротор сельсина СП, связанный с преобразователем веса, поворачивается на некоторый угол относительно нулевого положения. При «взвешивании» инструмента ротор сельсина СПр устанавливают в согласованное положение с ротором сельсина СП путем поворота рукоятки на пульте. В таком положении двух роторов сельсинов напряжение на выходе сельсинной пары СП—СПр равно нулю. Затем с помощью рукоятки задатчика, связанной с сельсином уставки веса СПр, выбирается значение нагрузки на долото. При этом на выходе сельсинной пары СП—СПр появляется сигнал, поступающий на вход фазочувствительного блока. Далее он поступает в блок магнитных усилителей преобразователя и в систему управления тиристорами, вследствие чего тиристоры открываются и двигатель ДП начинает опускать колонну.

В момент соприкосновения долота с забоем осевая нагрузка на долото увеличивается, а сила веса инструмента на крюке уменьшается. При этом ротор сельсина СП начинает поворачиваться в сторону уменьшения рассогласования сельсинной пары СП—СПр и сигнал, поступающий на вход БФЧ, уменьшается. Соответственно уменьшаются частота вращения двигателя и скорость подачи инструмента. Если долото попадает в мягкую породу, то регулятор обеспечивает увеличение скорости подачи инструмента. В режиме поддержания заданного значения скорости подачи или подъема инструмента универсальный переключатель УП2 переводят в положение «Ручное управление». При этом от задающего сельсина СЗ сигнал подается на вход БФЧ. Поворотом рукоятки, связывающей кинетически сельсина СПр и СЗ между собой, устанавливается требуемое значение скорости движения инструмента.

В схеме регулятора предусмотрены автоматические защиты: двигателя ДП от дополнительных перегрузок, осуществляемая с помощью теплового реле РТ1, размыкающего цепь контактора К1; главной цепи от перегрузок и токов короткого замыкания с помощью реле максимального тока РМ, также

Рис. 109. Схема преобразователя тока регулятора АВТ-2



воздействующего на цепь контактора К1; двигателя тормоза АДТ с помощью тепловых реле РТ2, отключающих контактор К1; тепловая и максимальная защита цепей управления, создаваемая автоматическими выключателями.

Регулятор подачи долота АВТ-2 представляет собой регулятор РПДЭ-3 с приставкой ПЭБ и специальным пультом управления. Регулятор предназначен для работы при бурении скважин электробуром и обеспечивает поддержание заданного значения активной составляющей тока двигателя электробура с ограничением нагрузки на долото; поддержание заданного значения осевой нагрузки на долото (силы веса на крюке) с ограничением активной составляющей тока двигателя электробура; поддержание заданного значения скорости подачи или подъема инструмента.

В режиме бурения по активной составляющей тока и осевой нагрузке на долото можно устанавливать два заданных значения уставки — активного тока электробура и осевой нагрузки на долото. Однако, при этом будет поддерживаться только один из параметров, близкий к заданному: в энергоемких породах — активная составляющая тока, а в неэнергоемких — осевая нагрузка на долото. На рис. 109 изображена схема преобразователя тока, используемая в регуляторе АВТ-2 в качестве параметра регулирования активной составляющей тока двигателя электробура ЭБ. Активную составляющую тока измеряют двухполупериодным кольцевым демодулятором, выполненном на диодах. Фазное напряжение средней фазы системы питания электробура, снимаемое с зажимов трансформаторов Tr4 и Tr5, используется как опорное напряжение. В качестве напряжения сигнала демодулятора используется напряжение, пропорциональное току средней фазы, снимаемое с сопротивления нагрузки IC трансформатора тока ТТ1. Это напряжение вводят в демодулятор с помощью трансформатора Tr1. Потери напряжения в токопроводе электробура, пропор-

циональные фазному току, активно учитываются в преобразователе активного тока, где они выделяются на сопротивлении нагрузки $2C$ трансформатора тока $ТТ2$ и через трансформатор $Тр3$ вычитаются из анодного напряжения. Таким образом, с помощью преобразователя активного тока измеряют величину произведения тока фазы на коэффициент мощности. Сигнал в виде постоянного напряжения, снимаемого со средних точек вторичной обмотки трансформаторов $Тр1$ и $Тр2$, подается на вход промежуточного полупроводникового усилителя (ППУ). Выходное напряжение этого усилителя поступает на вход усилителя ППУ-1 автоматического регулятора РПДЭ-3. Описанная схема в совокупности со схемой регулятора РПДЭ-3 является регулятором АВТ-2. Применение регулятора АВТ-2 при электробурении увеличивает механическую скорость бурения вследствие лучшего использования мощности двигателя электробура на забое, а также значительно сокращает возможное число «опрокидываний» двигателя по сравнению с подачей долота вручную. Точность ограничения заданного значения активной составляющей тока около 10 %, а осевая нагрузка на долото — около 20 кН. Регулятор обеспечивает устойчивую работу системы при различных удельных моментах, состоянии долота и коэффициентах усиления.

§ 67. Забойные устройства подачи долота

Роторное бурение на больших глубинах (3000—5000 м) с помощью наземных автоматических устройств подачи долота малоэффективно из-за сил трения бурильной колонны о стенки скважин, значительно искажающих измеряемые на поверхности величины осевых нагрузок на долото. При турбинном бурении силы трения колонны труб о стенки скважины увеличиваются, потому что колонна труб неподвижна. Кроме того, на устойчивую работу турбобура влияют кратковременные изменения нагрузочного момента. С увеличением глубины может возникнуть неустойчивый режим работы турбобура. Этот режим работы может наступить в зоне малых частот вращения. В результате на практике бурильщики во избежание остановок турбобура работают при малых нагрузках и больших частотах вращения, из-за чего ухудшаются показатели бурения.

Одним из решений задачи по управлению забойным двигателем-турбобуром может быть создание быстродействующих наземных устройств, работающих по сигналам от датчиков, расположенных на забое. Однако создание УПД подобного типа требует надежных забойных датчиков, а также исполнительных механизмов УПД больших установленных мощностей и надежных каналов связи. Кроме того, при увеличении глубин время на передачу информации (о значении осевой нагрузки или частоты вращения турбобура) с забоя на поверхность и команды в обратном направлении достигает несколь-

ких секунд. В течение этого времени условия работы долота могут измениться настолько, что потребуются команды обратной той, что была передана. Более эффективным решением проблемы автоматизации глубокого бурения может быть перенос регулирующего и исполнительного механизмов непосредственно на забой, где УПД могло бы перерабатывать на месте всю полученную в процессе бурения информацию и вырабатывать команды управления исполнительному механизму. Такие УПД должны обеспечить регулирование параметров режима бурения и сделать его мало зависящим от сил трения.

Применение устройств автоматического управления подачей долота на забой в глубинном исполнении позволит использовать истинные значения забойных параметров и параметров, соответствующих максимальной мощности забойного двигателя. Характерной конструктивной особенностью большинства забойных УПД является их телескопическое исполнение, т. е. исполнение с расчленением низа колонны бурильных труб. В телескопе одна часть устройства соединена с колонной труб, а другая — с турбобуром или с породоразрушающим инструментом (при роторном бурении). Расчленение низа и позволяет создавать осевые нагрузки на долото независимо от сил трения колонны о стенки скважины.

Исполнительный механизм забойных УПД должен преодолевать силу, создаваемую не всем весом бурильной колонны, а только ее частью — нагрузкой на долото. Поэтому мощность этих УПД (при одинаковых скоростях подачи) может быть меньше мощности наземных устройств, исполнительные механизмы которых должны быть рассчитаны на полный вес колонны, а реверсивные исполнительные механизмы их — на подъем всей колонны.

Следует отметить два основных направления разработки забойных УПД:

УПД с использованием промывочной жидкости в качестве рабочего агента, в котором все измерительные, регулирующие и исполнительные механизмы работают на буровом растворе;

УПД автономного типа, все механизмы которых изолированы от воздействия бурового раствора и работают на рабочем агенте — масле.

Кроме того, имеются УПД, управляющие расходом промывочной жидкости, проходящей через забойный двигатель, и УПД с фиксацией нижней части колонны бурильных труб о стенки скважины.

На рис. 110 изображена схема УПД, в котором в качестве рабочего агента используется промывочная жидкость. Она состоит из соединенного с колонной бурильных труб корпуса 1 и поршня 2 с полым квадратным штоком 3, на который навинчивается утяжеленный низ колонны с долотом. Уплотнение поршня 2 изготовлено из кожи и прижимается к внутренней поверхности цилиндра с помощью стальных пружин. Устрой-

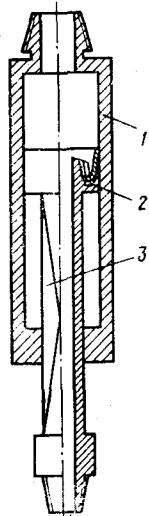
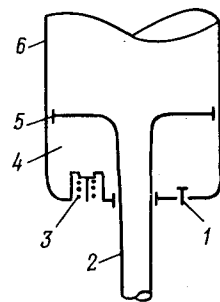


Рис. 110. Забойное устройство подачи долота

Рис. 111. УПД с регулирующим клапаном



ство предназначалось для борьбы с искривлением скважин, что достигалось ограничением осевой нагрузки на долото, создаваемой весом соединенного с ним утяжеленного низа и гидравлическим усилием, действующим на поршень от перепада давления на долото.

К забойным полуавтоматам подачи долота принадлежат УПД, поддерживающие постоянство какого-либо параметра режима бурения. В качестве такого параметра регулирования приняты частота вращения турбобура или нагрузочный момент на долоте. Исполнительным механизмом забойных полуавтоматов является работающий на промывочной жидкости сервоцилиндр, корпус которого связан с колонной труб.

На рис. 111 изображена схема УПД, автоматически поддерживающего постоянство осевой нагрузки. Корпус сервоцилиндра 6 жестко связан с бурильной колонной, а поршень 5 через шток 2 — с турбобуром. Сверху на поршень 5 постоянно действует гидравлический перепад давления на турбобуре и долоте. Перемещаясь вниз во время бурения, поршень 5 вытесняет жидкость из подпоршневой полости 4 через клапан 3, на котором за счет дросселирования возникает постоянный перепад давления. Этот перепад давления действует на поршень 5 снизу, осуществляя его торможение, вследствие чего регулируется осевая нагрузка на долото. Осевая нагрузка G равна разности между суммой гидравлического усилия, действующего сверху на поршень 5 (произведение перепада давления на турбине p_t и долоте p_d на площадь поршня S_p), и веса турбобура G_t и гидравлического усилия, действующего на поршень снизу (произведение перепада давления p_k на клапане 3 на активную площадь поршня в полости 4):

$$G = (p_t + p_d) S_p + G_t - p_k S_p.$$

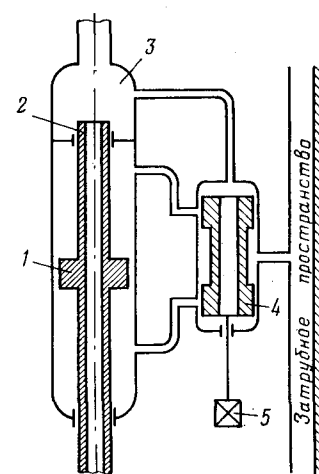


Рис. 112. Полуавтомат подачи

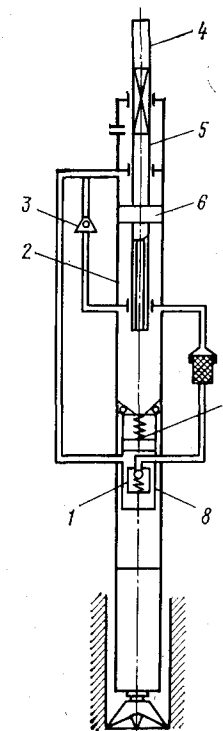


Рис. 113. Схема УПД с использованием масла в качестве рабочего агента

Регулирующий клапан 3 настраивается на заданную величину. Для перезарядки сервоцилиндра предусмотрен обратный клапан 1.

В изображенном на рис. 112 УПД полый шток 2 соединен с турбобуром. Действие полного перепада давления на турбобуре и долоте в зоне 3 на сечение штока 2 создает постоянную слагающую осевой нагрузки на долото. К ней может прибавляться или вычитаться усилие от гидравлического давления на кольцевое сечение поршня 1. Это давление изменяется в зависимости от положения золотника 4, управление которым осуществляется датчиком 5, действующим в функции выбранного параметра регулирования. Для реверса подачи инструмента при перегрузках необходимо, чтобы гидравлическое усилие на поршень 1 превосходило суммарную величину веса турбобура и гидравлической силы, действующей на торец штока 2. В качестве датчика в забойных УПД используются работающие в среде промывочной жидкости пружинный моментомер, центробежный регулятор скорости и гидравлический регулятор, состоящий из золотника с разновеликими поясками и возвратной пружины. В зависимости от применяемого датчика регулирование турбобура может осуществляться по постоянству вращающего момента на долоте или по постоянству вращения турбобура.

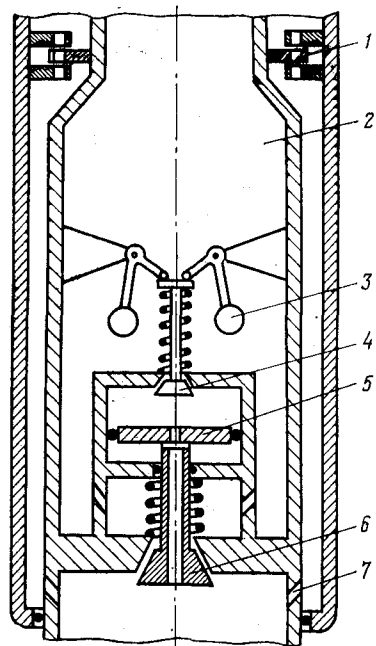


Рис. 114. Схема УПД с регулированием потока промывочной жидкости

бурильной колонны должна быть больше, чем скорость бурения, и осевая нагрузка на долото будет поддерживаться примерно постоянной, равной произведению заданного давления на площадь поршня. Осевая нагрузка регулируется путем настройки клапана 1. После окончания рабочего хода сервоцилиндра (увеличение нагрузки сверх заданной по ГИВ) с помощью буровой лебедки осуществляется его перезарядка — подъем колонны труб на длину рабочего перемещения поршня 6. При перезарядке жидкость из полости над поршнем поступает в полость под поршнем через обратный клапан 3. Применение в схеме лубрикатора 7 позволяет создать в гидросистеме УПД избыточное давление 0,15—0,2 МПа и компенсировать утечки через уплотнения штоков. Полость лубрикатора соединена с полостью над поршнем сервоцилиндра 2. Механизм управления регулировочным клапаном 1 для удобства перестройки выведен на наружную поверхность корпуса УПД. Клапан 1 может быть размещен на поршне.

На рис. 114 изображено устройство автоматического управления потоком промывочной жидкости, работающее в функции частоты вращения турбобура. Регулирование осуществляется при помощи центробежного регулятора, установленного в полости турбинного вала. При изменении частоты вращения тур-

На рис. 113 изображена схема УПД, в котором в качестве рабочего агента используется масло. Устройство осуществляет подачу инструмента с постоянной осевой нагрузкой. Шток 5 сервоцилиндра УПД соединен с колонной бурильных труб 4, а корпус 2 — с турбобуром. Верхний конец колонны бурильных труб непрерывно опускается с постоянной скоростью (вручную или автоматически). При движении колонны в полости под поршнем 6 начинает расти давление p и одновременно увеличивается нагрузка на долото. Когда давление под поршнем достигает заданной величины $p = p_{\text{з}}$, размещенный в контейнере 8 регулировочный клапан 1, настроенный на эту величину, начнет перепускать избыточную жидкость в полость над поршнем. Масло, поступающее к клапану 1, очищается в фильтре. Скорость подачи верхнего конца

бобура центробежный регулятор 3 действует на вспомогательный клапан 4, который соединяет рабочую полость усилительного цилиндра с полостью высокого давления 2. Поршень 5 приводит в действие главный клапан 6, при помощи которого часть потока промывочной жидкости помимо рабочих лопаток 1 турбины перепускается непосредственно в зону низкого давления 7. При уменьшении частоты вращения турбобура клапан 6 закрывается, за счет чего при общем постоянном расходе наземного бурового насоса увеличивается расход через турбину, что приводит к увеличению момента и частоты вращения долота. В результате перепад давления на турбобуре будет увеличиваться, а при наличии сервопривода возрастает осевая нагрузка на долото. Если частота вращения турбобура по сравнению с заданной будет увеличиваться, клапан 6 открывается, за счет чего увеличивается расход промывочной жидкости через него. Соответственно уменьшается расход через турбину, что приводит к снижению момента и частоты вращения долота.

§ 68. Принципы оптимального автоматического управления процессом бурения

В отличие от УПД, поддерживающих на заданном уровне режим бурения, установленный бурильщиком в соответствии с геолого-техническим нарядом, регуляторы оптимального управления должны сами выбирать оптимальный режим по установленному критерию в функции быстро изменяющихся условий бурения. Задача оптимального управления процессом бурения сводится к построению системы экстремального регулирования. Качество оптимального регулирования зависит от того, какой критерий оптимума положен в основу схемы устройства экстремального регулятора. Наиболее простым критерием относительно его технической реализации при турбинном бурении, применимым до глубин 2000—2500 м, является максимум механической скорости бурения. Исследования показывают, что оптимальное значение осевой нагрузки на долото, т. е. максимумы на кривых мощности в функции частоты вращения $N = f(n)$ и скорости бурения в зависимости от осевых нагрузок на долото $v_6 = f(G_{\text{д}})$ очень близки или совпадают. В этом можно убедиться, исходя из следующих соображений. Механическая характеристика турбобура при постоянном расходе промывочной жидкости будет

$$n = n_{\text{х.х}} (1 - M/M_{\text{т}}), \quad (11.14)$$

где n — частота вращения турбобура; $n_{\text{х.х}}$ — частота вращения турбобура на холостом ходу; M — момент на валу турбобура; $M_{\text{т}}$ — тормозной момент.

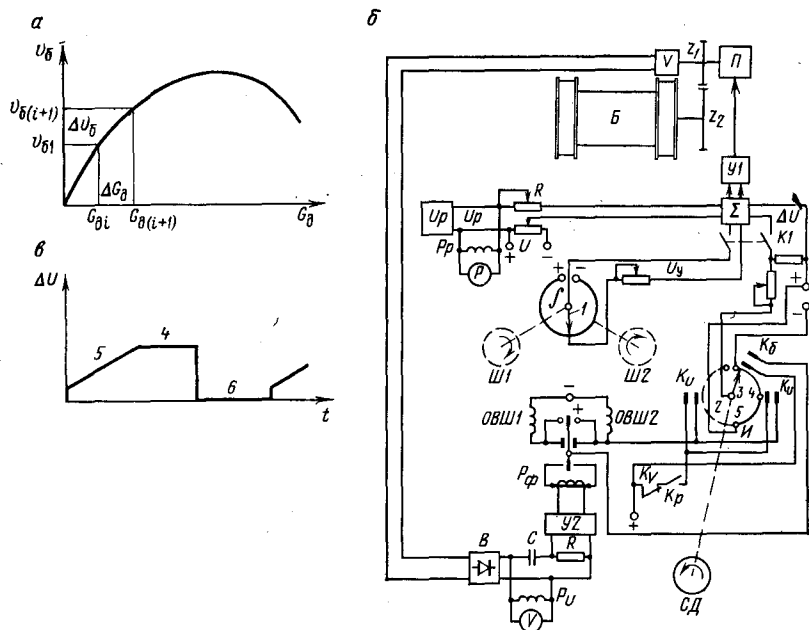


Рис. 115. Схема экстремального регулятора подачи и графики, поясняющие его работу

Момент M можно связать с нагрузкой на долото G_d через удельный момент M_y , постоянный для данной породы и степени износа долота:

$$M = M_y G_d \quad (11.15)$$

Для шарошечных долот скорость бурения v_6 можно выразить через осевую нагрузку G_d и частоту вращения n :

$$v_6 = k_1 G_d^\beta n^\alpha \quad (11.16)$$

где $\beta \approx 1$. Величина α изменяется от 0,25 до 1 в зависимости от твердости породы. Принимая $\alpha = 1$, получаем

$$v_6 \approx k_1 G_d n \quad (11.17)$$

где k_1 — заданный коэффициент.

Подставляя (11.14) и (11.15) в (11.17), получаем

$$v_6 = k_2 G_d - k_3 G_d^2 \quad (11.18)$$

$$k_2 = n_x \cdot k_1 \quad (11.19)$$

$$k_3 = n_x \cdot k_1 M_y / M_T \quad (11.20)$$

Из уравнения (11.18) следует, что зависимость $v_6 = f(G_d)$ имеет экстремум, который смещается при изменении крепости

породы, или при износе долота, т. е. при изменении удельного момента M_y .

Поиск экстремума изображен на рис. 115, а. Вводится пробный импульс $\Delta G_d = G_{d(i+1)} - G_{di}$, увеличивающий нагрузку на долото, и по окончании переходного процесса измеряется величина $\Delta v = v_{6(i+1)} - v_{6i}$. При $\Delta v_6 > 0$ рабочий импульс ΔG_{d2} увеличивает нагрузку на долото, и, наоборот, при $\Delta v_6 < 0$ нагрузка уменьшается.

Если знак пробного импульса не меняется, т. е. всегда $\Delta G_{di} > 0$, то можно определить знак производной dv_6/dG_d только по знаку производной dv_6/dt .

Принципиальная схема экстремального устройства изображена на рис. 115, б. Подающее устройство Π через передачу z_1 и z_2 связано с валом барабана буровой лебедки B . Управление подающим устройством осуществляется через усилитель $U1$, на вход которого поступает сигнал от сумматора Σ . На сумматор поступают сигналы: равный разности напряжения U_p , пропорционального весу инструмента и напряжения уставки U_a ; напряжения ΔU , соответствующего пробному импульсу ΔG_{d1} ; напряжения U_y соответствующего рабочему импульсу ΔG_{d2} . Программу работы устройства задает импульсатор I , приводимый в движение синхронным двигателем CD через редуктор. Подвижной контакт 3 импульсатора последовательно проходит зону сплошного контакта 4, зону сопротивления 5 и изолированный участок 2. При прохождении участков 4 и 5 на сумматор подается пробный импульс ΔU , форма которого изображена на рис. 115, в. С подающим устройством Π кинематически связан тахогенератор V переменного тока. Сигнал, поступающий с тахогенератора, выпрямляется выпрямителем B , дифференцируется цепочкой RC и подается на усилитель $U2$. Нагрузкой усилителя является поляризованное реле P_ϕ , контакты которого подключают напряжение на обмотку шагового двигателя $Ш1$ либо $Ш2$. Двигатель $Ш1$ вращает по часовой стрелке движок 1 интегрирующего потенциометра \int (рабочий импульс U_y имеет полярность, соответствующую увеличению нагрузок на долото), а двигатель $Ш2$ вращает по часовой стрелке корпус потенциометра (U_y имеет полярность, соответствующую уменьшению нагрузки на долото). Во время прохождения подвижным контактом 3 импульсатора участка 5 включаются контакты K_6 и замеряется производная dv_n/dt . Если $dv_n/dt > 0$, то к источнику напряжения через блок-контакт K_6 подключается обмотка двигателя $Ш2$. Во время остановки турбобура скорость бурения становится равной нулю. В этом случае срабатывает реле P_V (обесточивается) и контакты K_U замыкаются. Реле P_p настроено на минимальную нагрузку на долото. Поэтому блок-контакты K_p также замкнуты и обмотка двигателя $Ш2$ периодически через контакты K_U подключается к источнику напряжения. При этом нагрузка на долото уменьшается.

Реализация принципов экстремального регулирования режима бурения была осуществлена институтом Гипронефтемаш (1951, 1953, 1957 гг.) и Львовским политехническим институтом. Схемой экстремального регулятора Гипронефтемаша предусмотрен следующий принцип работы: в установившемся режиме измеряется скорость бурения v_{6i} ; подается импульс $\Delta G_{дi}$ любого знака (знак $\Delta G_{дi}$ запоминается); по окончании переходного процесса измеряется скорость бурения $v_{6(i+1)}$; оценивается знак $\Delta V_6 = V_{6(i+1)} - V_{6i}$; вводится следующий импульс $\Delta G_{д2}$ таким образом, что если $\Delta v_6 > 0$ и $\Delta G_{д1} > 0$, то $\Delta G_{д2} > 0$, если $\Delta v_6 < 0$ и $\Delta G_{д1} > 0$, то $\Delta G_{д2} < 0$, если $\Delta v_6 > 0$ и $\Delta G_{д1} < 0$, то $\Delta G_{д2} < 0$, если $\Delta v_6 < 0$ и $\Delta G_{д1} < 0$, то $\Delta G_{д2} > 0$. В регуляторе осуществлялся автоматический выход на режим $dv_6/dG_{д} = \delta$, где $\delta \geq 0$. Автоматический оптимизатор подачи долота (АОПД) для турбинного бурения Львовского политехнического института представляет собой вычислительное устройство, действующее автоматически по заданной программе, осуществляющее поиск и непрерывную коррекцию оптимальной нагрузки на долото и передающее это значение в виде управляющего воздействия на исполнительный автомат подачи, в качестве которого может быть применен серийный регулятор РПДЭ-3.

Работа устройства протекает в следующем порядке. Вначале оно включается на поиск и определяет критическую нагрузку на долото $G_{д.к.}$, при которой скорость проходки наибольшая, запоминает это значение и задает его автоматическому регулятору подачи, работающему по постоянству осевой нагрузки на долото. В дальнейшем включается в работу штанговый корректор оптимума, который через определенные промежутки времени проверяет отклонение механической скорости бурения за последующий промежуток времени от предыдущего, и в случае, если это отклонение выходит из заданной зоны, производит коррекцию в сторону увеличения или уменьшения нагрузки на долото в зависимости от знака этого отклонения. Электрическая схема рассмотренных регуляторов работает от наземных датчиков. Из-за помех от сил трения бурильной колонны о стенки скважины этот автомат, также как и экстремальный регулятор Гипронефтемаша, применяют на глубине до 2500 м.

ГЛАВА 12.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОБЫЧИ И ПРОМЫСЛОВОГО СБОРА НЕФТИ И ПОПУТНОГО ГАЗА

§ 69. Характерные особенности нефтедобывающих предприятий и основные принципы их автоматизации

Современное нефтедобывающее предприятие представляет собой сложный комплекс технологических объектов, осуществляющих добычу, транспортировку, первичную подготовку,

хранение и внешнюю перекачку нефти и газа, а также выполняющих технологические процессы поддержания пластовых давлений.

Отличительными особенностями нефтедобывающего предприятия являются:

большая рассредоточенность объектов на площадях, достигающих тысяч и десятков тысяч гектаров; расстояния между скважинами измеряются сотнями метров;

непрерывность технологических процессов;

однотипность технологических процессов на объектах (скважины, групповые установки, сепараторы и т. п.);

связь всех технологических объектов через единый пласт, на который проведены все эксплуатационные и нагнетательные скважины, через поток продукции (нефть, газ) и через энергетические потоки (пар, газ, вода);

низкая информационность о процессах, протекающих в пласте и скважине (практически единственным источником информации является измерение дебитов жидкостей и давлений в скважинах);

большая инерционность протекающих в пласте процессов, приводящих к тому, что результаты того или иного управляющего воздействия на пласт можно будет оценить только через несколько лет, а иногда только к концу разработки месторождения, т. е. через десятки лет;

непостоянство объема добычи нефти на месторождении, характеризующееся подъемом добычи в начальный период эксплуатации, стабилизацией на некотором уровне в промежуточный период и снижением добычи после этого периода, из-за этого в начальный период эксплуатации месторождения, когда наряду с разбуриванием площади вводятся многодебитные скважины, строительство объектов транспортировки и подготовки нефти не обеспечивает ведения нормального технологического процесса; при наступлении третьего периода эксплуатации месторождения мощность капитальных технологических объектов оказывается излишней;

уникальность строения и параметров месторождений и невозможность повторения разработки в идентичных условиях, ограничивающих значение проводимых промысловых экспериментов; практически единственная возможность оценить достоинства и недостатки той или иной технологии разработки — это математическое моделирование тем более, что проведение промысловых экспериментов связано с огромными затратами ресурсов и времени.

Некоторые из отмеченных особенностей способствовали ускорению развития автоматизации нефтедобывающих предприятий. Так, непрерывность и однотипность технологических процессов, связь их через единый пласт, продукт и энергетические потоки позволяли решать задачи автоматического управления, используя существующие методы теории автоматического регу-

лирования. Рассредоточенность технологических объектов на больших площадях привела к необходимости и экономической целесообразности разработки и внедрения телемеханических систем и организационных структур дистанционного контроля и управления технологическими объектами и процессами. Все это наложило особый отпечаток на характер технических и организационных решений вопросов автоматизации нефтедобывающих предприятий, обеспечило в ряде случаев ускорение, а иногда затрудняло внедрение по сравнению с автоматизацией предприятий других отраслей народного хозяйства.

Вопросами развития и внедрения автоматизации нефтедобывающих предприятий начали активно заниматься в середине 50-х годов. Однако из-за ряда причин эти работы велись медленно и не давали достаточного эффекта. Основными причинами, сдерживающими развитие автоматизации, были следующие. Автоматизировались не все процессы и не все объекты. Автоматизация осуществлялась некомплексно, из-за чего не высвобождался оперативный обслуживающий персонал, не совершенствовалась структура управления предприятием, не обеспечивалась экономическая эффективность. Средства автоматизации приспособлялись к существующему оборудованию, устаревшему, малонадежному, в ряде случаев непригодному для автоматизации. Средства автоматизации не составляли органически целого с автоматизированным оборудованием. Заводы изготовляли отдельно оборудование и средства автоматизации. На нефтяных промыслах монтировалось оборудование без обязательной установки на нем средств автоматики. Средства и системы автоматики и телемеханики разрабатывались применительно к большому числу технологических схем промыслового сбора и подготовки нефти и газа. В ряде случаев эти технологические схемы не были оптимальными для автоматизации. Все это приводило к разработке большого числа типов и конструкций средств автоматики и телемеханики, что затрудняло организацию широкого серийного производства, повышало стоимость при низком качестве приборов и устройств.

Анализ особенностей и существующего положения в области автоматизации нефтедобывающих предприятий позволил выработать основные принципы, которые были сформулированы в виде Основных положений по обустройству и автоматизации нефтедобывающих предприятий:

унификации схем промыслового сбора нефти, нефтяного газа и воды;

рационального размещения технологического оборудования на территории нефтедобывающего предприятия;

создания новых видов нефтепромыслового оборудования, высокопроизводительного, надежного, органически включающего в себя средства автоматики;

определения рациональных объемов автоматизации и телемеханизации объектов добычи, транспортировки и подготовки нефти, попутного газа и воды;

разработки и внедрения новой организационной структуры автоматизированных нефтедобывающих предприятий.

В различных нефтяных районах из-за геолого-технических, климатических и других природных условий, а в некоторых случаях и независимо от них, применяли различные *схемы сбора*: открытые, герметичные, индивидуальные, групповые, напорные однострунные, напорные двухтрубные. В качестве типовой схемы промыслового сбора нефти, нефтяного газа и воды принята однострунная напорная система, обеспечивающая транспортировку добытой нефти через все технологические объекты, включая и объекты подготовки нефти, за счет устьевых давлений скважин при любом способе их эксплуатации. Напорные двух и многотрубные системы сбора допускаются лишь на участке от групповых установок до установок подготовки нефти при раздельном сборе соответственно обводненной и необводненной или разнородных нефтей. Известно, что способы добычи нефти зависят от свойств нефтяного пласта и определены проектом разработки нефтяного месторождения. Подъем жидкости из скважины следует рассматривать как начальную часть общей системы внутрпромысловой транспортировки нефти, газа и воды. Исходя из этого многие фонтанные скважины с буферными давлениями, не обеспечивающими подачу газонефтяной смеси к пунктам подготовки нефти, газа и воды без промежуточных перекачивающих станций, следовало бы с самого начала эксплуатации переводить на механизированные способы добычи. Стремление максимально использовать энергию пласта приводит к тому, что фонтанную скважину переводят на механизированный способ добычи только тогда, когда полностью прекращается фонтанирование. Это приводит к необходимости сооружать дожимные насосные станции (ДНС), совмещенные с сепарационными и буферными емкостями. С учетом оперативного резерва оборудования ДНС превращаются в громоздкие технологические объекты, рассредоточенные на промысловой площади и требующие повседневного обслуживания. Кроме того, для сбора газа, отсепарированного на ДНС, строят промысловые газосборные сети, длина которых на некоторых нефтепромыслах достигает 100 км. В случае своевременного перевода фонтанных скважин на механизированный способ добычи необходимость в ДНС отпадает, так как напор, развиваемый глубинным насосом, обеспечивает подачу скважины по одному трубопроводу непосредственно к пунктам подготовки нефти, газа и воды.

Типовая схема предусматривает минимальное количество технологического оборудования и максимальную его концентрацию в местах обслуживания. Предусматривается единый для всего предприятия пункт сбора и подготовки нефти, на

котором осуществляются сепарация всех ступеней, подготовка и внешняя перекачка товарной продукции нефти, газа и воды. Число скважин, объединяемых в едином центральном пункте подготовки нефти, выбирается исходя из максимально допустимых давлений на устье скважин.

При решении задач создания новых видов оборудования и технологических объектов необходимо учитывать специфику как нефтедобычи, так и освоения нефтяных месторождений. К специфике нефтедобычи относится прежде всего то, что оборудование работает под открытым небом, под воздействием атмосферных условий и отмечено непостоянство добычи нефти в различные периоды эксплуатации месторождения. Признано целесообразным оснащать нефтедобывающие предприятия оборудованием в блочном транспортальном исполнении. Это позволяет наращивать или сокращать производственные мощности в зависимости от условий периода разработки нефтяного месторождения, что способствует повышению коэффициента использования оборудования до максимального значения. Вместе с тем блочный принцип позволяет значительно ускорить строительство объектов и ввод в эксплуатацию месторождений за счет применения индустриальных методов и резкого сокращения объема строительно-монтажных работ непосредственно на промысловых площадях. Изготовленное специализированными заводами блочное оборудование поставляется нефтедобывающими предприятиями комплектно со всеми средствами автоматики в опробованном и отлаженном состоянии. Создание технологических установок на специализированных заводах, а не монтаж их на промыслах, как это делалось раньше, позволяет решить проблему организации крупносерийного производства автоматизированного оборудования в объемах, обеспечивающих потребность всей отрасли, что обеспечит высокое качество и надежность его.

При решении задач автоматизации в качестве руководящих принципов приняты следующие: автоматизацией и телемеханизацией охватываются все основные и вспомогательные объекты; полная местная автоматизация, исключающая необходимость постоянного присутствия на объекте оперативного обслуживающего персонала; минимум информации, поступающей с объекта в пункты управления; автоматический сбор и переработка информации; автоматическая аварийная и предупредительная сигнализация с объектов. Предусматривается телемеханический контроль по уплотненным каналам связи: групповых измерительных установок, кустовых насосных станций, установок подготовки газа для газлифта, электроподстанций, расположенных на промысловой площади. Предусматривается дистанционный контроль по многопроводным каналам связи установок: сепарационных, подготовки нефти, подготовки воды, подготовки газа, сдачи товарной нефти, перекачки товарной нефти.

Основными положениями определены номенклатура контролируемых параметров, периодичность контроля и сигнализация от каждого технологического объекта.

§ 70. Типовая технологическая схема автоматизированного нефтедобывающего предприятия

Технологическая схема нефтедобывающего предприятия изображена на рис. 116. Газонефтяная смесь с примесью воды от глубиннонасосных 1, фонтанных 2 и газлифтных 3 скважин поступает по одному трубопроводу на автоматизированную групповую измерительную установку (ГУ) 4, где каждая скважина автоматически по заданной программе подключается к измерительному устройству. После измерения дебитов жидкости и газа газожидкостная смесь от ГУ поступает в сепарационную установку 7, где происходит частично отделение газа от жидкости. Далее продукция скважин по одному трубопроводу направляется в автоматизированную блочную сепарационную установку, где осуществляется отделение газа от жидкости (первая ступень сепарации). Продукция обводненных скважин по двум трубопроводам — безводной и обводненной нефти — после измерения транспортируется на центральный пункт подготовки нефти газа и воды (ЦППН). При добыче нефтей с большим содержанием парафина и большой вязкостью применяют блочные автоматизированные подогревающие печи 5 типа УН-0,2, в которых нефть подогревается, чем создаются условия для нормальной работы ГУ и для транспортировки нефти до ЦППН. В случае низких буферных давлений эксплуатационных скважин для транспортировки нефти по системе нефтепромыслового сбора применяют сепарационные установки 8 с откачкой или дожимные насосные станции (ДНС) 9. Из сепарационных установок 7 и 8 нефть направляется в концевые сепарационные установки 10. В случае большого содержания воды (выше 30 %) в транспортируемой жидкости применяются сепарационные установки с предварительным сбросом воды 11. После установок 10 водонефтяная смесь поступает сначала в деэмульсационную установку 12, где происходят обезвоживание и обессоливание, а затем в стабилизационную установку 13 (горячевакуумная сепарация), предназначенную для извлечения из нефти легких углеводородных фракций. На установке 14 осуществляются учет товарной нефти по объему и массе и откачка ее на головные сооружения магистрального нефтепровода. Если обводненность нефти, поступившей на установку 14, превышает допустимые нормы, нефть автоматически возвращается на повторную обработку в деэмульсационную установку 12. Выделившийся из нефти газ в сепарационных установках 7, 8, 10 и в установке предварительного обезвоживания 11 компрессорными станциями 15 и 16 подается на газоперерабатывающий завод 17 и на газораспределительные пункты 6, откуда он поступает на нефтяные скважины,

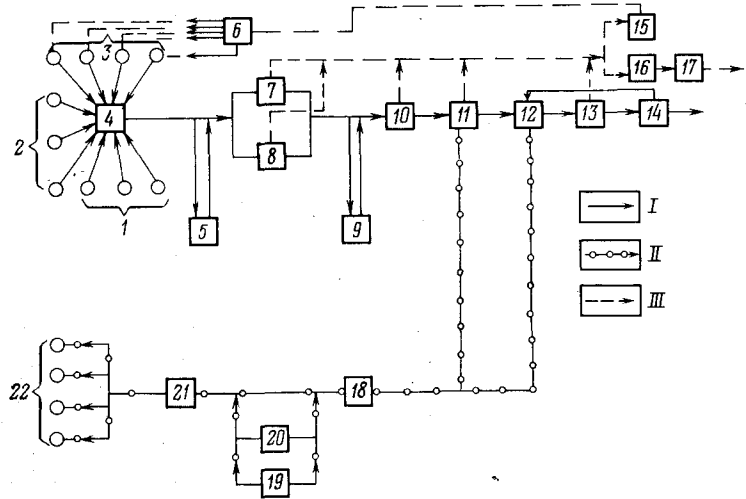


Рис. 116. Технологическая схема нефтедобывающего предприятия:
I — нефть; II — вода; III — газ

эксплуатируемые газлифтным способом. Отделившаяся на обезвоживающих установках 11 и 12 пластовая вода поступает на установки очистки пластовых вод 18, где она очищается для использования ее в системе поддержания пластового давления. С установок очистки вода подается на блочные автоматизированные кустовые насосные станции 21, откуда она поступает для закачки в нагнетательные скважины 22. На кустовые насосные станции подается также вода с водозаборных 19 и очистных 20 сооружений. Нефтепромысловое обустройство в настоящее время осуществляется с учетом максимальной централизации наиболее сложных объектов — центральных пунктов сбора и подготовки нефти, воды и газа.

§ 71. Автоматизация нефтяных скважин

На нефтяных промыслах в зависимости от пластового давления и принятой технологической схемы сбора нефти и попутного газа добыча нефти из скважин ведется фонтанным, газлифтным способами либо глубинными насосами, штанговыми или электропогружными. При всех способах добычи оборудование, установленное на скважине, работает без постоянного участия оперативного обслуживающего персонала. Задачей автоматизации является автоматическая защита от аварийных режимов и обеспечение средствами контроля технологического режима и состояния оборудования. Независимо от способов добычи все скважины оснащаются средствами местного контроля давления на буфере или на выкидной линии и при

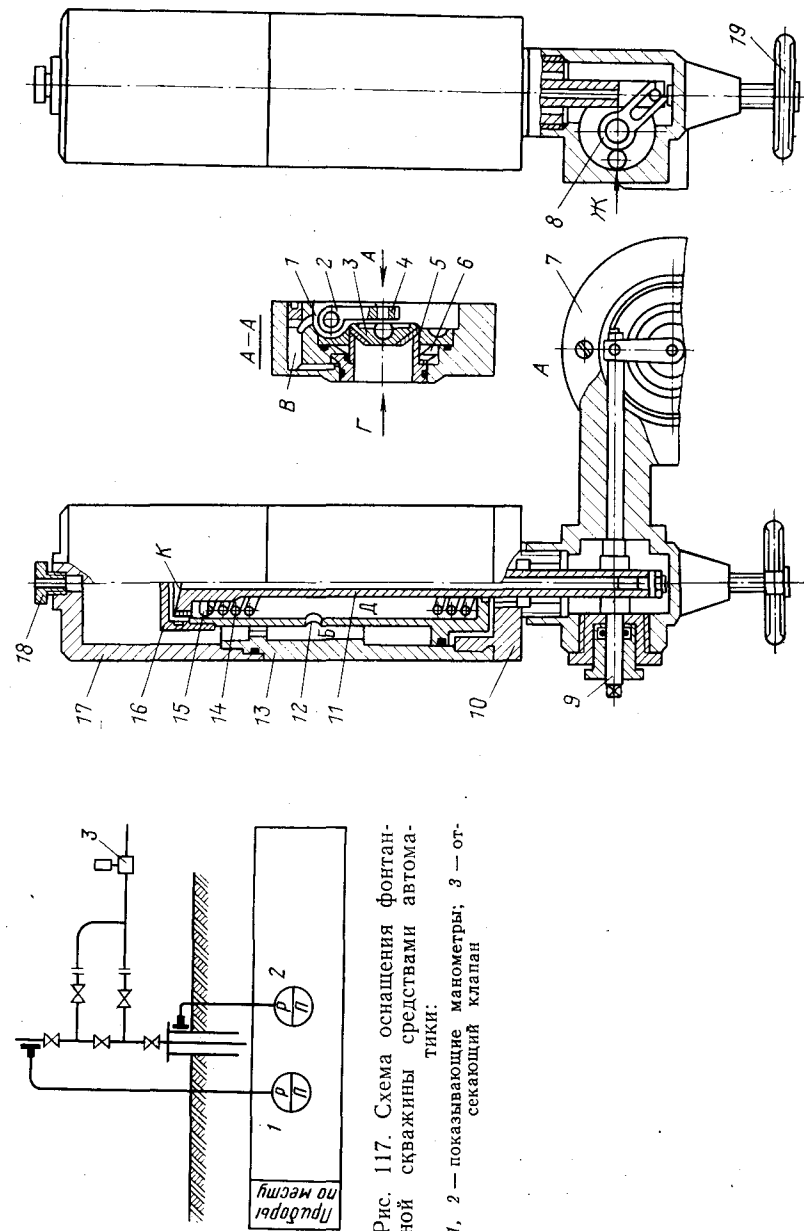


Рис. 117. Схема оснащения фонтанной скважины средствами автоматизации:
1, 2 — показывающие манометры; 3 — отсекающий клапан

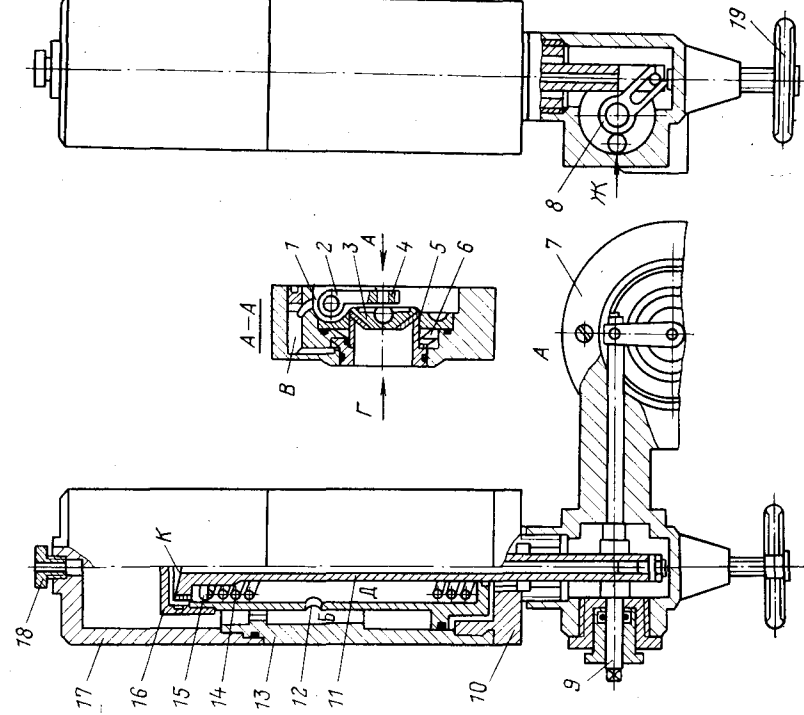


Рис. 118. Отсекатель типа РОМ-1

необходимости в затрубном пространстве. Для измерения давления применяются манометры ВЭ-16РБ.

Автоматизация фонтанной скважины. Схема оснащения устья фонтанной скважины средствами автоматики изображена на рис. 117. Схемой предусмотрены контроль давления манометрами 1 и 2 и автоматическое перекрытие выкидной линии разгруженным отсекателем манифольдным 3 типа РОМ-1. Отсекатель предназначен для автоматического перекрытия трубопровода при повышении давления в нем на $4,5 \cdot 10^5$ Па, что может произойти при образовании парафиновой пробки, и при понижении давления до $1,5 \cdot 10^5$ Па в случае порыва трубопровода. Устройство отсекателя РОМ-1 изображено на рис. 118. Клапан собран в корпусе 7, который крепится между фланцами трубопровода. Управляющая часть собрана в корпусе 13 на основании 10. Полости Б и Д под крышками 17 и 16 через обратный клапан 18 заполняются сжатым воздухом, имеющим давление, равное давлению рабочей среды в трубопроводе. При температуре окружающего воздуха выше нуля указанные полости можно заполнить попутным газом из коллектора. После монтажа клапан открывают вращением маховика 19. Когда установится нормальный режим работы трубопровода, штурвал возвратится в исходное положение. Отсекатель РОМ-1 приводится в рабочее положение, если открыть за ним задвижку. В этом случае давление рабочей среды передается через отверстие Ж в камеру кривошипа 8 и оттуда в полость Е под поршень 12, который поднимается до упора и через шток 11, кривошип 8, валик 9 и рычаг 2 открывает клапан 3, прижатый к седлу 1. По внутреннему отверстию в штоке давление передается также в полость К. Нажим рычага 2 на клапан регулируется винтом 4. При понижении давления в трубопроводе ниже рабочего давление сжатого воздуха или газа под крышкой 16 превысит давление в трубопроводе и под его воздействием поршень 12 будет перемещаться вниз вместе с пружиной 14, а шток 11 через кривошип, валик и рычаг закроет клапан, отключив скважину от трубопровода. При восстановлении давления в трубопроводе до рабочего клапан автоматически откроется. В случае повышения давления в трубопроводе выше рабочего среда, действуя на шток, приведет к сжатию пружины 14 и опусканию штока. При этом клапан закроется. При восстановлении рабочего давления пружина 14 разожмется и клапан откроется. Давление пружины 14 можно регулировать гайкой 15. Для облегчения открытия клапана предусмотрен дополнительный поршень 5 с уплотняющим кольцом 6, движущийся против потока нефти. Упираясь торцом в клапан 3, поршень уменьшает усилие закрытия клапана на величину, пропорциональную разности площадей клапана и поршня. Для управления клапаном не требуется дополнительной энергии, поэтому он может быть установлен на участках трубопроводов, где нет источников энергии.

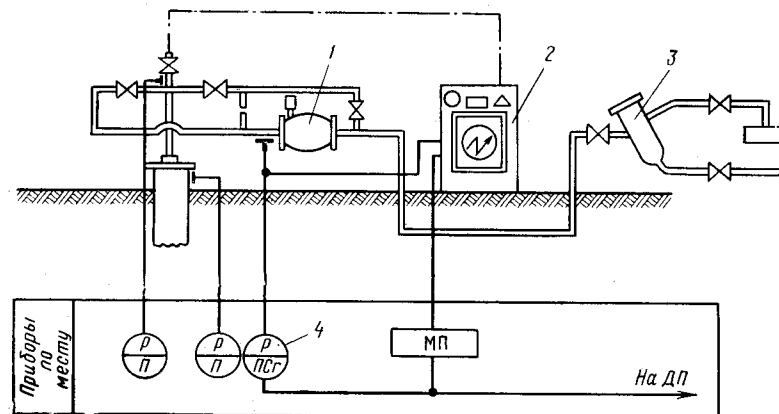


Рис. 119. Схема автоматизации нефтяной скважины с электропогружным насосом

Автоматизация скважины с электропогружным насосом. Схема автоматизации нефтяной скважины, оборудованной электропогружным насосом (рис. 119), предусматривает установку станции управления 2 типа ПГХ-5071 или ПГФ-5072 электроконтактного манометра 4 типа ВЭ-16РБ, разгруженного отсекателя 1 типа РОМ-1 и устройства 3 для запуска шаров, очищающих трубы от парафина. Схема автоматизации обеспечивает автоматическое отключение электродвигателя погружного насоса при аварийных режимах, пуск и остановку по команде с групповой установки и индивидуальный самозапуск при перерывах подачи электроэнергии. Кроме того, обеспечивается защита выкидного коллектора при временном фонтанировании. Предусматриваются автоматическое отключение работающей установки при коротких замыканиях и значительных перегрузках электродвигателя ($I_{ср} \geq 1,4 I_{ном}$), защита с выдержкой времени около 2 мин при перегрузке двигателя по току ($I_{ср} \geq 1,2 I_{ном}$), минимальная защита путем отключения установки при снижении тока нагрузки ниже 0,85 от рабочего тока электродвигателя (при срыве подачи). Обеспечивается непрерывный контроль изоляции для установок в комплекте с повышающим трансформатором при снижении сопротивления изоляции «кабель — погружной электродвигатель» менее 30 кОм. С помощью разгруженного отсекателя РОМ-1 обеспечивается перекрытие выкидного коллектора при повышении или резком снижении давления (из-за порыва трубопровода).

Автоматизация скважины со штанговыми глубинными насосами. Автоматическое управление насосными установками СКН осуществляется блоком управления типа БУС-3М.

Блок управления БУС-3М состоит из следующих основных частей: силовой части, предназначенной для управления элек-

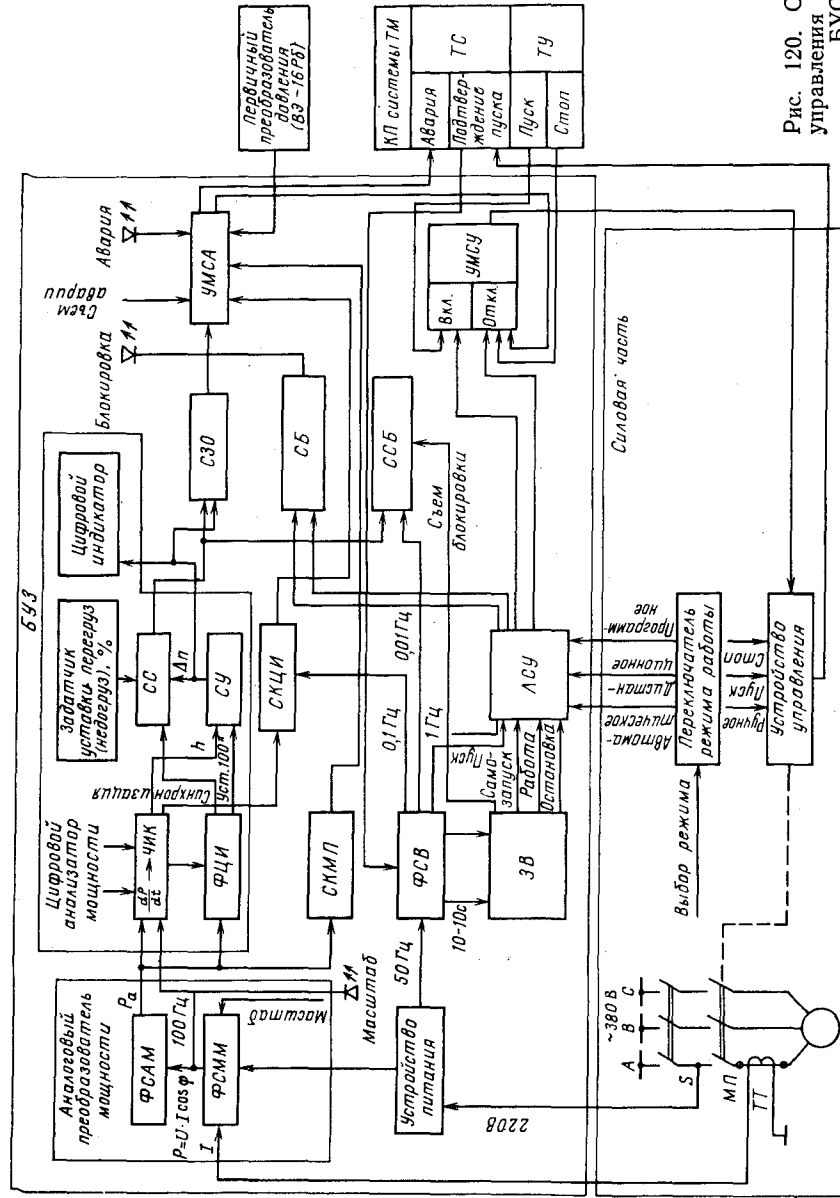


Рис. 120. Схема блока управления и защиты БУЗ-3М

тродвигателем станка-качалки; блока управления и защиты (БУЗ), обеспечивающего формирование сигналов управления, контроль состояния оборудования станка-качалки и формирование сигнала аварийного отключения; первичного преобразователя давления (ППД), предназначенного для формирования аварийного сигнала при повышении или понижении давления в выкидном трубопроводе. Структурная схема БУЗ изображена на рис. 120; БУЗ состоит из устройств управления, защиты и питания.

Устройство управления включает в себя: формирователь сигналов времени (ФСВ); задатчик времени (ЗВ); логическую схему управления (ЛСУ); усилители мощности сигналов управления (УМСУ). ФСВ предназначен для формирования сигналов времени: задержки самозапуска от 10 до 70 с, съема блокировки от 1 до 7, работы и остановки от 1 до 29 ч при программном управлении периодической работой станка-качалки. При этом ЗВ обеспечивает задание требуемых сигналов времени задержки самозапуска, съема блокировки, работы и остановки. ЛСУ обеспечивает формирование сигналов на включение электродвигателя при восстановлении напряжения в сети после перерыва в снабжении электроэнергией, на включение и отключение электродвигателя в программном режиме работы, а также выдачу сигналов блокировки защиты. УМСУ предназначены для формирования релейных сигналов управления электродвигателем: включения от ЛСУ и от контролируемого пункта (КП) системы телемеханики; отключения от ЛСУ, от КП системы телемеханики и аварийного сигнала устройства защиты.

Устройство защиты состоит из аналогового преобразователя мощности, включающего в себя формирователь сигнала мгновенной мощности (ФСММ) и формирователь сигнала активной мощности (ФСАМ); цифрового анализатора мощности, в котором имеются: преобразователь dP/dt в число-импульсный код (ЧИК), формирователь цикла измерений (ФЦИ), счетное устройство (СУ), схема сравнения (СС), задатчик уставки перегруз, недогруз и цифровой индикатор; схемы задержки отключения (СЗО); схемы блокировки (СБ); схемы съема блокировки (ССБ); схемы контроля максимальных перегрузок (СКМП); схемы контроля цикла измерения (СКЦИ); усилителя мощности сигналов аварии (УМСА).

Аналоговый преобразователь мощности предназначен для формирования сигнала активной мощности, потребляемой электродвигателем. ФСММ обеспечивает аналоговое перемножение токового сигнала, поступающего со вторичной обмотки трансформатора тока, и сигнала напряжения, поступающего с устройства питания. Входной сигнал напряжения формируется устройством питания от фазы трехфазной сети питания электродвигателя, в цепи которой установлен однофазный трансформатор тока. На входе ФСММ формируется сигнал мгновен-

ной мощности в виде напряжения частотой 100 Гц. ФСАМ формирует сигнал активной мощности P_a в виде напряжения с периодом колебаний, равным времени цикла работы СКН, путем выделения огибающей сигнала мгновенной мощности.

Цифровой анализатор мощности обеспечивает контроль отклонения активной мощности в течение каждого цикла станка-качалки от значения, измеренного в нормальном режиме работы СКН, и формирует сигнал аварийного отключения электродвигателя с задержкой при изменении мощности за заданные уставки перегруз, недогруз.

Контроль отклонения мощности осуществляется путем преобразования dP/dt на заданных участках кривой мощности электродвигателя в число-импульсный код, определения и фиксации числа импульсов в нормальном режиме работы станка-качалки в течение одного цикла измерения. Затем в каждом последующем цикле измерения определяют текущее число импульсов и сравнивают полученное значение с заданным, соответствующим нормальному режиму работы.

Длительность цикла измерения выбрана равной циклу работы СКН. Преобразование dP/dt в ЧИК осуществляется сравнением кривой мощности в течение каждого цикла измерения с двумя уставками по уровню U_A и U_B , определением длительности промежутков времени нахождения участков кривой мощности между двумя заданными уровнями и измерением этих длительностей путем заполнения их импульсами частотой 100 Гц. На выходе преобразователя dP/dt в ЧИК за один цикл измерения формируются последовательно четыре серии импульсов. Уровни U_A и U_B устанавливаются такой величины, чтобы при нормальном режиме работы СКН за цикл измерения на счетное устройство приходило 100 ± 5 импульсов. Счетное устройство считает импульсы с выхода преобразователя dP/dt в ЧИК, и в конце цикла измерения на выходе его формируется число $\Delta n = 100 - n$, где n — текущее число импульсов с выхода преобразователя в ЧИК за один цикл измерения. По окончании цикла измерения формирователь цикла измерения формирует сигнал «Синхронизация», по которому в схеме сравнения выявляется отклонение числа Δn от заданной уставки перегруз, недогруз. Если число Δn больше этих уставок, то на выходе СС формируется аварийный сигнал, по которому в схеме задержки запоминается степень перегрузки или недогрузки электродвигателя путем запоминания цифры старшего разряда числа Δn . По окончании сигнала «Синхронизация» ФЦМ формирует сигнал «Уст. 100», по которому СУ устанавливается в исходное состояние для подсчета импульсов в следующем цикле измерения. В том случае, если аварийные сигналы на выходе СС формируются в каждом последующем цикле измерения, на выходе СЗО формируется аварийный сигнал через время задержки, обратно пропорциональное степени перегрузки или недогрузки электродвигателя, т. е. числу Δn .

Схема блокировки обеспечивает блокировку защиты в переходном режиме работы станка-качалки до восстановления установившегося режима. Ввод сигнала блокировки осуществляется автоматически при пуске станка-качалки по сигналу «Блокировка 1», а также по сигналу «Блокировка 2» — при остановке станка-качалки. Ввод сигнала блокировки при пуске обеспечивает включение электродвигателя СКН при наличии переходного режима работы СКН после длительных простоев, вызывающих временное отклонение режима работы СКН от нормального. Схема объема блокировки обеспечивает автоматический съем блокировки при установлении нормального режима работы СКН после пуска его или через установленное задатчиком время, если нормальный режим не восстанавливается (например, при возникновении аварии во время переходного режима работы).

Автоматический съем блокировки осуществляется следующим образом. Если после пуска СКН через определенное время, характерное для каждой скважины, устанавливается нормальный режим работы, то с выхода СС прекращается поступление сигналов в ССБ и по метке времени 0,01 Г на выходе ССБ формируется сигнал «Съем блокировки».

Схема контроля максимальных перегрузок обеспечивает защиту электродвигателя станка-качалки при максимальных перегрузках. Время задержки отключения при этом равно 1 с. Схема контроля цикла измерения формирует аварийный сигнал при обрыве фазы А электродвигателя и обрыве ремней. При этом кривая активной мощности P_a опускается ниже заданной уставки U_B , прекращается формирование импульсных сигналов по уровню U_B , поступающих на вход СКЦИ, и по метке времени 0,01 Г на выходе СКЦИ формируется аварийный сигнал через время задержки, равное 30 с. Аварийные сигналы с выхода СЗО, СКМП и СКЦИ поступают в усилитель мощности сигналов аварии, который формирует релейный сигнал аварийного отключения на вход УМСУ, и в систему телемеханики, а также обеспечивает запоминание аварии и ее индикацию. Съем аварии осуществляется от кнопки «Съем аварии», расположенной в блоке БУЗ, или от кнопки, расположенной на БУС-ЗМ. Первичный преобразователь давления формирует сигнал в УМСА при отклонении давления в выкидном трубопроводе за заданные уставки.

Силовая часть предназначена для коммутации цепей электродвигателя станка-качалки и защиты его от токов короткого замыкания. Силовая часть состоит из устройства управления, включающего в себя магнитный пускатель и кнопки управления, переключателя режима работы, трансформатора тока (ТТ), автоматического выключателя S , обеспечивающего защиту от токов короткого замыкания, коммутационных силовых элементов.

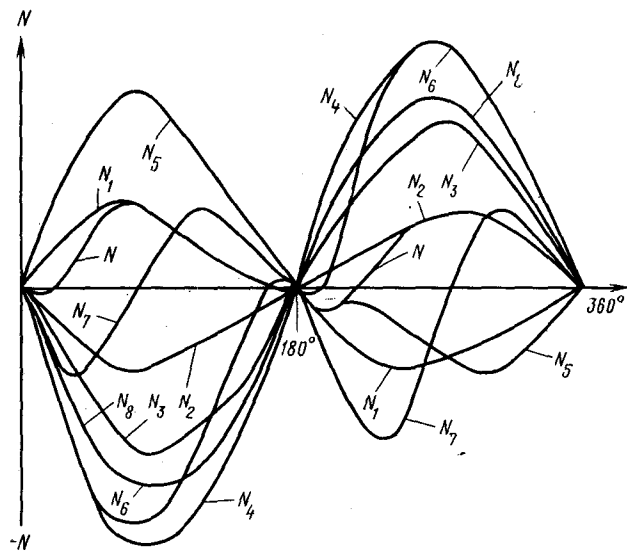


Рис. 121. Диаграммы мощности потребляемой электродвигателем электроэнергии при некоторых неисправностях:

N — нормальный режим; N_1 — поломка приемного клапана насоса; N_2 — поломка нагревательного клапана насоса; N_3 — обрыв штанг; N_4 — обрыв штанг у полированного штока; N_5, N_6, N_7 — заклинивание плунжера соответственно в нижней, верхней и средней частях цилиндра насоса; N_8 — обрыв штанги посередине

На рис. 121 изображены формы диаграммы мощности потребляемой электроэнергии приводом станка-качалки при некоторых неисправностях установки. Таким образом, при помощи анализатора мощности можно определить не только наличие, но и характер и место неисправности. Применение анализатора мощности в БУС-3 позволяет кроме управления электродвигателем станка-качалки обеспечить технологическую защиту оборудования при аварийных режимах, а также получить информацию (ваттметрограмму) для диагностики состояния скважинного оборудования.

Автоматизация газлифтных скважин. Автоматизацией предусматривается регулирование подачи в скважину сжатого воздуха по определенной программе в зависимости от изменения давления в скважине. Схема автоматизации с использованием в качестве регулирующих устройств элементов пневматической агрегатной унифицированной системы изображена на рис. 122. Двумя блоками измерения $БИ_p$ и $БИ_Q$ определяются два параметра процесса: давление в скважине p и расход воздуха Q , подаваемый в скважину. Необходимо регулировать расход воздуха Q по определенной программе p , т. е. так, чтобы подача воздуха в скважину осуществлялась в функции изменения давления. Схема работает следующим образом. К дистанционному датчику БДП подводится сигнал p , где он специальным уст-

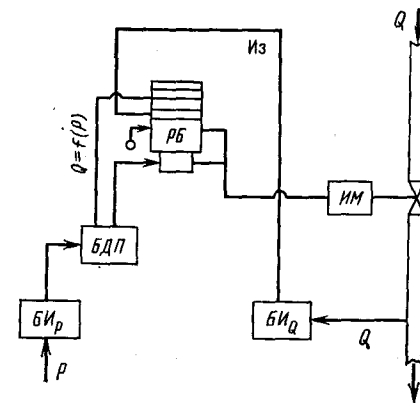


Рис. 122. Схема автоматического регулирования работы компрессорной скважины

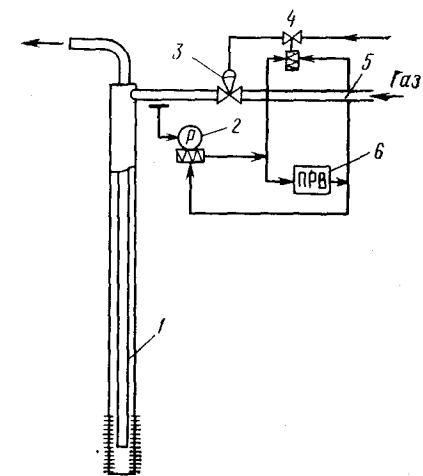


Рис. 123. Схема автоматизации периодической эксплуатации скважины

ройством, снабженным лекалом, профиль которого очерчивается в соответствии с заданной функциональной зависимостью, преобразуется в сигнал $Q=f(p)$. Этот сигнал подается в камеру задания изодромного регулирующего блока РБ Из. К камере измерения этого блока подводится текущее значение параметра Q от $БИ_Q$. Так как в этом случае величина $Q=f(p)$ служит заданием регулятору БР—Из, он, воздействуя на регулирующий клапан ИМ, управляющий параметром Q , поддерживает его непрерывно на уровне $Q=f(p)$. Для повышения качества процесса регулирования, если это требуется, может быть введен блок предварения или запаздывания.

Периодическая работа скважин (рис. 123) осуществляется подачей рабочего агента в скважину по программе, установленной для каждой скважины. Прекращение подачи рабочего агента в скважину осуществляется с помощью сигнала от электроконтактного манометра с установкой на определенное давление. Через заданное время программное реле времени (ПРВ) 6 подает сигнал на электропневматический клапан 4, управляющий пусковым клапаном 3, установленным на газоподводящей линии 5. Рабочий агент по лифту 1 поступает к забою скважины. После окончания фонтанирования, когда давление рабочего агента начнет падать, электроконтактный манометр 2 подает сигнал на клапан 4 и подача газа прекращается. Этим же сигналом включается в работу ПРВ. При его срабатывании кратковременно снимается питание с контактов манометра ЭКМ-1, чтобы не было ложного сигнала на отключение электропневматического клапана (ЭПК) в начальный момент пу-

ска. Для снижения давления рабочего агента на забой применяют лифт с камерой замещения. Автоматика для управления периодической эксплуатации лифта с камерой замещения та же, что описана выше.

§ 72. Автоматизированные групповые измерительные установки

Автоматизированные групповые измерительные установки предназначены для измерения производительности (дебита) каждой в отдельности из подключенных к ней группы нефтяных скважин. Существующие типы групповых измерительных установок — «Спутник А» и «Спутник Б» имеют следующие функциональные узлы:

блок переключения, который по заданной программе подключает каждую скважину к измерительному блоку;

измерительный блок, в котором измеряется дебит каждой скважины, он состоит из сепаратора и измерительного устройства (дебитомера);

блок автоматики и управления, осуществляющий управление переключением скважин на измерение, учет работы измерительного устройства и автоматическую защиту групповой установки при аварийных режимах.

Групповая автоматизированная установка «Спутник А» предназначена для автоматического измерения дебита скважин, подключенных к групповой установке, контроля за работой скважин по подаче и автоматическому отключению их при аварийном состоянии на групповой установке. Установку применяют при однотрубной системе сбора на нефтепромыслах Западной Сибири, Коми АССР, Татарии, Башкирии и в других районах, имеющих низкие температуры окружающей среды. Она состоит (рис. 124) из многоходового переключателя 1 типа ПСМ; двух отсекаателей 2 и 3 типа ОКГ, установленных на расходомерной и выкидной линиях; электрогидравлического привода ГП-1,5 для управления переключателем скважин и отсекаателями; блока управления и индикации (БУИ) 12 для управления приборами, выдачи сигналов на диспетчерский пункт и учета объема измеряемой жидкости; гидроциклонного сепаратора 6 для отделения газа от измеряемой жидкости. Установка работает следующим образом. Нефть из скважины поступает в многоходовой переключатель, который приводится в действие гидроприводом 10. Далее по измерительному трубопроводу 5 она направляется в измерительный сепаратор 6 и затем в турбинный счетчик 8 типа ТОР-1-50. Продукция остальных скважин направляется через общий коллектор 4 в сборносепарационную емкость или в сборный трубопровод. Программа измерения дебита скважин задается реле времени в блоке управления. Через заданные промежутки времени реле включает гидропривод, и скважины подключаются к измерителю. Подача скважин контролируется

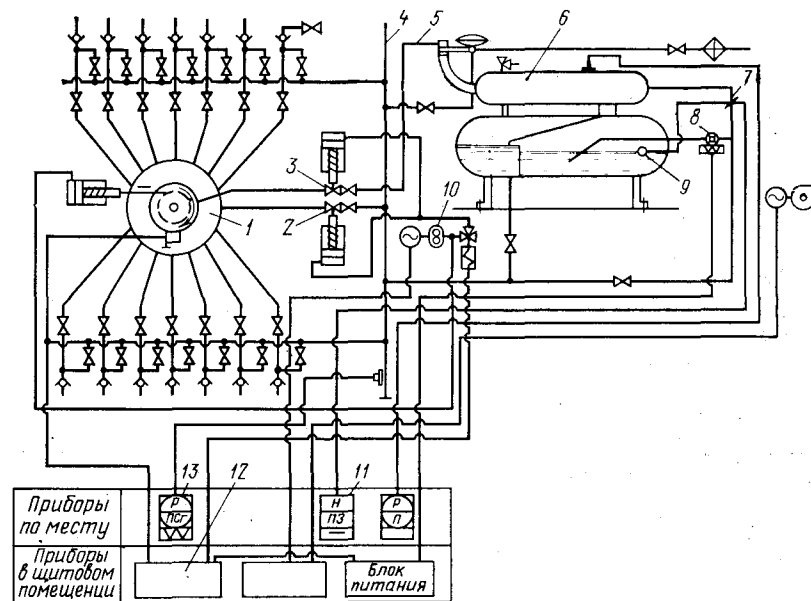


Рис. 124. Схема установок «Спутник А»

по работе измерителя с сигнализацией об аварийном состоянии через блок местной автоматики. Дебит измеряют путем кратковременного пропуска жидкости, накопившейся в сепараторе, через турбинный измеритель. Накопление жидкости в нижнем соуде сепаратора до заданного уровня и выпуск ее до нижнего уровня осуществляются при помощи поплавкового регулятора 9, 11 и крана 7 на газовой линии. Всплывание поплавка регулятора до верхнего уровня приводит к закрытию газовой линии, вследствие чего давление в сепараторе повышается и жидкость продавливается из сепаратора через турбинный счетчик 8, установленный выше верхнего заданного уровня жидкости в сепараторе. При достижении поплавком нижнего заданного уровня открывается кран 7, давление между сепаратором и коллектором выравнивается, продавка жидкости прекращается. Время накопления жидкости в сепараторе и число импульсных пропусков жидкости через счетчик за время измерения зависят от дебита измеряемой скважины. Время продавки жидкости через расходомер от дебита скважины практически не зависит. Такой циклический метод измерения обеспечивает пропуск потока жидкости через счетчик всегда в турбулентном режиме при узком диапазоне изменения расхода, что дает возможность измерять дебит скважин, изменяющийся в широком диапазоне. Дебит каждой скважины определяют регистрацией накапливаемых объемов жидкости, прошедших через расходомер, на инди-

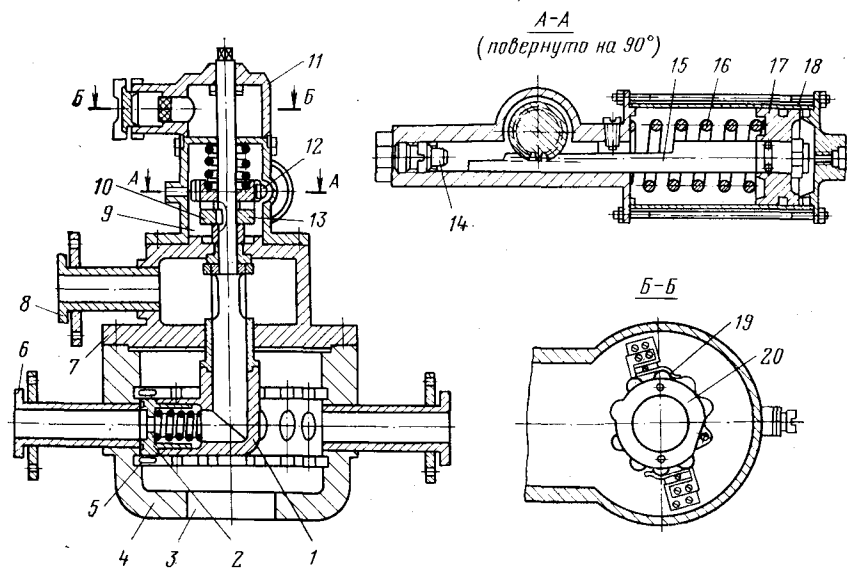


Рис. 125. Многоходовой переключатель скважин ПСМ-1М

видуальном счетчике импульсов в БУИ. Аварийное отключение скважин происходит в случае повышения или резком падении давления в коллекторе или при отключении электроэнергии. В этих случаях по сигналу датчика электроконтактного манометра блок местной автоматики отключает напряжение с соленоидного клапана гидропривода, вследствие чего поршни приводов отсекаелей 2 и 3 под действием силовых пружин перекрывают трубопроводы. После ликвидации аварии и снятия сигнала аварии на блоке местной автоматики включается гидроривод и под действием давления масла, подаваемого под поршни отсекаелей, последние открываются. Контроль давления осуществляется манометром 13. На установке предусмотрена возможность ручного переключения скважин к измерительному устройству. Количество отсепарированного газа измеряется по методу переменного перепада давления дифманометром. Для этой цели на выкидной газовой линии устанавливается камерная диафрагма.

Устройство многоходового переключателя скважин ПСМ-1М изображено на рис. 125. В цилиндрическом корпусе 4 имеются трубы 6, к которым плотно присоединяются трубопроводы, подводящие продукцию от скважин. Внутри корпуса имеется полый патрубок 1, который поворачивается на определенный угол, подключаясь к трубам, идущим от скважин, и соединяет соответствующий трубопровод с трубой 8. При этом продукция подключенной скважины направляется в измерительный блок. Скважины подключаются следующим образом. При подаче

масла в цилиндр управления 18 поршень 17, сжимая пружину 16, перемещает зубчатую рейку 15, которая поворачивает шестерню храповика 12, сцепленную торцовыми зубьями с храповиком 10, укрепленным шпонкой 13 на валу в корпусе 9. Этот храповик поворачивает патрубок 1 с кареткой 2 на угол между двумя вводами 6 от скважин. При этом ролики 5 выходят из фрезерованных углублений корпуса 4 у ввода от предыдущей скважины, отжимают каретку 2 от корпуса, сжимая пружину каретки, и выводят ее уплотнение из соприкосновения с корпусом. В конце поворота ролики 5 под действием пружины каретки западают во фрезерованные уплотнения ввода следующей скважины и уплотнение каретки вновь прижимается к корпусу. Теперь жидкость от очередной скважины поступает через канал поворотного патрубка 1, проходящего через крышку 7 корпуса, в патрубок 8, по которому она направляется в измерительный блок. Жидкость от остальных скважин выходит из переключателя через выводной патрубок 3 в общую приемную магистраль. Ход зубчатой рейки 15 регулируется винтом 14. При повороте патрубка 1 кулачок диска 20 нажимает на микропереключатель МП-10, укрепленный на кронштейне 19 корпуса датчика положения 11, и посылает сигнал о переключении скважины в блок местной автоматики. За полный поворот каретки 2 кулачковый диск 20 1 раз кратковременно нажимает на второй микропереключатель и посылает сигнал в блок местной автоматики об окончании цикла измерений. После поворота патрубка 1 и перехода на измерение очередной скважины давление масла в цилиндре управления 18 снижается и поршень 17 под действием пружины 16 возвращается в первоначальное положение. Зубчатая рейка 15 вращает шестерню храповика 12 в обратном направлении. При вращении шестерни храповик с помощью торцовых зубьев выходит из зацепления и в конце хода вновь входит в зацепление, но с другими зубьями храповика 10. Гидравлические отсекаели коллекторов типа ОКГ представляют собой разгруженный клапан с пружиной и поршневым гидравлическим приводом. Они предназначены для перекрытия коллекторов при аварийном состоянии оборудования групповых установок. Для открытия отсекаеля масло под давлением подается под поршень силового цилиндра. Для закрытия клапана полость под поршнем сообщается с масляным баком гидропривода, масло стекает — и сжатая пружина закрывает клапан.

Гидравлический привод ГП-1 (рис. 126) предназначен для управления переключателем скважин ПСМ-1М и привода аварийных отсекаелей коллекторов ОКГ в замерно-переключающих установках. Реле времени, установленное в блоке местной автоматики, по заданной программе включает электродвигатель гидропривода, и насос 2 подает масло под давлением одновременно по двум направлениям: к силовому цилиндру переключателя скважин ПСМ-1М и через обратный клапан 3 к силовым цилиндрам отсекаелей коллекторов. При этом переключатель

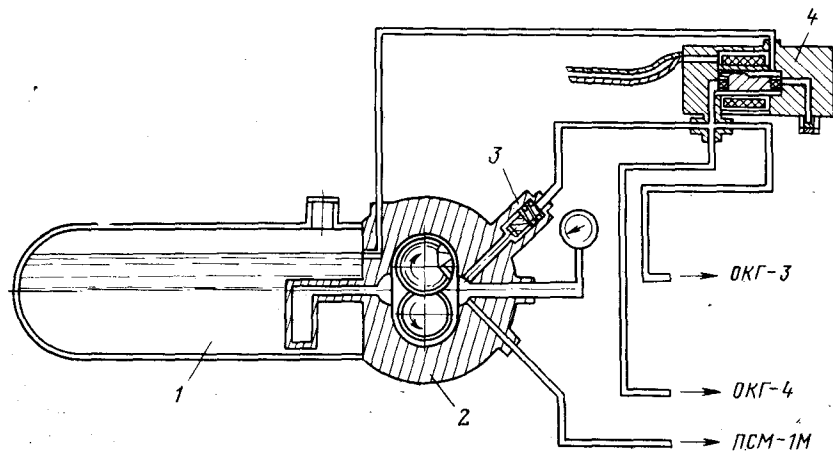


Рис. 126. Гидравлический привод ГП-1

ПСМ-1М, поворачиваясь, подключает очередную скважину к измерительному блоку. После отключения электродвигателя масло из силового цилиндра переключателя ПСМ-1М вытесняется через насос в масляный бак 1; система подготовлена к следующему переключению скважин. Масло, поступившее в силовые цилиндры отсекающих, удерживается в них обратным клапаном 3 и под поршнем привода отсекающей сохраняется давление, удерживающее отсекающую в открытом состоянии. Отсекающие закрываются по команде блока местной автоматики снятием напряжения с соленоидного клапана 4, который при этом переключается и открывает путь маслу, выжимаемому поршнями из силовых цилиндров отсекающих через соленоидный клапан 4 в масляный бак 1.

Автоматизированная групповая измерительная установка «Спутник Б» в отличие от рассмотренной установки «Спутник А» предназначена не только для измерения дебита жидкости, но и для определения содержания воды и газа в продукции скважин. Конструкцией установки предусмотрены устройства для подачи деэмульгаторов в нефтяной потолок. Установка «Спутник Б» выпускается в двух модификациях: «Спутник Б-40-14/400» на 14 скважин и «Спутник Б-40-24/400» на 24 скважины (рис. 127). Продукция от скважин по линиям 1 поступает в многоходовой переключатель 3, откуда от каждой скважины по заданной программе она направляется в измерительный сепаратор 5, где отделяется от нефти. Продукция всех остальных скважин поступает в сборный коллектор. Выделившийся в сепараторе газ измеряется газовым счетчиком 7 и направляется в сборный коллектор. Часть газа отбирается для питания пневматических регулирующих устройств, в частности газораспределительного устройства 9. Давление газа в сепараторе поддер-

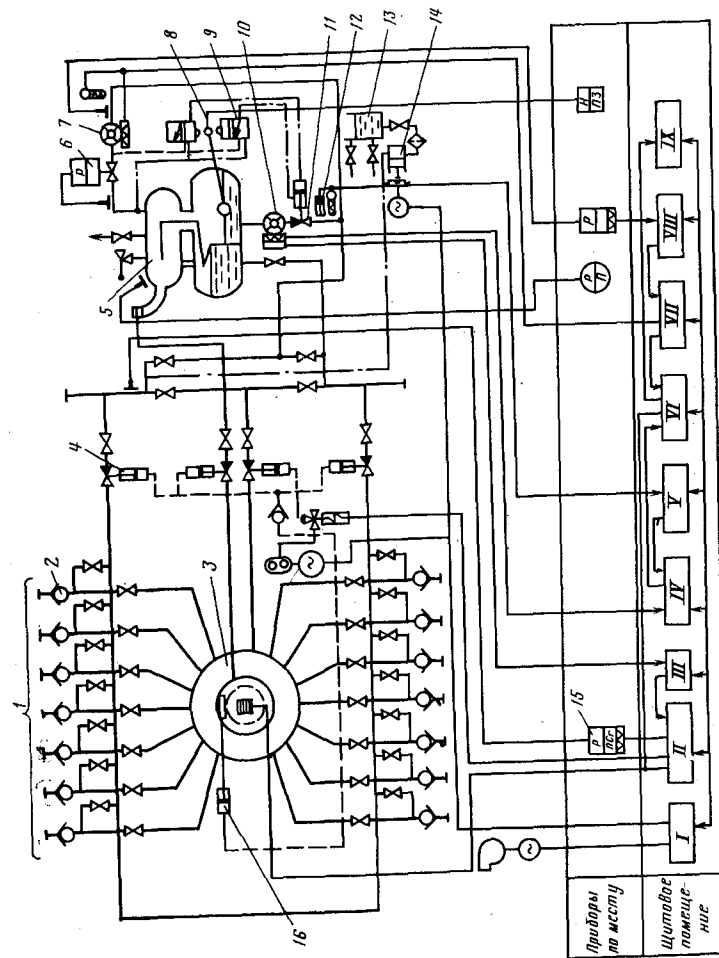


Рис. 127. Схема блочной групповой установки «Спутник Б»: I — блок питания электропривода в дождь; II — блок питания индикации; III — блок питания ТОР-1; IV — блок питания ронный; V — элемент влажности сырой нефти; VI — регистрирующее устройство; VII — регистратор газового счетчика; VIII — нормирующий усилитель; IX — перфоратор.

живается на заданном уровне регулятором 6, уровень — регулятором 8. Жидкость из подключенной на измерение скважины скапливается в нижней части сепаратора и избыточным давлением, поддерживаемым регулятором 6, продавливается через счетчик 10, датчик влагомера 12 и клапан 11 в общий коллектор. Дебит подключенной скважины определяется по кратковременным пропускам через турбинный счетчик ТОР накапливающейся в сепараторе жидкости. Данные об объеме жидкости, газа и влагосодержании в виде электрических сигналов поступают в электронный блок, откуда они передаются на диспетчерский пункт. Автоматическая подача деэмульгатора из емкости 13 в общий коллектор осуществляется насосом-дозатором 14 типа НД-0,5Р-10/100. Для приема депарафинизационных шаров, перемещающихся потоком жидкости от каждой скважины, предусмотрено устройство 2. Если по какой-либо причине в течение длительного промежутка времени скважина не будет подавать нефть, на счетчике в блоке местной автоматики не будет зарегистрировано ни одного цикла с блока местной автоматики (БМА) и будет подан аварийный сигнал. Таким образом, работа отдельных скважин контролируется без специальных датчиков подачи. Недостатком такого способа является то, что работа скважины контролируется не постоянно, а периодически, только во время подключения ее к измерительному блоку. При понижении и превышении допустимых пределов давления в рабочем коллекторе отсекающие клапаны 4 по импульсу с БМА перекроют измерительный и рабочий трубопроводы. Одновременно от электроконтактного манометра 15 в блок автоматики поступает сигнал. При этом обесточится пилотный клапан гидропривода 16 и отсекающие клапаны под действием пружины перекроют измерительный и рабочий трубопроводы. Давление в подводящих к установке трубопроводах повысится, и скважины будут автоматически остановлены: фонтанные — при помощи отсекаателей, установленных на выкидной линии, механизированные — отключением электропривода.

Системой автоматизации установки предусмотрена сигнализация на диспетчерский пункт (ДП) в случае следующих аварийных ситуаций: остановки или отсутствия подачи скважин, отключения электроэнергии, неисправности в системе измерения дебитов скважин.

Примененный в установках «Спутник А» и «Спутник Б» импульсный метод измерения дебита скважин, заключающийся в накоплении жидкости в сепараторе до заданного уровня и импульсном продавливании ее через турбинный расходомер, обеспечивает работу последнего в одном режиме независимо от дебита скважины в большом диапазоне (20—400 м³/сут) одним прибором, рассчитанным на максимальный предел измерения. Работа измерительного сепаратора изображена на рис. 128. Газонефтяная смесь по трубе 1 поступает в сепаратор 2. Пусть в начальный момент жидкость в сепараторе находится на уровне

h_n . Газовый клапан 4 открыт, и газ, выделившийся в сепараторе, по газовой линии 3 поступает в выкидной коллектор 6. Жидкость из-за наличия гидрозатвора 7 не поступает в выкидной коллектор 6, а накапливается в сепараторе 2. Происходит цикл наполнения. При достижении уровня h_b поплавок 9 регулятора закрывает газовый клапан 4, давление газа в сепараторе увеличивается вследствие поступающего с жидкостью газа и жидкость из сепаратора проходит через трубу 8 и продавливается через счетчик 5. При снижении уровня жидкости до h_n открывается газовый клапан и цикл слива прекращается. Этот процесс можно описать системой дифференциальных уравнений:

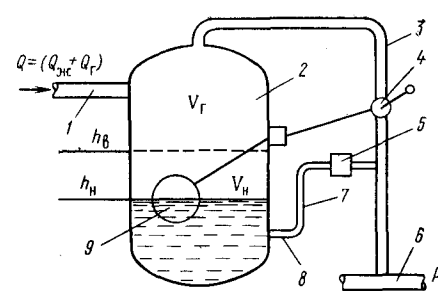


Рис. 128. Схема работы измерительного сепаратора

$$F\rho \frac{dh}{dt} = Q_{ж}; \quad (12.1)$$

$$\frac{1}{RT} \cdot \frac{dV_{г}p_{с}}{dt} = Q_{г} - \beta \sqrt{p_{с} - p_{н}}, \quad (12.2)$$

где F — площадь поперечного сечения сепаратора; ρ — плотность жидкости; h — уровень жидкости в сепараторе; $Q_{ж}$ — дебит жидкости; R — газовая постоянная; T — температура; $V_{г}$ — газовое пространство сепаратора; $p_{с}$ — давление в сепараторе; $Q_{г}$ — дебит газа; β — коэффициент, характеризующий сопротивление при движении газа по газовой линии; $p_{н}$ — давление в выкидном коллекторе.

Система уравнений (12.1), (12.2) записана при допущениях, что сепаратор имеет по высоте одинаковое поперечное сечение и приток газожидкостной смеси в сепаратор не зависит от давления в нем, а определяется либо подачей насосов скважин, либо диаметром штуцеров на фонтанных скважинах. Поскольку уровень жидкости в общем случае является нелинейной функцией объема, уравнение (12.1) можно записать в виде

$$\rho \frac{dV_{н}}{dt} = Q_{ж}. \quad (12.3)$$

С учетом сделанных предположений процесс слива может быть описан следующей системой уравнений:

$$\rho \frac{dV_{н}}{dt} = Q_{ж} - \alpha \sqrt{p_{с} - p_{н}}; \quad (12.4)$$

$$\frac{1}{RT} \frac{dV_{г}p_{с}}{dt} = Q_{г}, \quad (12.5)$$

где α — коэффициент гидравлического сопротивления при сливе жидкости.

Поскольку скорость прохождения жидкости через счетчик влияет на точность измерения, было бы целесообразно оценить время слива. Для этого воспользуемся уравнением Менделеева—Клайперона.

При закрытом газовом клапане непосредственно перед началом слива справедливо следующее равенство:

$$p_{с.н} V_{г.н} = \frac{m_n}{\mu} RT. \quad (12.6)$$

В момент окончания слива непосредственно перед открытием клапана это же уравнение записывается в виде

$$p_{с.к} V_{г.к} = \frac{m_k}{\mu} RT, \quad (12.7)$$

где $p_{с.н}$ и $p_{с.к}$ — давления в сепараторе соответственно в начале и конце слива; $V_{г.н}$ и $V_{г.к}$ — объемы газового пространства в начале и конце слива; m_n и m_k — массы газа в сепараторе в начале и конце слива; μ — молярная масса газа.

Масса газа, поступившего в сепаратор за время слива $t_{сл}$

$$m = m_k - m_n = \int_0^{t_{сл}} Q_{г.т} dt. \quad (12.8)$$

Считая $Q_{г.т} = \text{const}$, с учетом (12.6) и (12.7) получаем

$$t_{сл} = \frac{\frac{\mu}{R} (p_{с.к} V_{г.к} - p_{с.н} V_{г.н})}{Q_{г.т}}. \quad (12.9)$$

Предполагая постоянство давления в сепараторе в конце и начале слива ($p_{с.к} \approx p_{с.н} \approx \text{idem}$) и пренебрегая объемом жидкости, поступившей в сепаратор за время $t_{сл}$, получаем

$$t_{сл} = \frac{\frac{\mu}{RT} p_c \Delta V_{ж}}{Q_{г.т}} = \frac{\frac{\mu}{RT} (p_n + \Delta p_{н.с}) \Delta V_{ж}}{Q_{г.т}}, \quad (12.10)$$

где $\Delta p_{н.с}$ — превышение давления p_c над p_n , $\Delta p_{н.с} = p_c - p_n$; $\Delta V_{ж}$ — порция жидкости, проходящей через счетчик.

Скорость прохождения жидкости через счетчик определится равенством

$$\frac{\Delta V_{ж}}{\Delta t_{сл}} = \frac{RT Q_{г.т}}{\mu p_c} = \frac{RT Q_{г.т}}{\mu (p_n + \Delta p_{н.с})}. \quad (12.11)$$

Из этого выражения видно, что скорость слива, а следовательно, и частота вращения турбинки счетчика пропорциональны объему газа, поступающего в сепаратор в процессе слива. Постоянство частоты вращения турбинки зависит от постоянства дебита скважины по газу, постоянства давления в сепараторе. Последнее условие может быть выполнено применением в установке регулятора давления газа.

В выпускаемых в последнее время групповых измерительных установках «Спутник АМ» установлены на газовой линии регуляторы перепада давления. Это обеспечивает постоянную скорость прохождения жидкости через турбинку счетчика.

Схема применяемого в установке измерителя дебита — турбинного счетчика ТОР изображена на рис. 129. Жидкость проходит через входной патрубок 1, обтекатель 2 и вращает крыльчатку 3. Вращение крыльчатки через собранный на основании 6 понижающий редуктор 5 и магнитную муфту 7 передается на механизм 9 местного отсчета. Жидкость, пройдя крыльчатку, отражается экраном 4 и выходит из корпуса через патрубок 12. Корректировка показаний прибора при поверке осуществляется корректором 11, управление которым вынесено наружу счетчика. Дистанционная передача осуществляется электромагнитным или индукционным преобразователем. Электромагнитный датчик построен на принципе магнитоуправляемых нормально разомкнутых контактов, которые, замыкаясь, выдают электрический сигнал, когда постоянные магниты, закрепленные на диске 10, проходят мимо контактов электромагнитного датчика 8. Магнитоиндукционный преобразователь представляет собой генератор, имеющий постоянный магнит, сердечник и обмотку. Частотные сигналы в этом преобразователе возникают в результате прохождения крыльчатки мимо сердечника. Турбинные счетчики ТОР выпускаются трех типоразмеров от 3 до 75 м³/ч. Относительная погрешность $\pm 2,5\%$ от предела измерения. Рабочее давление 6,4 МПа. Питание электромагнитного преобразователя постоянным током 3,8 МА напряжением 35 В. Блок питания установки подключается к переменному току напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

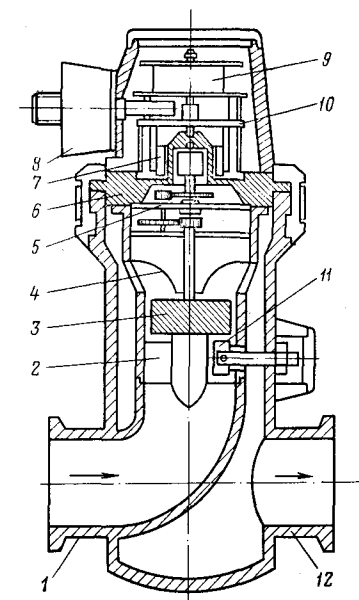


Рис. 129. Турбинный счетчик ТОР

§ 73. Автоматизированная система сбора и обработки информации о производительности нефтяных скважин «Спутник ВМР»¹

Система предназначена для автоматического измерения и регистрации производительности каждой из подключенных к установке нефтяных скважин, а также вычисления суммар-

¹ Написано канд. техн. наук И. Я. Ривкиным.

ного их суточного дебита. Система обеспечивает: разделение продукции скважин по сортам, прием резиновых разделителей для очистки выходных линий скважин от парафина, автоматическую защиту промысловых коллекторов при повышении давления в них выше предельно допустимого, выдачу в систему телемеханики информации о суточном дебите и аварийных сигналов. В качестве измерительного прибора в установке применяют вибрационные массовые расходомеры (ВМР) «РУР-Вибратор-II» (ряд унифицированных расходомеров), измеряющие массу поступающей из скважин газонефтяной смеси и расход отдельных составляющих ее компонентов на потоке без предварительной сепарации.

Групповая измерительная установка (рис. 130) состоит из технологического блока I и блока вторичных приборов и аппаратуры II. Все первичные преобразователи ПП1—ППn вибрационных массовых расходомеров монтируются на приемной емкости ПЕ, чем обеспечиваются надлежащая жесткость закрепления первичного преобразователя и исключение возможности их затопления при снижении объема газа в извлекаемом из скважин флюиде. Приемная емкость через обратный клапан ОК и через задвижку З подключена к промысловому коллектору ПК. Подключение каждой скважины к первичному преобразователю осуществляется через свой обратный клапан ОК и управляемый трехходовой клапан ТК. Последний позволяет любую скважину или все скважины одновременно переключать с измерения на промысловый коллектор, что бывает необходимо при ремонте или проверке одного из первичных преобразователей. К ПК подключен дистанционный датчик давления ДД. В блоке вторичных приборов и аппаратуры II размещены блоки предварительной обработки БПО1 и БПОn по одному на каждую скважину, коммутатор и полукомплект телемеханики ТМ, обеспечивающий передачу информации, получаемой от вибрационного массового расходомера на диспетчерский пункт ДП промысла. Каждый блок предварительной обработки включает в себя аналоговый АП и цифровой ЦП преобразователи. С выхода последнего комплекта за время, отведенное для измерения расхода одной скважины, числа, пропорциональные массовому расходу смеси (N_G) и ее средней плотности (N_p), через коммутатор передаются на ДП промысла, где они обрабатываются по соответствующему алгоритму для получения расхода отдельных компонентов смеси. В блоке II размещены также преобразователь напряжения в частоту ПНЧ и цифровой преобразователь давления ЦПД, позволяющие передавать на ДП усредненное за время измерения значение коллекторного давления. Если за время измерения вибрационный массовый расходомер, подключенный к данной скважине, показал дебит, меньший минимально возможного, то через ТМ на ДП вне очереди идет аварийный сигнал АС — остановка скважины.

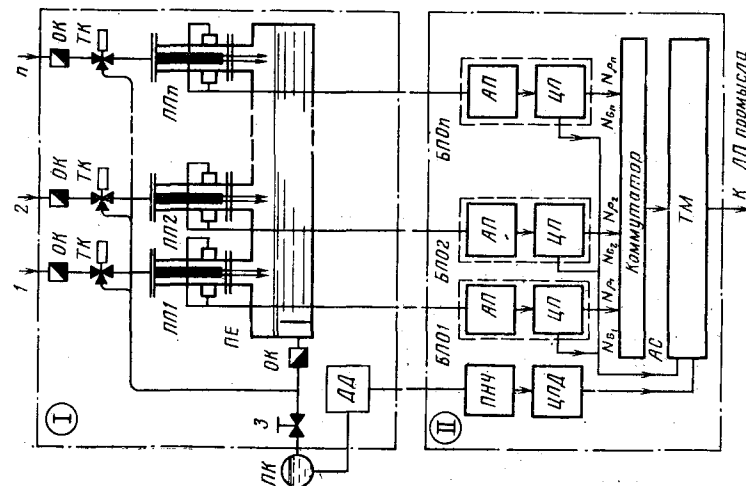


Рис. 130. Блок-схема групповой установки «Спутник ВМР»

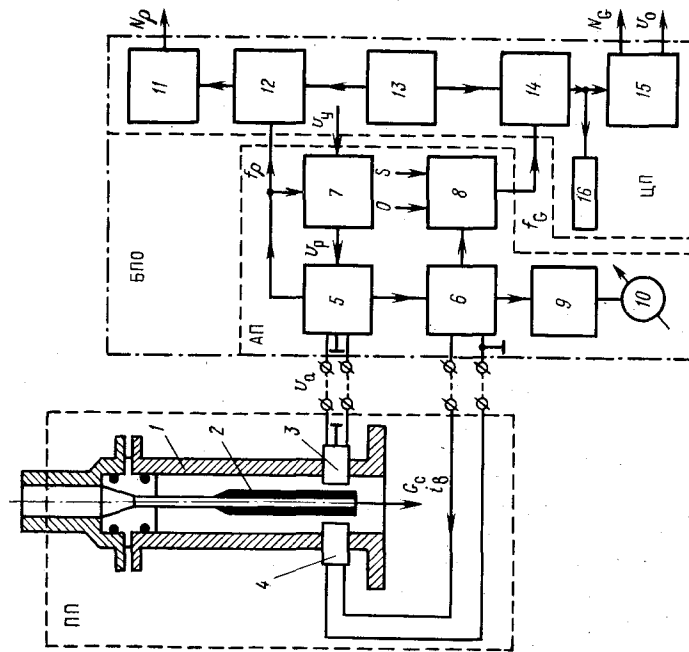


Рис. 131. Блок-схема измерительной системы вибрационного массового расходомера

В этой групповой измерительной установке информация о работе каждой скважины может быть получена только после обработки данных по этой скважине на диспетчерском пункте. Скважина при этом оказывается непрерывно подключенной к групповой измерительной установке, и объем памяти и мощность ЭВМ на диспетчерском пункте непомерно возрастают. Значительно рентабельнее иметь на каждой установке микро-ЭВМ, которая будет выполнять все служебные функции и вычислительные работы, связанные с обработкой получаемой с каждой скважины информации. На диспетчерский пункт по определенной программе или по запросу передается только интересующая промысел информация. В настоящее время ведутся работы по реализации такого варианта информационно-измерительной системы.

Блок-схема ВМР (рис. 131) состоит из первичного преобразователя ПП и блока предварительной обработки информации БПО, включающего в себя аналоговый АП и цифровой ЦП преобразователи. Первичный преобразователь состоит из герметичного корпуса 1, в котором консольно закреплен вибратор 2; через его внутреннюю полость проходит подлежащая измерению газожидкостная смесь, массовый расход которой обозначен G_c . В корпус вмонтированы два электромагнита: адаптер 3 и возбудитель 4. Эти электромагниты связаны между собой с помощью размещенных в аналоговом преобразователе АП регулируемого усилителя 5 и усилителя мощности 6. Эта цепь образует вместе с вибратором 2, электромеханический генератор синусоидальных колебаний. Частота колебаний этого генератора определяется собственной частотой колебаний вибратора, которая в свою очередь зависит при прочих равных условиях от массы вибратора, а следовательно, от массы (плотности) заполняющей полость вибратора среды. Каждая частица среды, проходящая через вибратор, начинает принимать участие в его колебаниях, на что тратится определенная часть колебательной энергии системы (увеличивается ее коэффициент затухания). Иными словами, при участии частиц среды одновременно в двух движениях (поступательном и круговом) возникают силы Кориолиса, направленные в сторону уменьшения вызывающей их причины. Чем больше частиц среды пройдет через вибратор в единицу времени, тем больше указанные потери. Эти потери, следовательно, могут служить мерой массового расхода смеси, а собственная частота колебаний вибратора — мерой плотности этой смеси. Аналоговый преобразователь снабжен блоком автоматической регулировки усиления 7, который с помощью регулирующего напряжения U_p изменяет коэффициент усиления усилителя 5, а следовательно, и ток в цепи возбудителя 4 таким образом, чтобы напряжение адаптера U_a , пропорциональное модулю скорости колебания вибратора, оставалось бы постоянной. Эта величина зависит от напряжения уставки U_y . При изменении потерь (массового расхода смеси) изменяется и ток возбу-

дителя i_b , который так же, как будет показано, служит мерой массового расхода смеси. Напряжение, пропорциональное этому току, поступает на преобразователь «напряжение—частота» 8 и на преобразователь «напряжение—ток» 9. Частота f_G , снимаемая с преобразователя 8, пропорциональна массовому расходу смеси. С помощью потенциометров O и S в преобразователе 8 можно изменять нулевую частоту (при $i_b=0$) и крутизну преобразования ($f_G=ni_b$, где n — коэффициент преобразования). На выходе преобразователя 9 включен миллиамперметр — указатель мгновенного расхода проходящей через вибратор смеси 10.

На вход цифрового преобразователя поступают два переменных по частоте сигнала f_G и f_p . Последний, пропорциональный плотности проходящей через вибратор смеси, снимается с усилителя 5 до управляемого каскада. Цифровой преобразователь снабжен таймером 13, двумя счетчиками — делителями 12 и 14 и двумя счетчиками-накопителями 11 и 15. Таймер открывает входы счетчиков 12 и 14 на фиксированное время (100, 1000 и 10 000 с). В зависимости от устанавливаемого на таймере времени коэффициент деления счетчиков 12 и 14 равен 1; 10 или 100. Таким образом, вне зависимости от времени измерения на счетчиках 11 и 15 набирается одно и то же число (N_G и N_p), соответствующее усредненным за время измерения расходу смеси и ее плотности. Изменяя крутизну S преобразователя 8, можно величину N_G получить в именованных единицах (например, т/сут). На выход счетчика делителя 14 включен также электромеханический счетчик 16, на котором можно фиксировать расход (значение величины N_G). При желании можно, отключив таймер, использовать ВМР как счетчик массы прошедшей через него смеси. Если накопленное в счетчике 15 число меньше допустимого для данной скважины минимума расхода (который в виде уставки фиксируется в этом счетчике), то на выходе счетчика появится аварийный сигнал U_0 .

Существовавшие до сих пор ВМР позволяли измерять массовый расход только однофазных сред. При переходе к двухфазным смесям возникают большие погрешности измерения, что исключает целесообразность практического использования этих ВМР. Это связано с тем, что в общем случае двухфазная проходящая через вибратор смесь является, в свою очередь, колебательной системой (с распределенной массой и упругостью). При возбуждении такой системы стенками вибратора возникают поперечные (по отношению к оси трубы) колебания. Частота и амплитуда этих колебаний не совпадают, как правило, с частотой и амплитудой колебаний вибратора. Поперечные колебания среды создают дополнительные, не связанные с массовым расходом, смеси, потери энергии, которые зависят от ряда причин, среди которых существенную роль играет обычно неизвестное значение газосодержания (величины отношения расходов газовой и жидкой фазы) среды. Поэтому связь между стабили-

зирующим моментом системы и массовым расходом такой среды становится неоднозначной.

Во ВНИИКАНефтегазе теоретико-экспериментальными исследованиями было показано, что измерять с помощью ВМР без предварительной сепарации импульсирующие газожидкостные потоки можно при соблюдении следующих трех условий:

произведение частоты колебания вибратора на размер его отверстия в плоскости колебаний должно быть меньше 200; при больших расходах, когда проходное сечение вибратора должно быть большим, это условие может быть выдержано путем изготовления вибратора вытянутого сечения или установки в круглом сечении большого диаметра перегородок, перпендикулярных к плоскости колебания;

измерение не мгновенных, а средних за определенный промежуток времени расходов; время интегрирования при этом должно выбираться в зависимости от частоты следования пробок с таким расчетом, чтобы пропадание одной пробки мало сказывалось бы на результате замера; например, для среды вода — воздух это время равно примерно 100 с, для нефтегазовых смесей 1000 с;

сечение отверстия вибратора должно быть выбрано таким, чтобы скорость течения двухфазной среды внутри вибратора была бы такой, при которой отношение скоростей газовой фазы и смеси было бы примерно постоянным (автомодельный режим течения).

При соблюдении этих условий газожидкостная смесь ведет себя как квазигомогенная, несжимаемая жидкость с переменной плотностью.

При соблюдении этих условий работа ВМР может быть описана следующим дифференциальным уравнением моментов:

$$J\ddot{\varphi} + (b_0 + b_G)\dot{\varphi} + \omega\varphi = M_B = k\varphi,$$

где $J = (m + m_*) l^2/3$ — момент инерции трубы относительно оси вращения; l — длина трубы; m и m_* — массы единицы длины трубы и единицы длины струи смеси; φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ — соответственно угол, скорость и ускорение поворота трубы; b_0 — потери, связанные с наличием сил сопротивления, вызывающими рассеивание механической энергии колебательной системы; $b_G = m_* v l^2 = l^2 G_{ж}$ — потери, связанные с силой Кориолиса ($-2m_* v\varphi$); v — скорость течения струи; ω — коэффициент жесткости упругого подвеса; $G_c = m_* v$ — массовый расход смеси; $M_B = k\varphi$ — момент, развиваемый возбудителем при протекании через него тока i_B , пропорционального скорости колебания вибратора; k — коэффициент пропорциональности.

Установившийся режим такой системы возможен только в том случае, если M_B изменяется так, чтобы всегда выдерживалось условие

$$b_0 + l^2 G_c - k = 0, \quad (12.12)$$

что обеспечивается описанной системой регулирования. В этом случае уравнение частот системы будет описываться уравнением

$$J\ddot{\varphi} + \omega\varphi = 0, \text{ решение которого показывает, что}$$

$$f^2 = f_0^2 = \omega/(2\pi J), \quad (12.13)$$

система колеблется на резонансной частоте. Из (12.12) можно записать, что $G_c = (k - l_0)/l^2$ или, так как ток возбуждения i_B пропорционален величине k , а величина N_G , зафиксированная счетчиком 15 (см. рис. 131), пропорциональна этому току,

$$G_c = m(N_G - N_{G_0}), \quad (12.14)$$

где N_{G_0} — показания счетчика при $G_c = 0$.

Имея в виду, что момент инерции

$$J = \frac{ml^3}{3} \left(1 + \frac{m_c}{m}\right) = J_0(1 + c\rho_c),$$

где $J_0 = ml^3/3$ — момент инерции пустого вибратора; m_c — масса единицы длины газожидкостной смеси; ρ_c — плотность смеси, можно переписать (12.13) в виде

$$\rho_c = c_1 \left[(f_{\rho_0}/f_{\rho_c})^2 - 1 \right],$$

где c_1 — коэффициент пропорциональности; f_{ρ_0} — частота колебания пустого вибратора; f_{ρ_c} — частота колебания вибратора, заполненного газожидкостной смесью.

Имея в виду, что при заполнении вибратора чистой жидкостью его частота будет равна $f_{\rho_{ж}}$ и что на выходе счетчика 11 в перечисленных случаях (при $G_c = 0$; G_0 и $G_c = G_{ж}$) будут фиксироваться значения N_{ρ_0} , N_{ρ_c} и $N_{\rho_{ж}}$, можно записать, что при небольшой девиации частоты (\sim до 5 %) при заполнении вибратора чистой жидкостью

$$\rho_c/\rho_{ж} \cong \Delta N_{\rho_c}/\Delta N_{\rho_{ж0}}, \quad (12.15)$$

где $\Delta N_{\rho_c} = N_{\rho_0} - N_{\rho_c}$; $\Delta N_{\rho_{ж0}} = N_{\rho_0} - N_{\rho_{ж0}}$; $\Delta N_{\rho_{ж0}}$ — девиация частоты при заполнении вибратора жидкостью с плотностью $\rho_{ж0}$ (плотность жидкости при градуировке прибора). Если при реальных условиях $\rho_{ж} \neq \rho_{ж0}$, то $\Delta N_{\rho_{ж}} = \Delta N_{\rho_{ж0}} \rho_{ж}/\rho_{ж0}$. С другой стороны, известно, что

$$\rho_c/\rho_{ж} = 1 - (1 - \rho_{гр}/\rho_{ж}) \varphi_p \quad (12.16)$$

или

$$\varphi_p = \frac{1 - \rho_c/\rho_{ж}}{1 - \rho_{гр}/\rho_{ж}},$$

где $\varphi_p = S_{гр}/S$ — объемная истинная концентрация смеси (истинное газосодержание); $S_{гр}$ — интегральная площадь сечения отверстия вибратора, занятая газом при давлении p ; S — сечение отверстия вибратора; $\rho_{ж}$ — плотность жидкой фазы;

$\rho_{гр}$ — плотность газа внутри вибратора при давлении p (безразмерная величина абсолютного давления);

Известно также, что объемная расходная концентрация смеси (расходное газосодержание)

$$\beta = \frac{Q_{гр}}{Q_c} = \frac{Q_{гр}}{Q_{ж} + Q_{гр}} = \frac{\sigma_{ж}}{1 + \alpha_{жр}}, \quad (12.17)$$

или $\alpha_{жр} = \beta/(1-\beta)$, где Q_c , $Q_{ж}$ и $Q_{гр}$ — соответственно объемные расходы смеси жидкой и газовой фаз при давлении p ; $\alpha_{жр} = Q_{гр}/Q_{ж}$ — газосодержание.

Расходное и истинное газосодержания связаны между собой зависимостью $\beta = (v_r/v_c) \varphi_p$, где v_c и v_r — соответственно скорости смеси и газа.

В автоматическом режиме, являющемся одним из условий работы ВМР на газожидкостных смесях, эта связь однозначна. Она может быть описана полиномом второй степени:

$$\beta = a_0 + a_1 \varphi_p + a_2 \varphi_p^2, \quad (12.18)$$

где коэффициенты полинома a_0 , a_1 и a_2 связаны между собой зависимостью $a_0 + a_1 + a_2 = 1$.

В случае, если мы имеем дело с двухфазной, двухкомпонентной смесью, то выражений (2.14) — (2.18) достаточно для нахождения расхода обоих компонентов.

Поскольку $G_{ci} = G_{жи} + G_{ги} = G_{жи} (1 + G_{ги}/G_{жи})$, имея в виду, что $G_{ги} = Q_{гip} \rho_{гip}$ и $G_{жи} = Q_{жи} \rho_{жи}$, можно определить массовый расход жидкой фазы из выражения

$$G_{жи} = \frac{G_{ci}}{1 + \frac{\rho_{гip}}{\rho_{ж}} \alpha_{жр}}, \quad (12.19)$$

где $\alpha_{жр} = \rho \alpha_{жр}$.

Объемный расход газовой фазы при этом

$$Q_{гip} = Q_{жи} \alpha_{жр} = \frac{G_{жи}}{\rho_{ж}} \alpha_{жр}. \quad (12.20)$$

Если жидкая фаза составлена из двух различных по плотности жидкостей, то невозможно найти расход всех трех компонентов $G_{ж1}$, $G_{ж2}$, $G_{гip}$, имея только два уравнения (12.14) и (12.15). В этом случае становится неизвестной плотность жидкой фазы $\rho_{ж}$, которая в зависимости от соотношения в ней тяжелой и легкой составляющих изменяет свое значение.

Применительно к нефтегазовым смесям

$$\rho_{ж} = \rho_{в} - (\rho_{в} - \rho_{н}) (1 - \sigma), \quad (12.21)$$

где $\rho_{в}$ и $\rho_{н}$ — соответственно плотности воды и нефти; $\sigma = S_{в}/S_{ж} = Q_{в}/Q_{ж}$ — водосодержание, численно равное отношению площади трубопровода, занятой водой $S_{в}$, к площади, занятой всей

жидкой фазой $S_{ж}$ или отношению объемных расходов воды $Q_{в}$ и всей жидкой фазы $Q_{ж}$.

Если с помощью какого-либо проточного пробоотборника можно измерить плотность жидкой фазы или водосодержание, то, введя поправку на $\Delta N_{\rho_{ж0}}$, указанную в (12.15), определяют $\alpha_{жр}$ по (12.17), $G_{ж}$ — по (12.19) и $Q_{гр}$ — по (12.20). Затем находят с учетом (12.21) расход отдельных компонентов жидкой фазы:

$$G_{в} = Q_{в} \rho_{в} = \frac{G_{ж}}{\rho_{ж}} \rho_{в} \sigma; \quad (12.22)$$

$$G_{н} = G_{ж} - G_{в}.$$

Зная обводненность σ , можем найти значение действующего газового фактора в точке замера:

$$\alpha_{0p} = Q_{гр}/Q_{н} = \alpha_{жр}/(1 - \sigma). \quad (12.23)$$

На нефтяных промыслах, где забойное давление выше давления насыщения и работы ведутся без закачки газа в пласт, газовый фактор $\alpha = Q_{г}/Q_{н}$ является известной и весьма медленно изменяющейся величиной. В этом случае, зная характер кривой реагирования, которую также можно представить полиномом второго порядка

$$\alpha_{0p} = \alpha (b_0 + b_1 p + b_2 p^2),$$

можно величину $\alpha_{жр}$ выразить через α_{0p} и σ :

$$\alpha_{жр} = \alpha_{0p} (1 - \sigma). \quad (12.24)$$

Подставив (12.21) в (12.16) и (12.24) в (12.15), можно на основании (12.18) получить квадратное уравнение относительно $(1 - \sigma)$. После определения обводненности находят значение всех компонентов смеси.

На нефтяных промыслах Азербайджана для автоматического раздельного измерения дебита нефти и воды применяют *групповые установки АГМ* (рис. 132). К одной установке подключается от 8 до 16 скважин. Результаты измерений автоматически передаются на диспетчерский пункт. На измерительном сепараторе 21 устанавливается датчик 19 для измерения уровня нефти и воды. Каждый сепаратор может обслуживать 8—16 скважин. В соответствии с этим на групповой установке должно быть смонтировано 8—16 мембранных исполнительных механизмов (МИМ) 16 для подключения каждой скважины к сепаратору. Кроме того, на ней устанавливаются электрический блок 6 управления установок, пневматический распределительный блок 8, сигнализаторы нулевого 18 и аварийного 19 уровней жидкости в сепараторе и блок электропитания 5. При подаче сжатого газа на мембранную головку соответствующего исполнительного механизма выбранная скважина отключается от общего коллектора 2 и присоединяется к измерительному сепара-

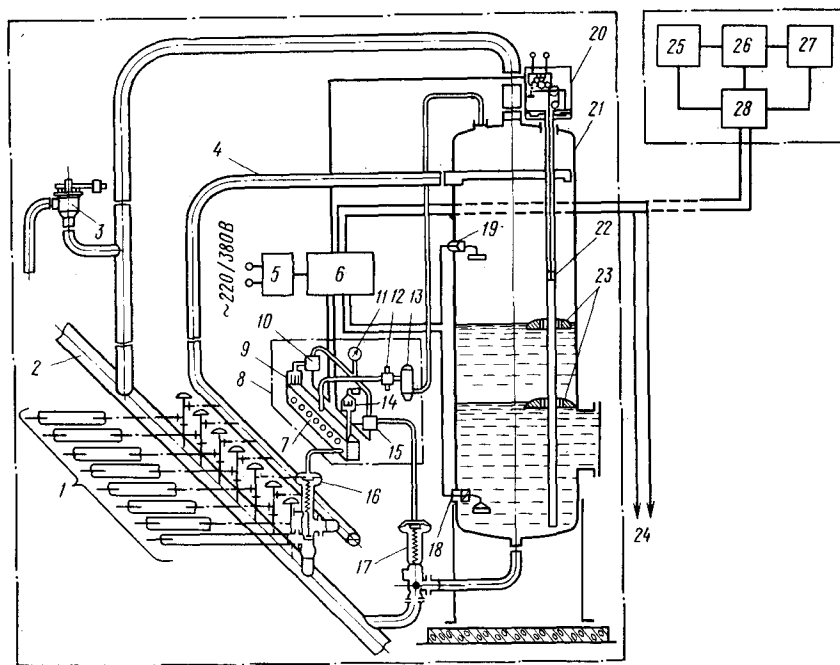


Рис. 132. Схема установки АГМ:

1 — выкидные линии скважин; 2 — общий коллектор; 3 — предохранительный клапан; 4 — коллектор; 5 — блок электропитания; 6 — электрический блок управления; 7 — пневматический шаговый распределитель; 8 — пневматический распределительный блок; 9 — сильфонный привод ПШР; 10, 15 — электропневматические клапаны; 11 — манометр; 12 — редуктор; 13 — фильтр; 14 — сигнализатор положения ПШР; 16, 17 — мембранные исполнительные механизмы (МИМ); 18 — сигнализатор нулевого положения уровня; 19 — сигнализатор аварийного уровня; 20 — датчик уровня; 21 — сепаратор; 22 — индикатор датчика; 23 — поплавки с магнитами; 24 — линия связи; 25 — генератор фиксированных частот; 26 — программное устройство; 27 — регистратор дебита; 28 — пульт управления

тору. На установке имеется также мембранный исполнительный механизм для управления сливом жидкости из сепаратора. Мембранные исполнительные механизмы распределительных клапанов управляются пневматическим шаговым распределителем (ПШР) 7, сильфонный привод которого приводится в действие электропневматическим клапаном 15. Последний, получив электрический импульс, переводит ПШР из одного положения в другое. ПШР имеет 16 (или 32, в зависимости от числа контролируемых скважин) положений, 8 из которых соответствует подключению скважины к сепаратору и 8 — опорожнению сепаратора. Очередь подключения скважин к сепаратору зависит от первоначально выбранной последовательности присоединения клапанов МИМ и ПШР. Клапан МИМ, устанавливаемый на линии спуска нефти из сепаратора, управляется ПШР и электропневматическим клапаном 10. На диспетчерском пункте размещаются пульт управления 28, программное устройство 26, регистратор дебита 27 и генератор фиксированных частот 25.

Схема измерительных устройств сепаратора изображена на рис. 133. В измерительный сепаратор 1 опущена труба 4 из немагнитного материала. Вдоль трубы могут перемещаться два поплавка 8 и 10 с смонтированными в них постоянными магнитами 9 и 7. Плотность поплавка 8 меньше плотности нефти, поэтому он плавает на поверхности. Средняя плотность поплавка 10 подобрана такой, что он плавает на воде, но погружается в нефть, т. е. он все время находится на разделе воды и нефти. Перед измерением дебита, когда сепаратор опорожнен, при помощи синхронного двигателя, вращающего барабан 2, на проволоке 5 опускают в трубу 4 якорь 6. После заполнения сепаратора жидкостью до определенного нижнего уровня включается синхронный двигатель, приводящий во вращение барабан 2, и якорь 6 поднимается вверх. При прохождении мимо первого и второго поплавков движение якоря затормаживается магнитными силами, вследствие чего пружина 3 сжимается. При этом замыкается контакт КВН и размыкается контакт КРД контактного устройства. Контакты срабатывают в момент прохождения якорем линии раздела воды с нефтью (поплавка 10) и уровня жидкости в сепараторе (поплавка 8). Замыканием и размыканием контактов посылаются сигналы на диспетчерский пункт. К измерительному сепаратору при помощи электропневматического распределителя ЭПР и кранов МИМ может быть присоединена любая из восьми скважин данной групповой установки (№ 1, № 2, ..., № 8). При подаче импульса на электромагнит ЭПР для измерения подключается очередная скважина. Электропневматический клапан ЭПК предназначен для подачи воздуха на мембранную головку клапана МИМ, соединяющего выходную линию сепаратора со сборным коллектором. Момент опорожнения сепаратора фиксируется размыканием контакта КВО. Синхронный двигатель, вращающий барабан 2, останавливается концевым выключателем КВР.

Уровень и передача показаний измеряются времяимпульсным методом. При подаче сигнала «измерение» датчик уровня приводится в действие. Промежуток времени от начала пуска до получения сигнала «уровень воды» определит высоту столба воды, а промежуток времени между сигналами «уровень воды» и «уровень нефти» — высоту столба нефти в трапе. Сепаратор для измерения с диспетчерского пункта (ДП) выбирается частотным методом. Каждая измерительная установка, подключенная к линии, идущей с ДП, имеет свою частоту. Посылкой с ДП сигнала определенной частоты достигается подключение определенной групповой установки к измерительной аппаратуре, установленной на ДП. Сигнал необходимой частоты посылается имеющимся на ДП программным устройством. Время подключения скважины к сепаратору, измерения и опорожнения сепаратора, а также последовательность измерения уровня в сепараторах устанавливаются программным устройством. Для измерения дебита данной скважины программное устройство посылает

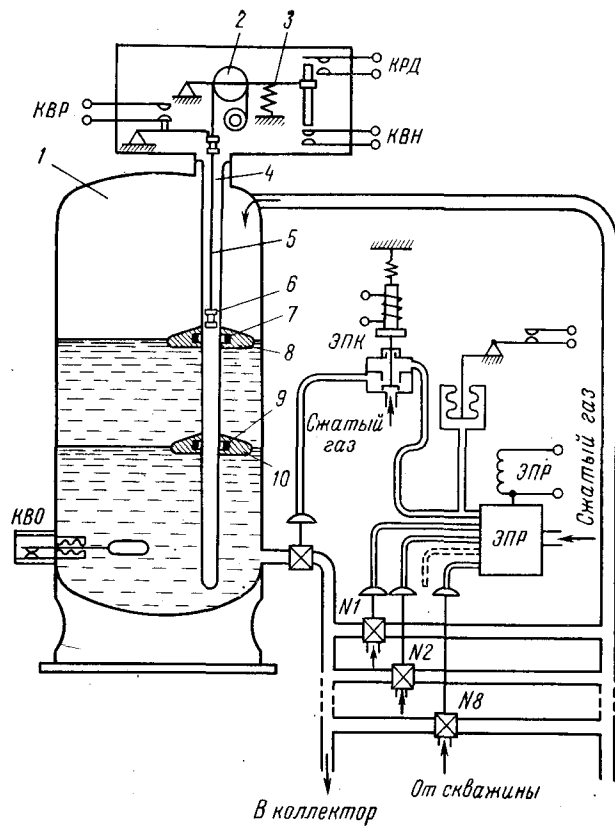


Рис. 133. Схема измерительных устройств сепаратора

импульс определенной частоты, соответствующий частоте, на которую настроен блок телемеханики того сепаратора, в групповую установку которого входит выбранная скважина. Этот импульс переводит ПШР в положение «наполнение», при котором сжатый газ через ПШР поступает в МИМ распределительного клапана выбранной скважины и жидкость от нее начинает поступать в мерный сепаратор. По истечении заданного времени программное устройство отключает скважину от трапа и присоединяет к общему коллектору. Подача жидкости в сепаратор прекращается, и он остается наполненным. После этого автоматически включается телеизмерительное устройство, которое измеряет уровень воды и нефти в сепараторе. В то же время регистратор печатает номер сепаратора и номер скважины. По окончании измерения уровней нефти и воды жидкость из сепаратора сливается в общий коллектор. Этим завершается цикл измерения ее дебита.

§ 74. Автоматизированные сепарационные установки

Газоводонефтяная смесь, как это было показано в типовой технологической схеме автоматизированного нефтедобывающего предприятия (см. рис. 116), после измерения дебита на групповых измерительных установках поступает в сепарационные установки, где нефть отделяется от газа и частично от воды. Это разделение осуществляется для получения нефтяного газа, используемого как топливо или как химическое сырье; уменьшения перемешивания нефтегазового потока и снижения возможности образования нефтяных эмульсий; уменьшения пульсации давления при транспортировании нефтегазоводяной смеси по сборным коллекторам до дожимной насосной станции (ДНС) или установок подготовки нефти (УПН).

Эффективность работы сепаратора характеризуется степенью уноса капельной жидкости $k_{ж}$ и окклюдированных пузырьков газа $k_{г}$ [22], которые определяются следующими отношениями:

$$k_{ж} = q_{ж}/V_{г}; \quad k_{г} = q_{г}/Q_{ж}, \quad (12.25)$$

где $q_{ж}$ и $q_{г}$ — соответственно объемные расходы капельной жидкости и пузырьков газа, уносимые за пределы сепаратора (отнесенные к условиям в сепараторе); $V_{г}$ и $Q_{ж}$ — объемные расходы газа и жидкости, отнесенные к условиям в сепараторе.

Качество сепаратора характеризуется минимальным диаметром капель жидкости, задерживаемых в сепараторе; максимально допустимым значением средней скорости газового потока в свободном сечении или в каплеуловительной секции сепаратора и временем пребывания жидкой фазы в сепараторе, за которое происходит допустимое отделение свободного газа от жидкости. Значение удельного уноса капельной жидкости $k_{ж}$ не должно превышать 50 см^3 на 1000 м^3 газа, в то время как удельный унос свободного газа потоком жидкости в сепараторе рекомендуется принимать равным $k_{г} \leq 200 \text{ л}$ на 1 м^3 жидкости. Одни и те же значения $k_{ж}$ и $k_{г}$ можно получить в сепараторах разной конструкции. Однако эффективной конструкцией сепаратора принято считать такую, которая при высокой степени очистки газа и жидкости и значительной производительности имеет меньшую металлоемкость и дешевле в изготовлении. Эффективная очистка газа от капельной жидкости и жидкости от пузырьков газа происходит в таких сепараторах при больших скоростях движения жидкости и газа.

Эффективным высокопроизводительным сепаратором является гидроциклонный двухъемкостный сепаратор, разработанный в институте Гипровостокнефть (рис. 134), который применяется как на сепарационных установках, так и на групповых измерительных установках типа «Спутник А» и «Спутник Б».

Нефтегазовая смесь поступает в гидроциклонную головку 7, в которой под действием центробежных сил она разделяется на нефть и газ. Далее нефть и газ движутся отдельно и посту-

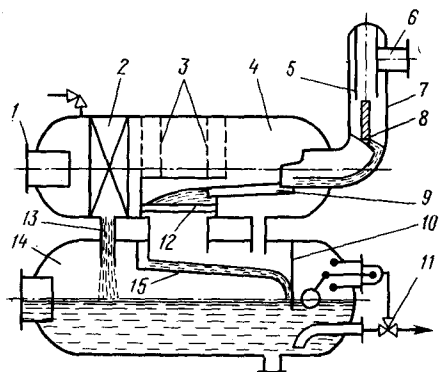


Рис. 134. Схема гидроциклонного двухъярусного сепаратора:

1 — отвод газа; 2 — жалюзийная насадка; 3 — перфорированные сетки для улавливания капельной жидкости; 4 — верхняя емкость сепаратора; 5 — направляющий патрубок; 6 — тангенциальный ввод газонефтяной смеси; 7 — головка гидроциклона; 8 — отбойный козырек газа; 9 — направляющая полка; 10 — перегородка; 11 — исполнительный механизм; 12 — уголковые разбрызгиватели; 13 — дренажная трубка; 14 — нижняя емкость гидроциклона; 15 — лоток

пают в верхнюю емкость 4. Нефть по сливному лотку 9 направляется на разбрызгиватели 12 и далее по лотку 15 и дренажной трубе 13 стекает в нижнюю емкость 14. Газ проходит через перфорированные сетки 3 для улавливания капельной жидкости, жалюзи 2 и выходит из сепаратора в газовую линию через патрубок 1. Для успокоения колебаний жидкости в нижней емкости предусмотрена перегородка 10. Регулирование уровня обеспечивается регулятором 11. Отсепарированная нефть поступает в нефтяной коллектор через патрубок.

Приведенный гидроциклонный сепаратор используется в автоматизированных блочных сепарационных установках СУ-2. Установки СУ-2, предназначенные для первичной сепарации нефти, выпускаются трех типоразмеров: СУ2-750, СУ2-1500 и СУ2-3000, имеющих производительность соответственно 750, 1500 и 3000 м³/сут (рис. 135). Газонефтяная смесь после групповой измерительной установки поступает в гидроциклонный сепаратор 3. Из нижней сепарационной емкости нефть проходит через фильтр 11 и далее, очищенная от механических примесей, через турбинный расходомер 12 в нефтесборный коллектор. На газовой линии смонтирована камерная диафрагма 5 для измерения объема отсепарированного газа. Для сброса давления в сепарационной емкости в случае превышения допустимого значения предусмотрен предохранительный клапан 2. Для улавливания капель нефти из газа, сбрасываемого через предохранительное автоматическое регулирование уровня нефти в сепараторе, автоматизации блочной сепарационной установки обеспечивается автоматическое регулирование уровня нефти в сепараторе, автоматическая защита установки при аварийном повышении уровня и давления в сепараторе, передача аварийных сигналов на диспетчерский пункт. Уровень в сепараторе регулируется двумя механическими регуляторами уровня 7 и 9, которые размещены на нижней сепарационной емкости и управляют регулирующими клапанами, расположенными на линиях отвода выделившегося газа и отсепарированной нефти. Регуляторы получают управляющие сигналы от поплавковых датчиков 6 и 8. Если уровень

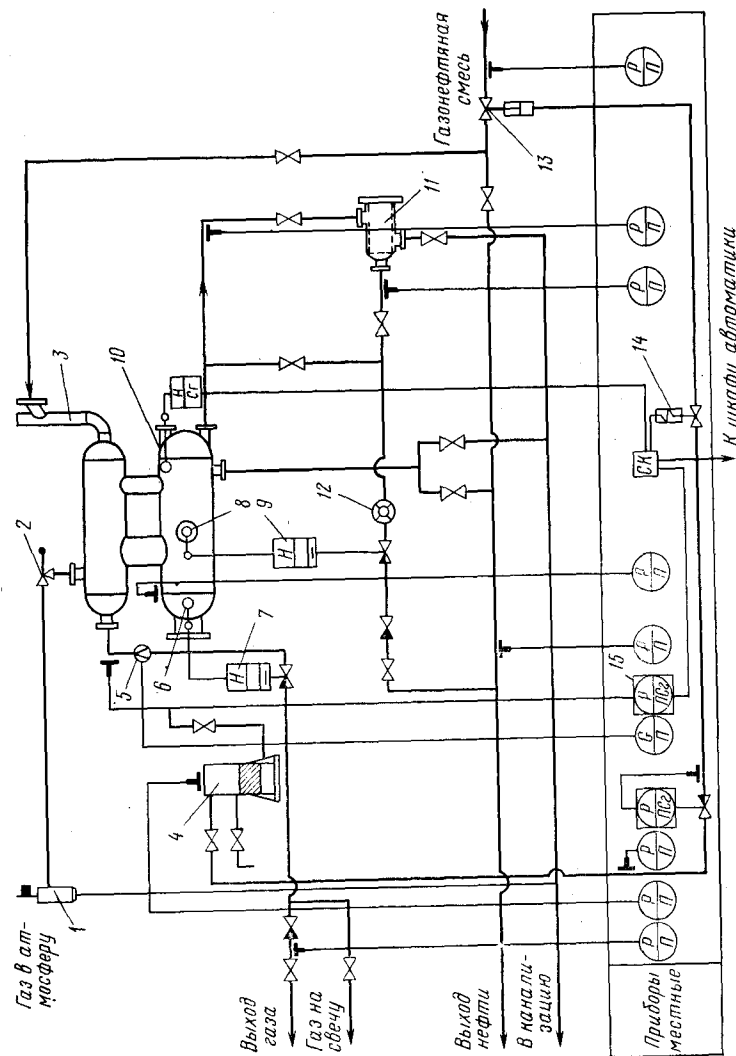


Рис. 135. Схема блочной сепарационной установки СУ-2.

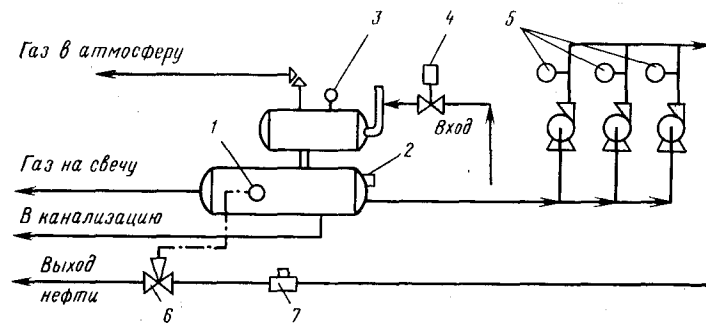


Рис. 136. Схема сепарационной установки с насосной откачкой

жидкости в сепараторе достигнет аварийной отметки, поплавковый сигнализатор 10 уровня типа ПФ-40-СУВЗГ-4 подаст электрический сигнал на соленоидный клапан (СК) 14 КСП-4М, который направит сжатый воздух из осушителя 4 на пневмопривод задвижки 13. При этом будет перекрыта линия, по которой газонефтяная смесь поступает на установку. В случае аварийного превышения давления импульс от электроконтактного манометра 15 воздействует на клапан 14, который подаст сжатый воздух на пневмопривод задвижки 13, и поступление газонефтяной смеси на установку прекратится.

Если после сепарации давление, под которым выходит нефть, недостаточно для дальнейшего движения по промышленной транспортной сети, применяют сепарационные установки типа СУН с откачивающими насосами. Установки выпускаются четырех модификаций: СУН-1-750-6, СУН-2-750-6, СУН-1-1500-6, СУН-2-1500-6. Первая цифра после буквенного шифра указывает на тип гидроциклонного сепаратора — одноемкостный или двухъемкостный (1 и 2), вторая — производительность установки, третья — рабочее давление в сепараторе. Установка (рис. 136) комплектуется двумя или тремя откачивающими насосами типа ПС или МС, смонтированными единым блоком на сварной раме. На установке СУН предусмотрено автоматическое согласование производительности с объемом поступающей в сепаратор жидкости. Это выполняется механическим регулятором уровня 1, установленным в сепараторе с регулирующим клапаном 6 на линии выхода нефти после откачивающих насосов. В случае срыва подачи по сигналу электроконтактных манометров 5, установленных на выкиде насосов, последние будут остановлены. При аварийной остановке рабочего насоса схемой автоматики предусмотрено включение резервного. Автоматическая защита установки при аварийном уровне в сепараторе осуществляется датчиком предельного уровня 2 ДПУ-1М, включающим с помощью соленоидного пилотного клапана КСП-4 задвижку с пневмоприводом 4 типа ПИТ-1, установленную на линии входа газонефтяной смеси в сепаратор. Защита от аварийного превы-

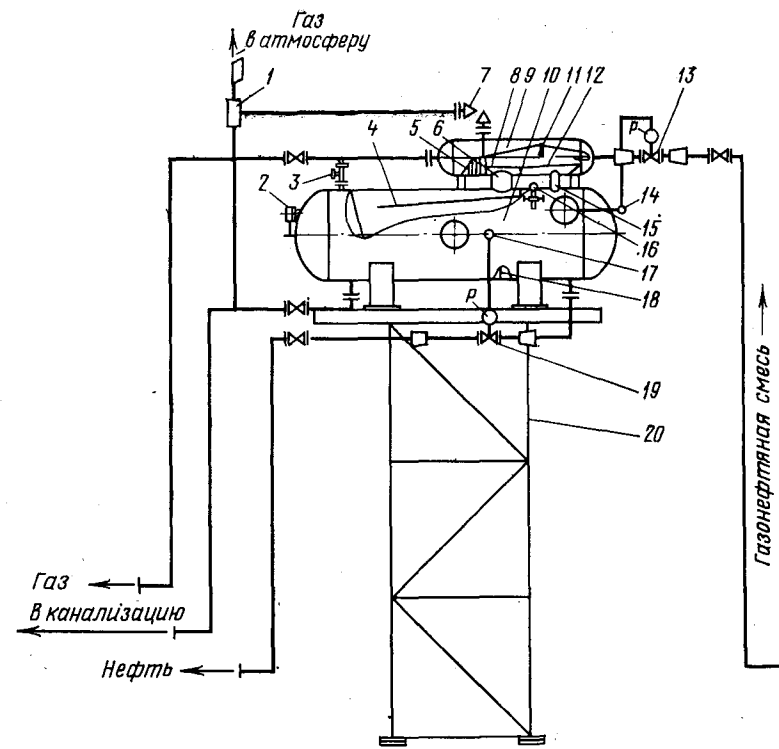


Рис. 137. Схема автоматизированной блочной концевой сепарационной установки

шения давления осуществляется электроконтактным манометром. При этом, как и в случае аварийного превышения уровня, перекрывается входная линия. При аварийном разливе жидкости в сепараторе, превышении в нем допустимого давления, аварийном отключении насоса — во всех этих случаях на диспетчерский пункт посылается сигнал аварии. На установке предусмотрен местный контроль объема отсепарированной нефти с помощью турбинного счетчика 7. Объем отсепарированного газа определяется с помощью переносного дифманометра ДТ-50, подключаемого к установленной на выходе газа камерной диафрагме ДКН-10.

Давление в сепараторе наблюдается по манометру 3. Автоматизированные концевые блочные сепарационные установки КСУ предназначены для конечной сепарации газа из нефти при атмосферном либо избыточном давлении 5—15 кПа (рис. 137). Сепарационный блок состоит из двух горизонтальных сепарационных емкостей 9 и 10, размещенных друг над другом и соединенных сточным патрубком 6. Верхняя емкость служит для отделения отсепарированного газа от сопутствующих капель

жидкости. Для этого в ней установлены отбойники грубой 11 и тонкой 5 очисток газа. Нижняя сепарационная емкость обеспечивает полную сепарацию нефти. Сепарационный блок устанавливается на высоком основании 20 для обеспечения движения отсепарированной нефти самотеком до резервуарного парка. В зависимости от условий работы газосборной системы высота оснований бывает 6; 9; 12 или 15 м. Поступающая нефть по лотку 12 попадает на распределитель 8, обеспечивающий равномерный сток ее через патрубок 6 в нижнюю емкость. Далее нефть движется по лотку 4 тонким слоем, что повышает эффективность сепарации. Патрубок 15 предусмотрен для выхода отсепарированного газа из нижней в верхнюю емкость и для выравнивания давления в них. Для осаждения из нефти и удаления механических примесей в нижней емкости установлена перегородка 18. Системой автоматики предусмотрены регулирование уровня нефти в сепараторе и автоматическая защита при аварийном превышении уровня. Механический регулятор 17 с исполнительным механизмом 19, установленным на сливной линии, поддерживают заданный уровень в сепараторе. Механический регулятор 14 с исполнительным механизмом 13 на входе в сепаратор обеспечивают защиту при аварийном разливе нефти в сепараторе. Для измерения уровня нефти в сепараторе применяется буйковый уровнемер 3 типа УБ-51-04. Для сигнализации об аварийном превышении уровня жидкости используется датчик 2 типа ДПУ-1, для сигнализации о предельном давлении — электроконтактный манометр 16 типа ВЭ-16-РБ. На верхней сепарационной емкости установлен предохранительный клапан 7 для сброса газа при избыточном давлении. Для улавливания имеющихся в сбрасываемом газе капель предусмотрен расширитель 1. Автоматизированные блочные концевые сепарационные установки выпускаются производительностью 1000, 2000 и 5000 м³/сут.

Автоматизированная блочная установка для сепарации и предварительного обезвоживания нефти БАС-1-100 позволяет уменьшить количество воды, содержащейся в нефти, поступающей на установки подготовки (обезвоживания) нефти, что улучшает режим работы последних и обеспечивает значительную экономию топлива (рис. 138). Нефть после сепарационных установок предварительно смешивается с горячей пластовой водой, поступающей с установок подготовки нефти, и направляется в отсек 7 на полки 6, где из нее выделяется газ и поступает в газосборную сеть. Перепад давления между двумя отсеками, разделенными перегородкой 8, поддерживается регулятором 2 типа РУМ-17, за счет чего частично дегазированная нефть через разделительный патрубок 15 поступает в отсек 9. Здесь регулятором 12 типа РУР-1 поддерживается заданный уровень горячей пластовой воды. При движении эмульсии через этот слой воды происходит интенсивное перемешивание, глобулы воды сталкиваются, укрупняются и осаждаются. Частично обезвоженная

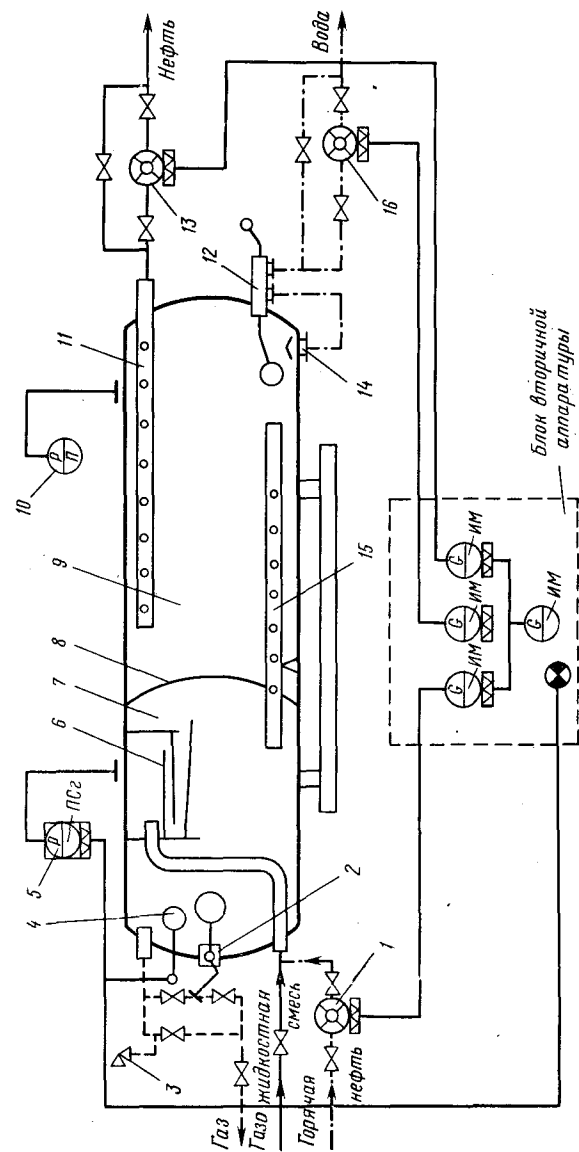


Рис. 138. Схема автоматизированной блочной сепарационной установки с предварительным сбросом пластовой воды БАС-1-100

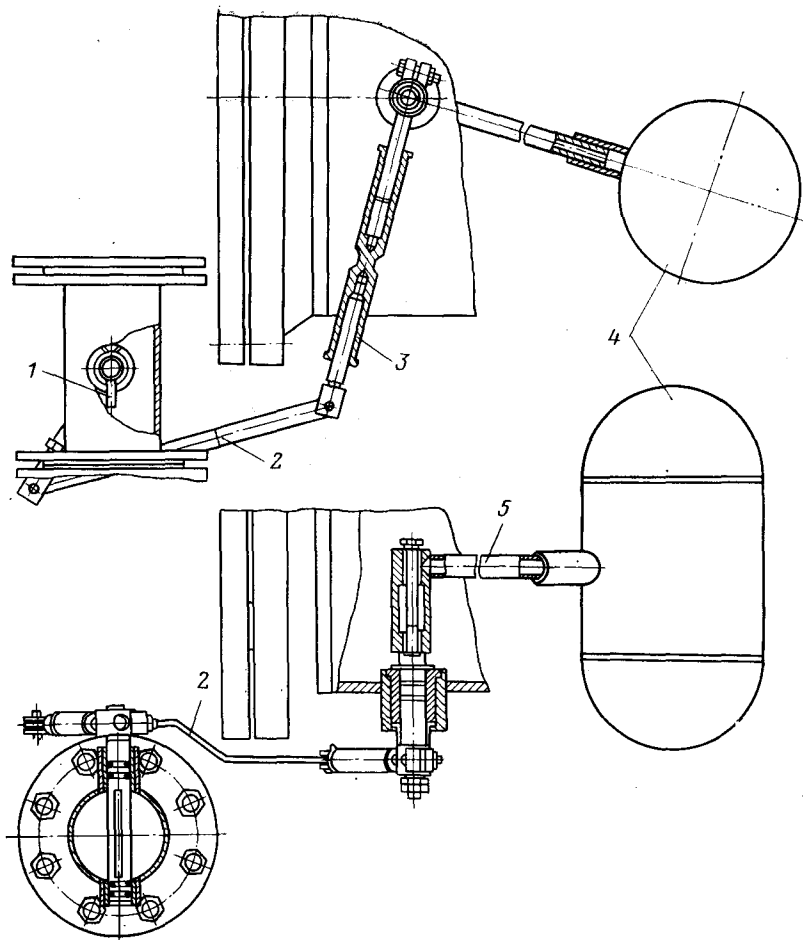


Рис. 139. Регулятор уровня РУМ-17

нефть через патрубок *11* выводится из сепаратора и направляется на установку подготовки нефти. Выделившаяся вода через патрубок *14* сбрасывается в дренажную линию. Объем поступающей и уходящей с установки нефти измеряется турбинными расходомерами *1*, *13* и *16*. Давление в отсеке *9* контролируется показывающим манометром *10*. В случае аварийного взлива и превышения давления подаются аварийные сигналы соответственно датчиком предельного уровня *4* типа ДПУ-1М и электроконтактным манометром *5*. При избыточном давлении в сепараторе газ сбрасывается через предохранительный клапан *3*.

Датчик предельного уровня ДПУ-1М представляет собой поплавковое устройство со штангой, закрепленной жестко на оси. На этой же оси закреплен рычаг, который нажимает на кнопку

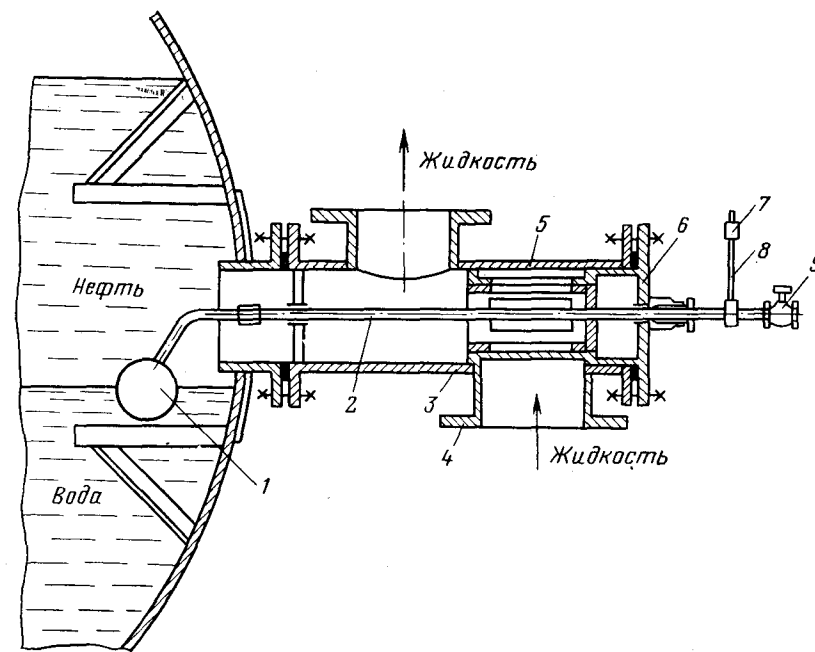


Рис. 140. Регулятор уровня раздела сред РУР-1

микровыключателя при достижении установленного предельного уровня. При включении микровыключателя замыкается электрическая цепь аварийной сигнализации. Этот же электрический сигнал может быть использован для команды на включение привода исполнительного механизма, обеспечивающего либо процесс поступления жидкости в емкость, либо процесс опорожнения этой емкости.

Применяемый для автоматического регулирования уровня регулятор РУМ-17 представляет собой поплавок *4* (рис. 139), связанный системой рычагов *2*, *3*, *5* с заслонкой *1*. Поплавок следит за изменением уровня в емкости. Если уровень повысится, поплавок через систему рычагов уменьшит расходное сечение газовой линии. При этом давление в левом отсеке повышается и жидкость выжимается в правый отсек емкости. Когда уровень жидкости в левом отсеке понизится, поплавок опустится и заслонка откроет газовую линию. Давление понизится, и левый отсек вновь начнет заполняться. Регулятор имеет диапазон регулирования ± 200 мм, рабочее давление 0,6 МПа. Схема регулятора РУР-1, применяемого для регулирования уровня раздела сред, изображена на рис. 140. При изменении водонефтяного раздела поплавок *1* с рычагом поворачивает валик *2*, к которому жестко прикреплен расположенный в корпусе *5* золотник *3*. Золотник, поворачиваясь в цилиндре *4*, перекрывает

расположенные в нем окна, вследствие чего изменяется проходное сечение слива жидкости. Положение поплавка на границе сред регулируется перемещением груза 7 по рычагу 8. Контроль за регулировкой осуществляется вентилем 9, через который в процессе настройки отбирается проба жидкости. К входному и выходному фланцам корпуса 6 крепятся трубопроводы системы сброса отделенной на установке воды. Диапазон регулирования ± 200 мм, рабочее давление 0,6 МПа.

§ 75. Автоматизированные блочные дожимные насосные станции

Если давление в системе промышленного сбора нефти и попутного газа недостаточно для транспортировки отсепарированной нефти на установки ее подготовки, в схеме обустройства нефтяных промыслов применяют дожимные насосные станции (ДНС). Нефть от групповых установок поступает в буферные емкости ДНС. В буферных емкостях поддерживается давление 0,6 МПа, обеспечивающее необходимый при перекачке газированной нефти подпор на приеме перекачивающих насосов. Нефть подается насосами по напорному нефтепроводу в пункт назначения. В блочных помещениях размещаются также насосы для откачки нефти, появляющейся при утечках через сальники насосов и предохранительные клапаны. Отсепарированный газ после буферной емкости направляется в газосборную систему. Технологический процесс перекачки нефти автоматизирован.

Система контроля и управления ДНС предназначена для оперативного учета, поддержания заданных значений параметров технологического процесса и предотвращения возникновения аварийных ситуаций. Система обеспечивает: автоматическое регулирование производительности ДНС, автоматическую защиту ДНС при аварийных уровнях нефти в буферных емкостях, автоматическое аварийное отключение насосов, автоматическое регулирование давления сепарации, автоматическую защиту ДНС при аварийном повышении или снижении давления в трубопроводах, автоматическую защиту газосборной линии и открытие факельной линии при аварийном повышении давления в буферных емкостях, автоматическую защиту трубопровода на приеме ДНС, газопровода после буферных емкостей и открытие линии сброса газа на факел при прекращении электроснабжения ДНС, автоматическое регулирование температуры в помещениях щитовой, операторной и насосных.

Автоматическое регулирование производительности осуществляется с помощью автоматов откачки АО-5. Если производительность насосов превышает объем нефти, поступающей в емкости, уровень жидкости в последней будет понижаться и, когда он достигнет определенного нижнего предела, автомат откачки АО-5 замкнет контакт «нижний уровень». При этом включается реле времени нижнего уровня (РВНУ), которое через каждую

минуту выдает импульсы продолжительностью 3—5 с. Это приводит к прикрытию установленных на выкиде насосов задвижек. Если после прикрытия задвижек уровень поднимается, автомат откачки отключит РВНУ. Если после этого поступление жидкости в емкости будет соответствовать откачке ее, проходное сечение задвижек не будет меняться. Увеличение притока жидкости на ДНС может привести к тому, что уровень жидкости в емкостях начнет повышаться и, когда он достигнет верхнего предельного, автомат откачки включит реле времени верхнего уровня (РВВУ), которое будет посылать импульсы, открывающие задвижки на выкиде насосов. В случае аварийного превышения уровня нефти в емкостях датчики предельного уровня ДПУ-1 подают сигнал, отключающий соленоиды в клапанах КСП-4. При этом сжатый воздух давлением перекроет линию входа нефти на ДНС. Одновременно на диспетчерский пункт (ДП) поступит сигнал аварии. Если уровень жидкости в буферных емкостях снизится до нижнего предельного от ДПУ-1 поступит импульс, отключающий приводы всех насосных агрегатов. Задвижки на выкидных линиях насосов будут закрыты и на ДП будет послан сигнал аварии. Автоматическое регулирование давления сепарации осуществляется регулятором давления прямого действия с мембранным исполнительным механизмом, установленным на линии отвода газа в газосборную сеть. При повышении давления на входе ДНС более 0,6 МПа электроконтактный манометр ВЭ-16РБ подаст импульс, обесточивающий клапаны типа КСП-4. При этом вход нефти на ДНС будет перекрыт и на ДП будет послан сигнал аварии.

Автоматическая блокировка (защитное перекрытие) газосборной линии и открытие линии подачи газа на факел при аварийном превышении давления в емкости выполняются при помощи электроконтактного манометра ВЭ-16РБ, соленоидных пилотных клапанов КСП-4 и управляемых запорных кранов, установленных на газосборной линии и на линии отвода газа на факел. При этом на ДП будет послан сигнал аварии. Автоматическое отключение насосов ДНС при аварийном снижении давления в напорном трубопроводе осуществляется также при помощи электроконтактных манометров ВЭ-16РБ, установленных на напорных линиях после основного и резервного насосов. Автоматическое отключение насосов при возникновении пожара в помещениях нефтенасосных происходит при подаче сигнала от тепловых датчиков системы противопожарной защиты в блок местной автоматики. Сигнал поступает при повышении температуры в помещении нефтенасосов до 90 °С. Одновременно кран перекрывает трубопровод на входе ДНС. Автоматическая блокировка трубопровода на входе ДНС, газопровода после буферных емкостей и открытие линии сброса газа на факел при прекращении энергоснабжения ДНС выполняются при помощи соответствующих запорных кранов и клапанов КСП-4. В случае прекращения энергоснабжения ДНС соленоиды обесточиваются

и через пилотные клапаны сжатый воздух поступает на запорные краны. Для автоматического регулирования температуры в помещениях щитовой и операторной применяются датчики температуры типа ДТКМ-41 и нагревательные приборы типа НВС-1, 2/1, находящиеся в щитовой и операторной. Нагревательные приборы автоматически включаются при температуре воздуха ниже 5 °С и выключаются при 20 °С.

Для предотвращения отпотевания обмоток электродвигателей при их остановках в насосных помещениях устанавливают нагреватели, включающиеся при остановке насосов и поддерживающие температуру воздуха не ниже 5 °С.

На ДНС предусмотрен местный контроль давления техническими манометрами общего назначения в напорном трубопроводе, на приеме насосов, на газовой линии после буферных емкостей и температуры ртутными техническими термометрами на трубопроводах нефти от насосной и газа после буферной емкости. Расход газа после буферных емкостей определяется подключением переносного дифманометра к камерной диафрагме.

Расход нефти в напорном трубопроводе контролируется расходомером переменного перепада давления. Уровень в буферных емкостях измеряется электронными индикаторами уровня типа ЭПУ-18М. Предупредительная звуковая и световая сигнализация при отклонениях давлений на приеме ДНС, в газосборной сети и в трубопроводе после регулятора давления осуществляется электроконтактными манометрами. Сигнализация при утечках сальников насосных агрегатов подается поплавковыми датчиками уровня, установленными в емкостях для сбора утечек нефти, которые также обеспечивают автоматическую откачку ее.

ГЛАВА 13

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ И ОТКАЧКИ ТОВАРНОЙ НЕФТИ

§ 76. Характеристика технологического процесса и задачи автоматизации

В нефтяных пластах нефть, как правило, залегает вместе с водой. В добываемой нефти в зависимости от близости контурной или подошвенной воды к забою скважины содержание пластовой воды изменяется от нескольких единиц до десятков процентов. В пластовой воде содержатся различные минеральные соли и иногда механические примеси. Содержание в нефти воды и водных растворов минеральных солей приводит к увеличению расходов на ее транспортировку, вызывает образование стойких нефтяных эмульсий и создает затруднения при переработке нефти на нефтеперерабатывающих заводах из-за нарушения режима процесса и коррозии оборудования. Согласно действующим ГОСТам, товарная нефть не должна содержать

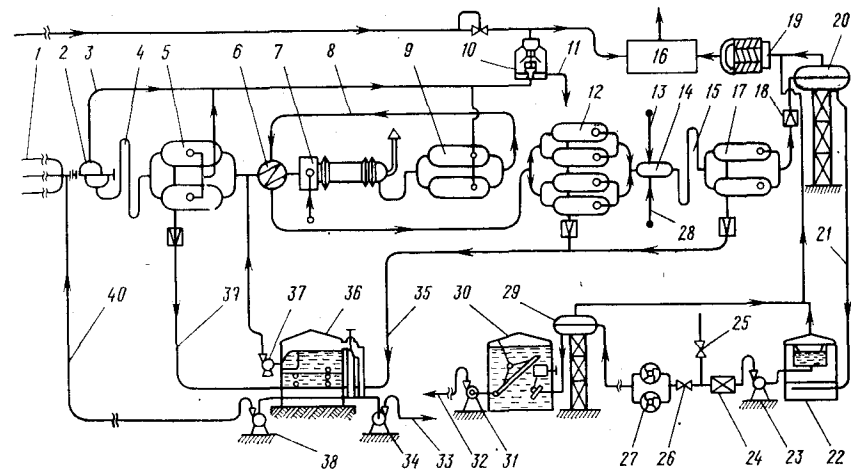


Рис. 141. Схема установки подготовки нефти и воды;

1 — сборные коллекторы с месторождения; 2 — коллектор-гаситель пульсаций; 3 — сборный газопровод; 4 — каллеобразователь; 5 — сепараторы второй ступени БАС-1; 6 — теплообменники; 7 — блок нагрева БН-5,4 (печь); 8 — трубопровод с горячей нефтеводной смесью; 9 — теплоизолированные сепараторы; 10 — турбосепаратор; 11 — сброс уловленной из газа нефти; 12 — герметизированные отстойники по обезвоживанию нефти; 13 — линия подачи ПАВ дозировочным насосом; 14 — смеситель; 15 — каллеобразователь; 16 — газоперерабатывающий завод; 17 — отстойники по обессоливанию нефти; 18 — регулируемый штуцер; 19 — винтовой насос-компрессор; 20 — концевые сепараторы; 21 — самотечная линия товарной нефти; 22 — резервуар товарной нефти; 23 — подпорный насос; 24 — автоматизированная установка «Рубин-2М» по измерению качества и количества товарной нефти; 25 и 26 — автоматически закрывающиеся и открывающиеся краны; 27 — расходомеры товарной нефти «Норд»; 28 — линия подачи пресной горячей воды; 29 — сепаратор товарного парка; 30 — парк товарных резервуаров; 31 — головная насосная станция; 32 — магистральный нефтепровод; 33 — водовод на КНС; 34 — насос для подачи пластовой сточной воды на КНС; 35 — водовод для сброса пластовой сточной воды из отстойников; 36 — резервуар-отстойник по подготовке сточной пластовой воды с гидрофильным фильтром; 37 — насос для откачки нефти; 38 — насос для подачи пластовой сточной воды, содержащей ПАВ; 39 — водовод для сброса пластовой сточной воды из аппарата по предварительному сбросу воды; 40 — линия подачи сточной пластовой воды, содержащей ПАВ

больше 1 % воды и 40 мг/л хлористых солей. Поэтому добываемая нефть подвергается на нефтяном промысле обработке, заключающейся в обезвоживании и обессоливании. Такая обработка на промысле называется подготовкой нефти.

Наиболее распространенными методами деэмульсации нефти на нефтяных промыслах являются термохимические. Более 80 % всей добываемой нефти обрабатывается на автоматизированных блочных термохимических установках [22]. Основными достоинствами этих установок являются низкая чувствительность режима работы при широком изменении содержания воды в нефти, возможность быстрого монтажа их. Блочное оборудование термохимической установки, выпускаемое заводами, поставляется на промыслы с полной автоматизацией в отлаженном состоянии и монтируется на месте в течение 15—20 дней.

К настоящему времени разработана номенклатура блочного автоматизированного оборудования термохимических установок заводского изготовления: нагреватели-деэмульсаторы УДО-2М, УДО-3, СП-1000, «Тайфун» и др.

Принципиальная схема установки подготовки нефти (УПН) и воды (УПВ) изображена на рис. 141. Обводненная нефть в виде эмульсии с частично растворенным в ней газом после первой ступени сепарации, расположенной на ДНС, поступает в сборные коллекторы, а затем в общий коллектор, из которого направляется в коллектор — гаситель пульсаций 2. Перед коллектором 2 по трубопроводу 40 вводят дренажную горячую воду, содержащую поверхностно-активные вещества (ПАВ), способствующие разрушению эмульсии. Из коллектора 2 эмульсия поступает в каплеобразователь 4 и далее в сепараторы второй ступени 5, а выделившийся газ направляется в сборный газопровод 3, по которому он транспортируется на газоперерабатывающий завод (ГПЗ). Далее газ проходит через турбосепаратор 10, где происходит очистка его от капельной взвеси. Вода из сепараторов по линии 39 автоматически сбрасывается в резервуар-отстойник 36 с гидрофильным фильтром. Обводненную нефть из сепараторов направляют в теплообменники 6, в которых происходит предварительный нагрев нефтеводяной смеси горячей смесью, прошедшей блок нагрева 7 и теплоизолированные сепараторы 9. Сепараторы служат для отделения газовой фазы, образующейся в блоке нагрева 7, и интенсификации отделения воды от нефти в отстойниках 12. Вода из отстойников автоматически сбрасывается в резервуар-отстойник 36, а нефть направляется в смеситель 14. В отстойниках практически получается обезвоженная нефть, содержащая воды не более 1 %. На этой стадии процесс обезвоживания заканчивается.

При отделении из нефти минерализованной пластовой воды нефть одновременно частично обессоливается. Однако в обезвоженной до 1 % нефти содержится 2000—3000 мг/л солей, что недопустимо, так как это может привести к коррозии трубопроводов и оборудования НПЗ. Для более глубокого обессоливания в поступившую в смеситель 14 обезвоженную нефть по линии 28 подается горячая пресная вода (от 2 до 5 % к общему объему нефти). Для предотвращения образования эмульсии по линии 13 подается ПАВ. Пресная вода с ПАВ и обезвоженная нефть интенсивно перемешиваются и поступают в каплеобразователь 15 для предварительного выделения воды. Затем для окончательного разделения смесь направляют в герметизированные теплоизолированные отстойники обессоливания 17. Основное назначение смесителя 14 и каплеобразователя 15 — создать условия, способствующие «захвату» каплями пресной воды соленых капель пластовой воды, оставшихся в нефти после ее обезвоживания. Из отстойников обессоливания кондиционная нефть под собственным давлением через регулируемый штуцер 18 направляется в концевые сепараторы 20, в которых компрессором 19 поддерживается вакуум. Из концевых сепараторов кондиционная нефть самотеком поступает в буферные емкости (резервуары) 22, и далее насосом 23 перекачивается через автоматизированную установку 24 учета товарной нефти. Если содержание

воды и соли в нефти превышает допустимую норму, на установке учета будет автоматически перекрыт кран 26 и открыт кран 25. При этом некондиционная нефть снова будет направлена на обезвоживание и обессоливание. Кондиционная нефть проходит через расходомеры 27 типа «Норд» и далее, пройдя через сепаратор 29, поступает в резервуары 32 товарного парка, откуда насосами 31 откачивается в магистральный нефтепровод 32.

Отделенная в отстойниках от нефти пластовая вода отводится по водоводу 35 в резервуар-отстойник 36. Из этого резервуара часть воды насосом 38 подается по водоводу 40 на вход коллектора — гасителя пульсаций, а большая часть ее откачивается насосом на кустовые насосные станции (КНС) системы поддержания пластовых давлений (ППД).

Задачи автоматизации технологического процесса — автоматическое поддержание уровня и давления в технологических аппаратах, регулирование расхода водонефтяной эмульсии и промывочной воды, подача заданного объема химических реагентов и защита от аварийных режимов. Схемой автоматизации должен быть также предусмотрен автоматический контроль основных параметров технологического процесса.

§ 77. Автоматизированные блочные установки подготовки нефти

Автоматическая деэмульсионная установка «Тайфун 1-400» (рис. 142) состоит из блоков сепарационного, деэмульсионного и местной автоматики. Блок сепарации 2 представляет собой вертикальную емкость с гидроциклонным устройством. Блок деэмульсации 1 собран в горизонтальной емкости на металлической раме. Внутри емкость разделена перегородками на отсеки: нагревательный I, отстойный II, нефте- и водосборный III и IV. В нагревательном отсеке смонтированы два газонагревателя и перфорированный распределитель потока, в отстойном отсеке — емкость для хранения химреагента и расходомер 8 щелевого типа для измерения массы отстоявшейся нефти, в водосборном отсеке — регулируемый сифон 4 для поддержания межфазного уровня и регулятор уровня 5 типа РУМ-17. Такой же регулятор уровня установлен в нефтесборном отсеке.

Водонефтяная эмульсия или частично обезвоженная нефть с сепарационных установок поступает в сепарационный блок, в котором отделяется попутный газ. Затем эмульсия поступает в нагревательный отсек, куда подается определенная доза химического реагента. Эмульсия, разбитая перфорированным распределителем на множество мелких потоков, проходит вертикальным противотоком через слой горячей промывочной воды. При этом глобулы воды из эмульсии поглощаются промывочной водой. Далее эмульсия и выделившаяся вода поступают в отстойный отсек, где происходит гравитационный отстой воды.

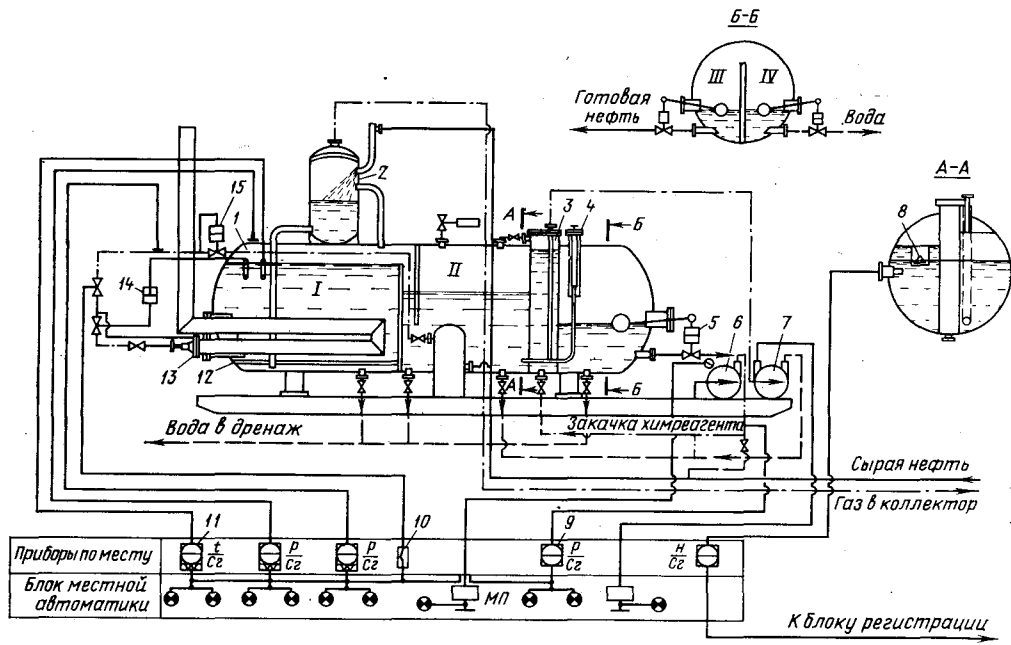


Рис. 142. Схема автоматической деэмульсионной установки «Тайфун 1-400»:

1 — деэмульсионный блок; 2 — сепарационный блок; 3 — емкость для хранения химического реагента; 4 — сифон; 5 — регулятор уровня РУМ-17; 6 — центробежный насос 2К-6; 7 — дозировочный насос НД-05Р-10/100; 8 — щелевой расходомер; 9 — электроконтактный манометр ЭКМ; 10 — запорный соленоидный клапан; 11 — электроконтактный термометр ЭКТ; 12 — распределитель; 13 — газонагреватель; 14 — регулятор температуры; 15 — регулятор давления

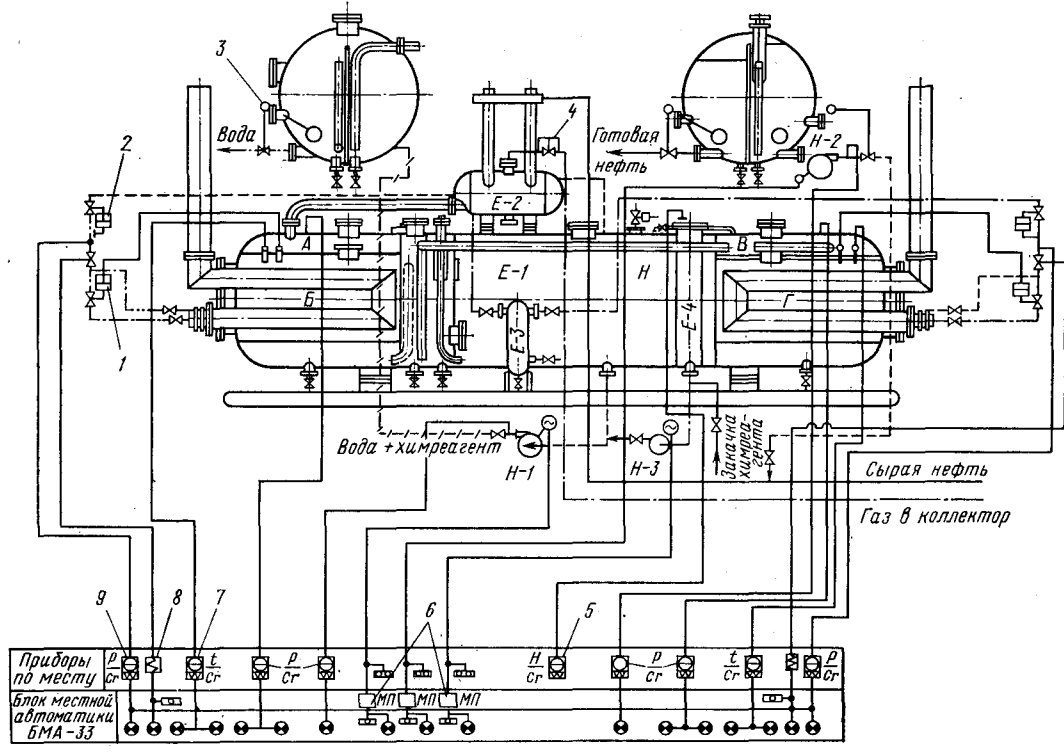


Рис. 143. Схема автоматической деэмульсионной установки «Тайфун 1-1000»:

1 — регулятор температуры РТ-25; 2 — регулятор давления РДП-3; 3 — регулятор уровня РУМ-17; 4 — регулятор перепада давления; 5 — электронный индикатор уровня ЭИУ-18; 6 — магнитный пускатель; 7 — электроконтактный термометр; 8 — запорный соленоидный клапан; 9 — электроконтактный манометр

Обезвоженная нефть переливается в нефтесборный отсек и оттуда направляется в резервуар товарной нефти. Отделившаяся вода под действием гидростатического давления через регулируемый сифон протекает в водосборный отсек, откуда она передается на установку очистки воды для подготовки ее к закачке в нефтяные пласты. Системой контроля и аварийной защиты обеспечиваются сигнализация при отклонении параметров от заданных значений и отключение подачи газа на горелки. Процесс горения управляется терморегулятором. Регуляторы давления и температуры и соленоидный клапан системы контроля процесса горения смонтированы на наружных трубопроводах деэмульсационного блока. Контрольно-измерительные приборы собраны на отдельной панели. Блок местной автоматики выполнен в виде отдельного шкафа, в котором смонтирована электрическая схема контроля управления и сигнализации. Производительность установки $46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Установка «Тайфун 1-1000» имеет производительность $115,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 143). Деэмульсационная часть установки собрана в горизонтальной емкости *E-1*, разделенной поперечными перегородками на три основных отсека. Два из них — *A* и *B*, размещенные в торцах емкости, являются нагревательными. Они связаны между собой трубой, выведенной за пределы емкости, и оборудованы топочными устройствами с дымовыми трубами. Среднюю часть емкости занимает отстойный отсек, внутри которого врезан баллон *E-4* с 30-суточным запасом чистого химического реагента. Снаружи на верхней части деэмульсационной емкости, смонтированной на раме, установлен горизонтальный сепаратор *E-2*, оборудованный гидроциклонными устройствами.

Нефтегазовая смесь через гидроциклоны подается в сепаратор, откуда выделившийся газ отводится с установки в газовый коллектор, а нефть сливается в нагревательный отсек *A*. Из нижней части отсека нефть, разделенная перфорированными разделителями на множество мелких потоков, проникает в полость *B*, заполненную горячей промывочной водой. Часть воды при этом выделяется из нефти и с помощью межфазного регулятора уровня отводится с установки. Всплывающая нефть через щель в перегородке перетекает в сборную камеру, откуда под воздействием избыточного давления вытесняется по соединительной трубе в нагревательный отсек. Здесь в полости *E* осуществляется вторичная промывка эмульсии через слой горячей воды. Окончательное гравитационное разделение нефти и воды происходит в отстойном отсеке *H*, откуда обезвоженная нефть через щель в перегородке протекает в конечную камеру и через исполнительный механизм регулятора уровня отводится в резервуар товарной нефти. Отделившаяся в отстойном отсеке вода, содержащая некоторое количество неотребовавшего деэмульгатора, поступает в камеру, откуда она откачивается насосом *H-2* в линию сырой нефти перед входом ее на установку.

Подача насоса *H-2* регулируется автоматически исполнительным механизмом регулятора уровня. Раствор деэмульгатора готовится автоматически смешиванием чистого химического реагента, подаваемого дозировочным насосом *H-3* из баллона *E-4*, с пластовой водой из отсека *H*. В топках деэмульгатора сжигается газ, выделившийся в процессе сепарации на установке. Для этого необходимое количество газа проходит через осушитель *E-3*. На трубопроводах подвода газа к горелкам смонтированы регуляторы давления и температуры и соленоидный клапан для аварийного отключения. Процесс горения регулируется по температуре жидкости в отсеках *A* и *B*. Аппаратура управления установкой собрана в блоке местной автоматики.

Автоматизированная блочная деэмульсационная установка УДО-2М разработана конструкторским бюро объединения «Саратовнефтегаз» и отличается высокой производительностью. Производительность установки при обводненности поступающей водонефтяной эмульсии 30 % — до 2000 т/сут. Установка (рис. 144) состоит из блоков: нагрева и отстоя 2, местной автоматики 3 и реагентного хозяйства 4, теплообменника 1. В водонефтяную смесь *II* перед входом в теплообменник 1 при помощи насоса вводится деэмульгатор *IV*. После теплообменника смесь поступает в блок 2 нагрева и отстоя. Этот блок (рис. 145) представляет собой горизонтальную емкость, разделенную перегородками на три отсека. В первом и втором отсеках имеются нагревательные трубы, внутри которых установлены инжекционные газовые горелки. Водонефтяная смесь поступает сначала в первый отсек, где она нагревается до температуры 90 °С. Здесь происходит частичное обезвоживание. Выпавшая вода накапливается в нижней части отсека и периодически удаляется на установки очистки воды. Частично обезвоженная нефть переливается по перепускному трубопроводу во второй отсек, где продолжается аналогичный термохимический процесс обезвоживания. Из второго отсека нефть по перфорированной трубе поступает в третий отсек, где она проходит через слой несмолистой древесины и окончательно обезвоживается. Горячая обезвоженная нефть поступает в теплообменник, отдает тепло встречному потоку неподготовленной нефти, охлаждается и поступает на установки учета товарной нефти. Для обессоливания безводные нефти в специальном устройстве смешиваются с пресной водой. Полученная при этом искусственная эмульсия затем разрушается в УДО-2М, а выпавшая вода промывает нефть, растворяет ее соли и сбрасывается. Выделившийся при нагревании эмульсионной нефти газ поступает на компрессорную станцию. Часть этого газа очищается и используется в топках установки УДО-2М. Автоматическое регулирование температуры осуществляется терморегулятором 6 прямого действия типа РТ-50 с термобаллоном в качестве чувствительного элемента. Клапаны 2 и 4 регулятора установлены на линии подачи газа к форсункам. Давление газа регулируется регулятором 1 пря-

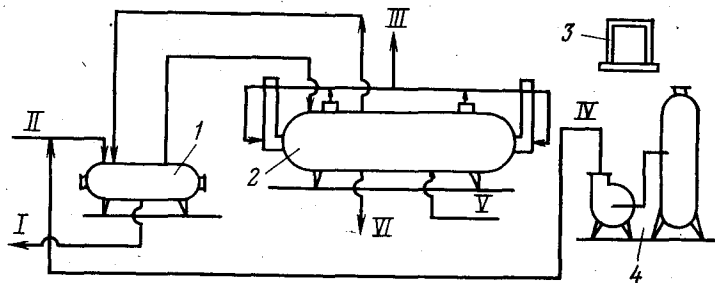


Рис. 144. Схема блочной деэмульсионной установки УДО-2М:
 I — вода из теплообменника; II — водонефтяная эмульсия; III — газ; IV — деэмульгатор; V — промывочная вода; VI — отделившаяся вода

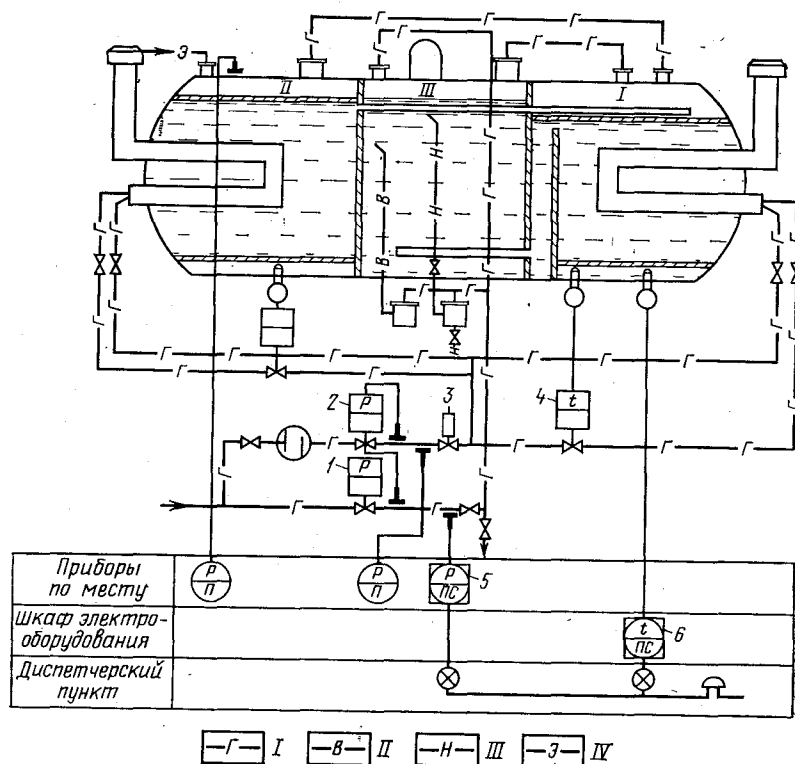


Рис. 145. Схема блока нагрева и отстоя установки УДО-2М:
 I — газ; II — вода; III — нефть; IV — эмульсия; 1, 2 — регулятор давления; 3 — отсека-
 тель; 4 — регулятор температуры; 5 — электроконтактный манометр; 6 — электрокон-
 тактный термометр

мого действия. Уровень раздела фаз (вода—нефть) поддерживается механическими регуляторами поплавкового типа, которые управляют заслонками, установленными на дренажных патрубках.

При угрозе аварии установка может быть выключена по сигналам датчиков предельного давления и предельного уровня. При этом на диспетчерский пункт поступит общий аварийный сигнал. В качестве датчика предельного давления используется электроконтактный манометр типа ВЭ-16РБ, а в качестве датчика предельного уровня — поплавковый уровнемер с микропереключателем. Вторичные приборы автоматики и узел телемеханики размещены в отдельном блоке местной автоматики.

§ 78. Автоматическое измерение массы и качества товарной нефти

На нефтяных промыслах для безрезервуарной сдачи нефти с промысла в трубопровод применяют отечественные установки типа «Рубин» и выпускаемые комбинатом автоматики ММГ Венгерской Народной Республики станции учета нефти (СУН) КОР-МАС. Установка типа «Рубин» предназначена для автоматического поточного измерения товарной нефти с приведением к температуре 20 °С, автоматического возврата некондиционной нефти на повторную подготовку и отбора средней пробы пропорционально прокачиваемому объему. Установка типа «Рубин» устраняет необходимость в накопительных резервуарах, сводит к минимуму потери легких фракций от испарений в резервуарах и сокращает затраты по обслуживанию.

Блок-схема установки «Рубин-М» изображена на рис. 146. Установка состоит из блока измерения I, блока управления II, трубопоршневой поверочной установки III и насосов внешней перекачки IV. Блок измерения имеет влагомер 5, фильтр 4, два гидравлических отсека коллектора (ОКГ) 6, 7, гидравлический привод (ГП) турбинный датчик, преобразователь расхода, магнитоиндукционный преобразователь, термометр сопротивления, пробоотборник. Перечисленные приборы смонтированы на металлической раме, на которой расположено также оборудование с трубопроводной арматурой. Блок управления включает блок сопровождающей электроники и блок местной автоматики, смонтированные на общем основании. Установка работает следующим образом. Товарная нефть через фильтр 4, влагомер 5, отсекающий 6 коллектора на линии товарной нефти и турбинный преобразователь расхода 8 транспортируется потребителю. При предельном содержании воды в нефти зонд влагомера выдает сигнал, от которого включается гидропривод, и отсекающий 6 перекрывает линию товарной нефти. Некондиционная нефть (нефть с повышенным содержанием влаги) возвращается в товарный парк I для дополнительной обработки. С прекращением поступления сигнала о недопустимом содержании влаги происходит

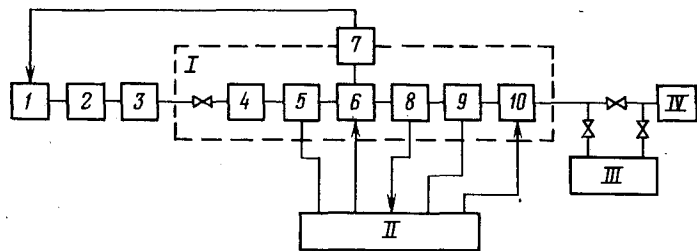


Рис. 146. Блок-схема установки «Рубин-М»

взаимобратное переключение отсекателей товарной нефти, после чего нефть снова (через буферную емкость 2 и подпорный насос 3) поступает в линию товарной нефти. Поток товарной нефти, проходя через датчик, вращает турбину с частотой, пропорциональной линейной скорости потока.

С помощью магнитоиндукционного датчика происходит пропорциональное преобразование частоты вращения турбины в частоты электрических импульсов, поступающих в блок сопровождающей электроники для пересчета. Одновременно в процессе перекачки товарной нефти термометр сопротивления 9 непрерывно измеряет температуру рабочей среды и выдает соответствующий сигнал также на блок сопровождающей электроники. Сигналы, поступившие с магнитоиндукционного датчика и термометра сопротивления, обрабатываются, и в счетное устройство вводится температурная поправка для приведения измерительного объема товарной нефти к температуре 20 °С. Окончательный результат объема товарной нефти, сданной потребителю, фиксируется на шестиразрядном электроимпульсном счетчике, установленном на лицевой панели блока сопровождающей электроники. Показания снимаются визуально по мере необходимости. В счетчике предусмотрен сброс показаний. Для периодического лабораторного контроля качества нефти в установке предусмотрен пробоотборник средней пробы 10. В зависимости от применяемых преобразователей расхода «Норд» (условный проход и предел измерения) выпускаются установки «Рубин-М» трех модификаций (в скобках указана производительность, м³/ч): «Рубин-М-100» (25—250), «Рубин-М-150» (50—500), «Рубин-М-200» (90—900). Максимальная пропускная способность 20 000 т/сут, минимальная 5000 т/сут. Относительная погрешность ±0,5 %, рабочее давление 40 · 10⁵ Па.

Турбинный преобразователь расхода типа «Норд» (рис. 147) собран в корпусе 3 с присоединительными фланцами. Чувствительным элементом преобразователя является крыльчатка 4, насаженная на ось 6, вращающуюся в подшипниках 5. Крыльчатка находится между направляющими пластинами 2 и 8. На корпусе укреплен фланцевая втулка 7 с резьбовым гнездом для монтажа магнитоиндукционного преобразователя. Корпус,

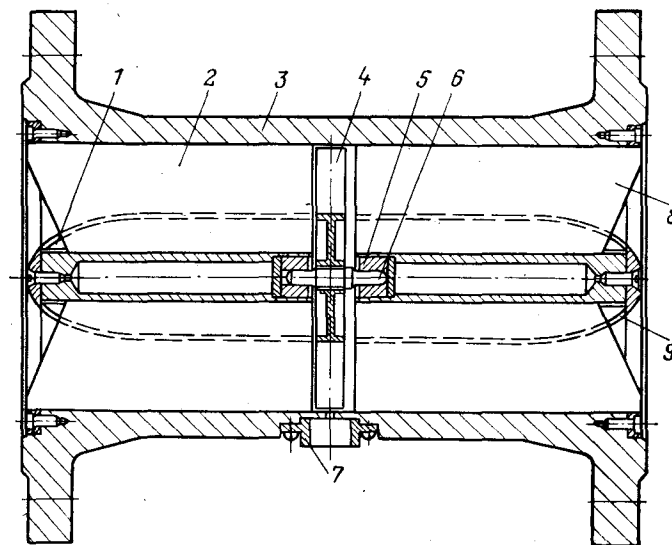


Рис. 147. Турбинный преобразователь расхода типа «Норд»

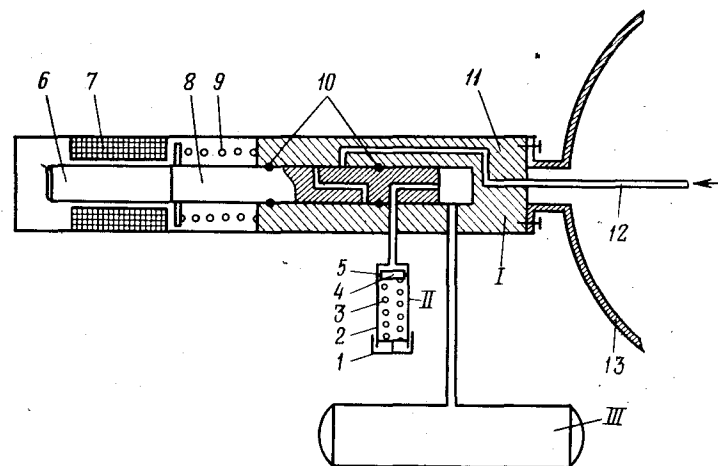


Рис. 148. Пробоотборник

направляющие пластины 2,8 и обтекатели 1,9 изготовлены из немагнитной стали, а крыльчатка — из нержавеющей стали. Магнитоиндукционный преобразователь состоит из корпуса, внутри которого размещены катушка индуктивности с сердечником и постоянный магнит. Турбинные преобразователи «Норд» выпускаются 22 типоразмеров на условные диаметры от 40 до 200 мм. Максимальный расход от 35 до 900 м³/ч. Отношение максимальных измеряемых расходов к минимальным 10 : 1. Относительная погрешность ±0,5 %.

Пробоотборное устройство (рис.148) состоит из пробоотборного узла I, устанавливаемого на трубопроводе, дозирующего устройства II и пробоотборного контейнера III. Для взятия каждой пробы с электронного блока установки «Рубин» подаются электрические импульсы на соленоидную катушку 7. При этом сердечник 6, сжимая пружину 9, втягивается в полость катушки и перемещает жестко соединенный с ним шток 8. Шток уплотняется в корпусе резиновыми кольцами 10. В штоке и корпусе 11 имеются каналы. В исходном положении каналы соединяют дозирующее устройство с пробоотборным контейнером. При перемещении штока вправо связь между дозирующим устройством и контейнером прекращается, дозирующее устройство соединяется с трубкой 12, находящейся в трубопроводе 13. Под действием давления жидкость из трубопровода впрыскивается в приемную камеру дозирующего устройства, причем поршень 5 перемещается вниз в корпусе 2 цилиндра дозирующего устройства, сжимая пружину 3. Объем порции, заполняющей приемную камеру, регулируется усилием пружины с помощью регулировочной гайки 1. Когда электрический импульс снимается, шток под действием пружины 9 возвращается в исходное положение. При этом жидкость, находящаяся в дозирующем устройстве, поршнем 4 выжимается в пробоотборный контейнер. Общий объем контейнера 3250 см³. Программой может быть предусмотрен отбор пробы от каждых 100, 200, 400 или 500 м³ нефти, прошедшей через турбинный расходомер установки.

Выпускаемая Венгерской Народной Республикой станция учета нефти (СУН) КОР-МАС предназначена для измерения массового расхода и объема протекающей по трубопроводу газонефтяной смеси и чистой нефти, влагосодержания, солесодержания и плотности. Станция учета состоит из технологической части, узла качества, электронного блока, блока передачи и сигнализации данных, блока цифротрансдачи и трубопоршневого устройства. Технологическая часть содержит три измерительные ветви (рабочую, резервную, контрольную), в которых находятся задвижки, фильтры, датчики перепада давления (дроссельные устройства), струевыпрямители и турбинные расходомеры.

Измеряемый поток входит в измерительную установку по трубе 17 (рис. 149) и выходит по трубе 14. Турбинные расходомеры — рабочий, резервный и контрольный — смонтированы в параллельные измерительные ветви. Измерители качественных параметров (плотности 9, влагосодержания 7 и солесодержания 8) смонтированы в отводной части на выходной части трубопровода. Прокачка нефти через отводную часть осуществляется насосом 11. Для обеспечения качественных измерений предусмотрены фильтры и струевыпрямители. Для контроля работы установки на входе и выходе установлены манометры 12 и 15 и термометры 13 и 16. Для проверки турбинных расходомеров в комплект СУН входит трубопоршневая установка 1, к которой с помощью задвижек 5 можно подключить любой из расходо-

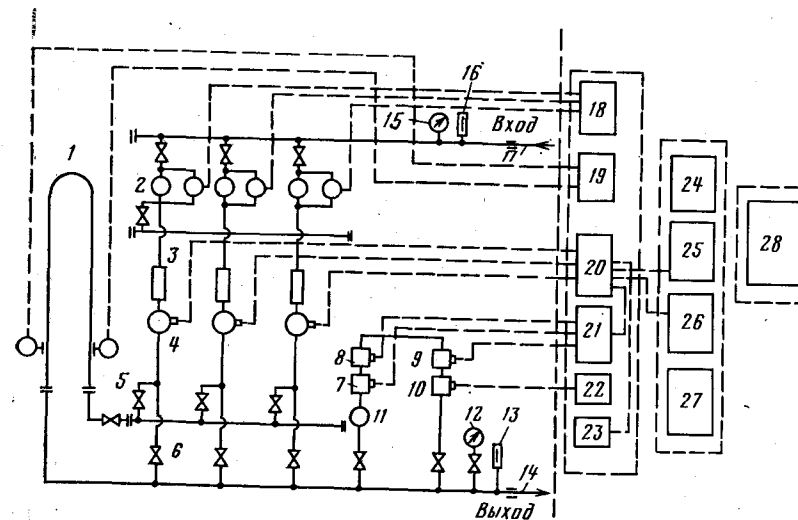


Рис. 149. Схема установки учета нефти СУН КОР-МАС:

1 — трубопоршневая установка; 2 — дроссели; 3 — фильтры; 4 — турбинные расходомеры; 5 — задвижки; 6 — переключающие задвижки; 7 — преобразователь влагосодержания; 8 — преобразователь солесодержания; 9 — плотномер; 10 — пробоотборник; 11 — насос; 12, 15 — манометры; 13, 16 — термометры; 14, 17 — вход и выход измеряемого вещества; 17 — переключающие задвижки; 18 — сигнализатор Δp ; 19 — блок турбопоршневой установки; 20 — операционное устройство; 21 — блок качества; 22 — блок автоматического пробоотборника; 23 — «Ультраквант»; 24 — устройство сигнализации положения задвижек; 25 — преобразователь цифрочести; 26 — блок телемеханики; 27 — блок питания; 28 — устройство для печатания таблиц

ров. Кроме того, показания турбинных расходомеров могут быть проверены путем сравнения с показаниями расходомеров «Ультраквант» 23, который подключается к измерительной линии соответствующими переключателями. Сигналы от измерительных турбин (от каждой в отдельности) поступают в центральный блок 20, где имеются аналоговый и цифровой интеграторы. На входе интегратора получается сигнал, пропорциональный объему нефти, протекающей через два расходомера. Объем считывается с аналогового прибора. Выходные импульсы цифрового интегратора делятся цифровым делителем на калибровочный коэффициент, в результате чего импульсы, выходящие из делителя, соответствуют объемным единицам нефти, протекающей через расходомеры. Эти импульсы суммируются электрическим счетчиком. Сигнал плотномера поступает на аналоговый прибор и далее в операционный блок. Сигналы измерителей влагосодержания через аналоговый интегратор также попадают в операционный блок. Их значения могут также считываться с аналоговых вторичных приборов. В операционном блоке электрические сигналы от турбинных расходомеров из цифрового интегратора, пропорциональные объемному расходу нефти, и сигнал аналогового интегратора, пропорциональный сумме объемных процентов влаго- и солесодержания, а также выходной сигнал электронного блока плотномера автоматически пересчи-

тываются в показатели массы брутто и чистой нефти, протекающей по СУН. Сигналы, соответствующие двум значениям расхода, попадают в цифровой делитель, где происходит деление на калибровочный коэффициент. На выходах двух делителей получаются импульсы, соответствующие массе брутто или чистой нефти, выраженной в единицах коммерческого учета. Их суммируют электромеханические счетчики, с которых считывается их значение. Для отбора средней пробы жидкости из трубопровода, характеризующей среду за определенный промежуток времени, необходимый для лабораторных исследований, на СУН предусмотрен автоматический пробоотборник 10, который получает управление от блока 22.

Станция учета нефти (СУН КОР-МАС) имеет следующую техническую характеристику: объемный расход 45—4000 м³/ч, рабочее давление 6,4 МПа, рабочую температуру 5—50 °С, температуру окружающей среды 5—50 °С, вязкость измеряемой среды $(1—50) \times 10^{-2}$ м²/с, плотность измеряемой среды 750—900 кг/м³, содержание воды 0—5 %, содержание солей 0—50 и 0—500 мг/дм³. Точность $\pm 1\%$ от предела измерения. Диаметры измерительного трубопровода 100, 150, 200, 300, 400 мм.

§ 79. Автоматизация нефтеперекачивающих насосных станций

Нефтеперекачивающие насосные станции предназначены для откачки товарной нефти с промысла потребителю. Целью автоматизации перекачивающих станций является обеспечение их безопасной и безаварийной эксплуатации, сокращение простоев насосных агрегатов, поддержание оптимальных режимов перекачки, а также обеспечение работы без обслуживающего персонала непосредственно в насосной.

На нефтяных промыслах используются автоматизированные блочные насосные станции БНС-10000-30, разработанные институтом ВНИИСПТНефть. На этих установках кроме откачивающих насосов установлены подпорные насосы, обеспечивающие работу установки «Рубин». Установка (рис. 150) состоит из блока управления 1, блочной комплектной трансформаторной подстанции 2 типа 2КТП-400/6 кВ, блока распределительных устройств 3 мощностью 6 кВ, трех блоков основного насоса 4, блочной установки «Рубин» 5 и двух блоков подпорного насоса 6. Блок основного насоса смонтирован в помещении, изготовленном из стальной сварной конструкции, обшитой стальными листами с утеплительной прослойкой, установленной на металлическом сварном основании. Оборудование блока состоит из насосного агрегата, включающего центробежный насос НД=9×3, электродвигателя ВАО 132-2, электроприводной задвижки КЛПЭ-40-150, установленной на выкидной линии, и двух электроприводных задвижек КЛПЭ-16-50 на линии системы охлаждения насоса, обратного клапана КОП-150-40 на

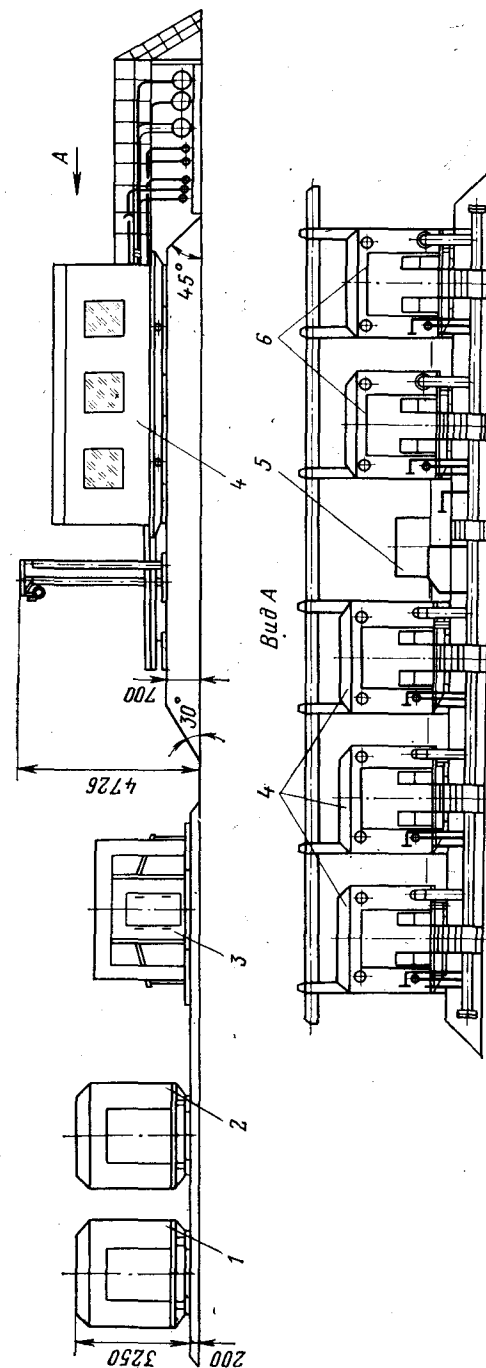


Рис. 150. Автоматизированная блочная нефтяная насосная станция БНС-10000-30

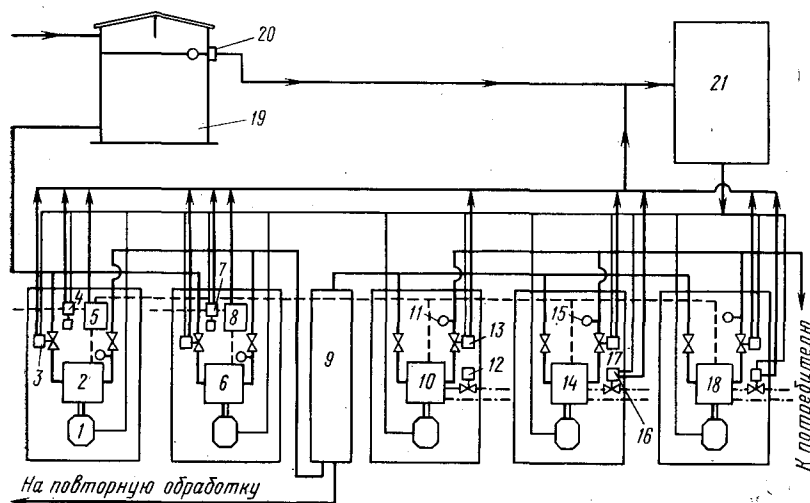


Рис. 151. Технологическая схема насосной станции БНС-10000-30

выкидной линии и вентилятора. В состав блока подпорного насоса входят: насосный агрегат, включающий электродвигатель ВАО-102-4 и центробежный насос НДВ, электроприводная задвижка КЛПЭ-16-250 на всасывающей линии насоса, обратный клапан КОП-150-40 на выкиде насоса, емкость для сбора нефти, вытекающей из-за неплотности сальников основных и подпорных насосов, и насосный агрегат, предназначенный для откачки утечек. Как и основной насосный блок, блок подпорного насоса размещен в утепленном помещении и смонтирован на рамах.

В блоке управления установлены блоки управления основными и подпорными насосами, общий блок управления и блок местной автоматики установки «Рубин». Помещение блока управления обогревается электрическими отопителями, позиционное регулирование которых осуществляется датчиком температуры.

Работа установки БНС-10000-30 осуществляется следующим образом. Нефть из буферной емкости 19 (рис. 151) поступает на прием подпорного насоса 2. Второй подпорный насос 6 — резервный. После насоса 2 нефть под давлением 0,66 МПа направляется в установку 9 «Рубин». Если нефть окажется некондиционной, то она автоматически возвращается на установку подготовки нефти. Кондиционная нефть после установки «Рубин» попадает на прием перекачивающих насосов 10 и 14. Насос 18 в это время является резервным. В помещении подпорных насосов установлены емкости 5 и 8 для сбора нефти, пропускаемой сальниковыми уплотнениями основных и подпорных

насосов. Собранная нефть откачивается насосами 4 или 7. Автоматический пуск насосной станции осуществляется по электрическому сигналу датчика предельного уровня 20 типа ДПУ-1 по достижении заданного уровня нефти в резервуаре 19. При этом с блока управления 21 подается импульс на электропривод задвижки 3, установленной на всасывающей линии насоса 2. Когда задвижка полностью откроется, замкнется контакт установленного на ней концевого выключателя КВО, при этом установленное в блоке управления подпорными насосами реле времени включает электродвигатель 1 подпорного насоса. Одновременно замыкается второй контакт реле времени и на блоке управления появляется сигнал, что задвижка 3 открыта. В реле времени имеется третий контакт, замыкание которого подготавливает цепь аварийных блокировок подпорного насоса 2. Для включения в работу перекачивающих рабочих насосов 10 и 14 необходимо, чтобы контактор станции управления рабочим подпорным насосом 2 при запуске последнего одновременно включал цепи питания реле времени в блоках управления перекачивающих насосов. Эти реле имеют по три контакта. При срабатывании первых контактов с блоков управления перекачивающими насосами подаются импульсы на электроприводы задвижек 12 и 16, установленных на линиях системы охлаждения насосов. Указанные задвижки снабжены контактными устройствами, позволяющими определять положение задвижек (открыто—закрыто). При замыкании вторых контактов реле времени, если задвижки 12 и 16 открыты, включаются магнитные пускатели электродвигателей задвижек 13 и 17 на выкидных линиях насосов 10 и 14. Замыкание третьих контактов реле времени приведет к включению магнитных пускателей электродвигателей основных насосов 10 и 14. Одновременно на табло блока управления загораются лампочки, сигнализирующие, что основные рабочие насосы функционируют и задвижки на их выкидных линиях открыты.

В случае аварийных ситуаций схемой управления предусмотрено автоматическое отключение перекачивающих насосных агрегатов. При снижении или превышении давления сверх допустимых пределов от электроконтактных манометров 15 и 11, установленных на всасывающих и выкидных линиях насосов, поступают электрические импульсы в блок управления насосами. При этом реле в блоке управления обесточивается и соответствующий насосный агрегат отключается. Одновременно с отключением насосного агрегата, находящегося в аварийном состоянии, включается резервный насосный агрегат. Точно так же в случае остановки подпорного насоса автоматически отключается перекачивающий насосный агрегат, но резервный при этом не включается.

Температура подшипников насосного агрегата контролируется аппаратурой температурной защиты АТВ-229. При перегреве датчик выдает сигнал в блок управления и насос отклю-

чится. При угрозе затопления помещения насосного блока датчик предельного уровня ДПУ-1, установленный в специально заглубленной емкости, пошлет аварийный сигнал в блок управления и насосный агрегат будет остановлен.

Противопожарная защита осуществляется с помощью датчиков пожарной сигнализации ДПС-038, которые при резком повышении температуры в помещении блока насосной посылает сигнал через промежуточный исполнительный орган ПИО-017 в блок управления. При этом отключается горящий насосный агрегат и блокируется вся насосная станция.

Если насосный агрегат после запуска не начал работать или при работе не развивает необходимого давления, установленный на выкидной линии электроконтактный манометр подаст в блок управления сигнал на отключение подпорного насоса. Одновременно закроется задвижка на всасывающей линии насоса. В случае порыва нефтепровода на приеме или выкиде насосной станции по сигналу электроконтактных манометров, установленных на приемных и выкидных линиях всех насосов, произойдет общее аварийное отключение насосной станции. Вся насосная станция отключается также в случае прекращения подачи электроэнергии.

В помещении каждого из насосных блоков установлено по два вентилятора, один из которых резервный. Основной вентилятор включается сразу же при включении насосного агрегата. Резервный включается при температуре в помещении выше установленного предела или при достижении концентрации паров в помещении насосной 20 % от взрывоопасной.

Для контроля и регулирования температуры в помещении блока насосных применяются датчики температуры ТДП-231у. Концентрация взрывоопасных газов контролируется датчиком — сигнализатором горючих газов СГГ-2. При достижении установленной предельной концентрации паров по сигналу от СГГ-2 блок управления включит резервный вентилятор, одновременно обесточив сигнализатор. Через 2—3 мин резервный вентилятор отключится и на сигнализатор горючих газов будет подано питание. Этот цикл будет автоматически повторяться до тех пор, пока концентрация взрывоопасных паров не снизится до допустимых пределов. Поддержание установленной температуры в помещении насосного блока регулируется датчиком ДТКБ-53, управляющим включением и отключением электрического отопителя.

В блочной насосной станции предусмотрена сигнализация состояния насосных агрегатов (работает — не работает), положения задвижек на всасывающих и выкидных линиях насосов, а также на линиях охлаждения основных насосов (открыто — закрыто), перегрева подшипников насосных агрегатов, возникновения пожара. При пожаре автоматически включается сирена. Производительность блочной насосной станции БНС-10000-30 10 000 т/сут, напор 3 МПа.

§ 80. Характеристика системы поддержания пластового давления

Основным, наиболее распространенным и эффективным методом поддержания пластовых давлений (ППД) является законтурное и внутриконтурное заводнение, представляющее собой закачку в пласты воды через специальные нагнетательные скважины, находящиеся либо за контуром нефтеносности, либо внутри контура — между эксплуатационными скважинами. Применение заводнения позволило повысить нефтеотдачу пластов при разбуривании залежей по значительно более редким сеткам, сократить сроки отборов основных запасов, продлить фонтанный период эксплуатации, обеспечить высокие дебиты скважин при механизированном способе эксплуатации и повысить эффективность регулирования процесса разработки.

В системах ППД на нефтяных месторождениях восточных районов применяют две схемы подачи воды. При первой схеме воду забирают из-под русловых скважин и подают непосредственно в магистральный водовод. При фильтрации этой воды через пласты (инфильтрационный водозабор) она очищается и нет необходимости в дополнительной очистке ее. При второй схеме вода поступает самотеком из открытых водоемов на станцию первого подъема, откуда ее подают на станции очистки воды. Очищенная вода забирается станцией второго подъема и подается в магистральный водовод. По магистральным водоводам вода поступает на кустовые насосные станции (КНС), откуда она по нагнетательным скважинам закачивается в пласт.

Закачиваемая в пласт вода не должна снижать проницаемость заводняемых пластов и вызывать коррозию оборудования и трубопроводов при перекачке и нагнетании ее в пласт. Согласно существующим нормам, вода, предназначенная для закачки в пласты, должна содержать взвешенных частиц не более 2 мг/л и железа не более 0,3 мг/л.

Станции очистки воды имеют смесители, осветлители, фильтры и резервуары чистой воды, которые предназначены для приготовления раствора коагулянта из глинозема (сернокислого алюминия), вызывающего коагулирование механических взвесей в воде при добавлении его в воду. В растворные баки насыпают глинозем, заливают воду и в течение нескольких часов перемешивают воздухом из вакуум-насосов. Смесь отстаивается несколько часов. Затем полученный раствор перекачивают в дозаторные баки, откуда он самотеком поступает в определенной дозе в смесители. Смесители (две конусообразные емкости) представляют собой промежуточное звено, в ко-

тором происходит равномерное распределение реагента в воде. Раствор коагулянта в смесителе поступает сверху, а вода — снизу, т. е. навстречу потоку, вследствие чего происходит бурное перемешивание.

Осветлители предназначены для основной очистки воды от механических взвешенных частиц. Вода в них подается по центральной трубе, расходится по радиальным трубам в днище и, проходя через решетчатые листы, равномерно поднимается вверх. Взвешенные частицы в результате коагуляции удерживаются в воде на определенной высоте и служат фильтром, задерживающим взвеси, которые время от времени проваливаются в карманы люка. В осветлителях вода очищается от механических взвесей на 95 %. Поднимаясь вверх, вода переливается через борта в желоба и самотеком поступает в фильтры. В фильтрах происходит окончательная очистка воды. Фильтры представляют собой бетонные емкости, на дне которых лежит двухфракционный слой песка толщиной около 80 см. Вода, проходя через слой песка по винипластовым трубам самотеком, поступает в резервуары чистой воды.

Водозаборные скважины в системе ППД являются источниками подачи воды и разделяются на сифонные и насосные. Водозаборные скважины сифонного типа обычно располагаются вдоль реки в нескольких десятках метров друг от друга. Каждая скважина оборудована каркасно-стержневым фильтром с гравийной засыпкой. Высота фильтра — несколько метров, диаметр до 300 мм. На устье скважины предусмотрены штуцер для подключения контрольно-измерительных приборов и задвижка, размещенная в железобетонном колодце диаметром 1,5 м. Скважины соединены несколькими сифонными водоводами, присоединенными к вакуум-котлам, расположенным в помещении насосной станции первого подъема. Водозаборные скважины с индивидуальным насосным оборудованием сооружаются в тех случаях, когда водоносные пласты залегают ниже поверхности земли более чем на 8 м и поэтому сифоном невозможно поднять воду из скважин или требуется большое заглубление насосной станции, скважин и коллекторов. Скважины оборудуются индивидуальными насосами, развивающими напор от 10 до 50 м. На месторождениях Башкирии и Татарии применяют вертикальные центробежные насосы АТН-10 и горизонтальные — 6 НДВ.

Насосные станции первого подъема предназначены для забора воды от источников водоснабжения. Если прием осуществляется от инфльтрационного сифонного водозабора, станция размещается в здании, заглубленном на несколько метров. Оборудование станции состоит из трех или четырех центробежных насосов АЯП или НДВ подачи 0,1—0,2 м³/с с напором 300—500 м, двух вакуум-насосов и двух вакуум-котлов, к которым присоединяются сифонные водоводы. Вода сначала поступает в вакуум-котлы и оттуда откачивается центробежными

насосами в систему магистральных водоводов. Привод насосов — двигатели ДАМСО мощностью 500 кВт. Два водокольцевых вакуум-насоса подачей 0,2—0,3 м³/с обеспечивают вакуум до 83 %. Насосы работают от короткозамкнутых асинхронных электродвигателей мощностью 15—30 кВт.

Если поступление воды осуществляется самотеком из открытого бассейна, на насосной станции первого подъема устанавливаются три насоса типа НД (два рабочих, один — резервный) с подачей 0,2 м³/с и напором 30 м. Насосы приводятся в действие электродвигателями ДАМСО мощностью 115 кВт. Из-за того, что самотеком приемный коллектор станции не полностью заполняется водой, для запуска центробежных насосов установлены два вакуум-насоса подачей 0,01 м³/с с двигателем 20 кВт. Установлен также насос подачей 0,03 м³/с с двигателем 1,7 кВт для откачки из амбара воды, которая набирается в результате утечек на станции.

Насосные станции второго подъема являются промежуточными перекачивающими объектами. Обычно они однотипны и отличаются тем, что одни находятся полностью под заливом, другие — частично. В насосной станции второго подъема устанавливают до четырех насосов (один из них резервный) подачей 0,3 м³/с с напором 194 м. В качестве привода используют двигатель ДПП мощностью 465 кВт.

Кустовые насосные станции (КНС) являются основным технологическим объектом системы заводнения. Каждая КНС состоит из машинного зала, в котором расположены насосные агрегаты с обвязкой и арматурой, камеры напорного коллектора, где установлена распределительная гребенка, находящаяся под высоким давлением, помещений распределительного устройства 6 кВ и обслуживающего персонала, аппаратной с размещенными в ней приборами управления насосными агрегатами, открытой подстанции 35/6 кВ, монтируемой независимо от самой КНС. Как правило, в соответствии с подачей насосов 0,05 м³/с и средней приемистостью скважин 0,01 м³/с один насос обслуживает до восьми скважин. Нагнетательная скважина предназначена для закачки воды в пласт. Конструктивно скважина представляет собой колонну обсадных труб, в которую опущены лифтовые трубы. Через них закачивают воду в пласт.

Требования к автоматизации и телемеханизации системы ППД определяются ее ролью в технологических процессах нефтегазодобывающего предприятия и особенностями устройств и функционирования объектов ППД. К числу таких особенностей следует отнести прежде всего то, что водоводы обслуживают первоочередные и неотложные потребности нефтеотдачи и пожаротушения, вследствие чего должна быть обеспечена высокая надежность бесперебойной работы объектов системы, перерывы в подаче воды могут привести к прекращению приемистости скважин, режим работы системы зависит от каче-

ства исходной воды и в то же время технологический процесс очистки воды сравнительно сложен, технологические объекты системы ППД рассредоточены на больших площадях и в ряде случаев находятся на больших расстояниях от основных нефтепромысловых и населенных пунктов, все объекты ППД взаимосвязаны через перекачиваемую воду, поэтому необходима координация их работы, контроль и управление с одного центра.

На основе анализа требований к объектам системы ППД и условий их эксплуатации, а также в соответствии с Основными положениями по обустройству и автоматизации объектов нефтедобывающей промышленности предусматривается автоматизация станций первого и второго подъемов, водозаборных и сифонных скважин, станций очистки и кустовых насосных станций.

Автоматизация и телемеханизация объектов ППД должны обеспечить надежную их работу при отсутствии оперативного обслуживающего персонала. С этой целью схемой автоматизации должны быть предусмотрены автоматическая защита оборудования от аварийных режимов, автоматическое включение резервного оборудования в случае аварийного отключения основного, централизованное дистанционное управление насосными агрегатами и управляемыми задвижками, сигнализация на диспетчерский пункт (ДП) об исполнении команд, аварийных ситуациях и передаче измерительной информации. Схемой автоматизации должна быть предусмотрена возможность перехода с дистанционного на местное управление.

§ 81. Автоматизированные блочные установки для очистки сточных вод и автоматизация водозаборных скважин

Автоматизированные блочные установки для очистки сточных вод (УОВ) предназначены для очистки сточных вод от остаточных нефтепродуктов и механических примесей и доведения обрабатываемой воды до таких кондиционных характеристик, которые позволяют применять эту воду в системе ППД. Установки разработаны трех типоразмеров: УОВ-750 производительностью 750 м³/сут, УОВ-1500—1500 м³/сут и УОВ-3000—3000 м³/сут.

Установка УОВ-750 (рис. 152) состоит из трех блоков: напорного отстойника 1, импеллерного флотатора 6 и сепаратора 8. Кроме того, в состав установки входит блок местной автоматики БМА-35. Блок напорного отстойника предназначен для предварительной очистки сточных вод от нефтепродуктов и механических примесей. Блок импеллерного флотатора служит для основной очистки сточных вод от нефти и механических примесей. Блок сепаратора—последняя ступень обработки воды. Он включает секции для очищенной воды 14, для

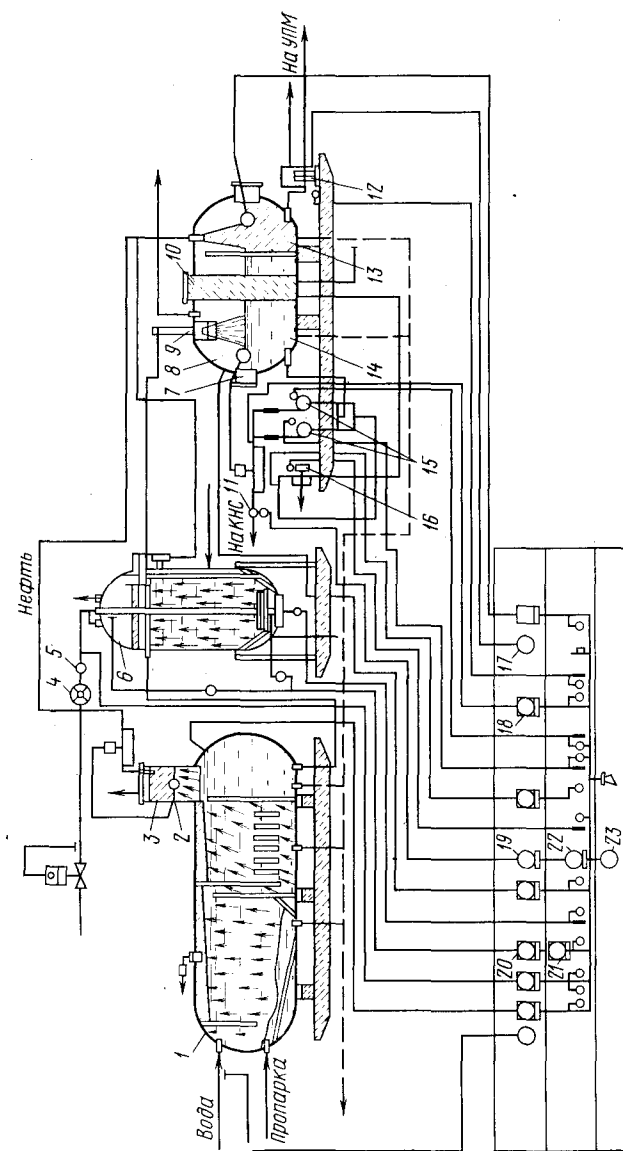


Рис. 152. Автоматизированная блочная установка для очистки сточных вод типа УОВ-750

уловленной нефти 13 и для раствора ингибитора коррозии 10. Кроме того, в блок 8 входят насосные агрегаты 12 для откачки уловленной нефти на установку подготовки нефти, 15 — для подачи воды на кустовые насосные станции (КНС) и 16 — для ввода ингибитора коррозии в воду, перекачиваемую на КНС.

Установка работает следующим образом. Сточная вода после установки подготовки нефти под избыточным давлением поступает в емкость блока отстойника 1. В емкости смонтированы вертикальные перегородки, благодаря которым процесс обработки жидкости гравитационным методом наиболее эффективен. Перегородка первого отсека служит отбойником для наиболее крупных механических частиц, которые оседают на поддон и поступают по трубопроводу на иловую площадку. Далее в обрабатываемой воде, проходящей через систему перегородок вследствие инерционных усилий, получающихся при крутых поворотах, происходит коалесценция мелких капель нефти. Выделившаяся нефть собирается в вертикальной цилиндрической камере 3, откуда она автоматически сбрасывается межфазным регулятором уровня 2 типа РУМ-18 в отсек 13 сепаратора 8. Из последнего отсека отстойника вода поступает в блок импеллерного флотатора 6, на днище которого смонтирован импеллерный блок. Его крыльчатка связана с газовой линией вертикальной трубой, проходящей в центре емкости флотатора. Внутри флотатора имеется перфорированная труба, через которую поступающая вода выходит мелкими струями. Чистая вода, накапливающаяся в данной части флотатора, отводится по вертикальной трубе в сепаратор 8. При вращении импеллерной крыльчатки обрабатываемая вода отбрасывается к стенкам флотационной емкости, отчего в центральной зонной области создается разряженная зона, в которую по центральной трубе подается газ сепарации. Импеллерная крыльчатка диспергирует газ на мельчайшие пузырьки, устремляющиеся через поток жидкости вверх флотационной емкости. При этом взвешенные частицы эмульгированной в воде нефти увлекаются всплывающими вверх пузырьками газа и в виде пены собираются на поверхности воды. Нефть стекает в пено-сборный бункер, расположенный в верхней части флотатора, откуда она направляется в отсек 13 блока сепаратора. Автоматическое регулирование расхода газа, подаваемого во флотатор, осуществляется с помощью установленного на линии подачи газа регулятора давления прямого действия типа РДП-4 и жиклера 5, поддерживающего постоянство расхода газа. Газовый счетчик 4 типа РГ-250 предназначен для периодического контроля расхода газа и настройки регулятора давления. Качество обработки воды флотационным методом зависит от поддержания определенного перепада давления во флотаторе и в газоподводящей трубе. Контроль перепада давления ведется с помощью дифманометра 20 типа КАЗ-10-20 и вторичного показывающего прибора 21 типа ВМД. Эти же приборы обеспе-

чивают автоматическую сигнализацию при падении перепада давления ниже установленной величины. Обработанная вода с низа флотатора сифонным способом подается в гидроциклонную головку 9 блока сепаратора. Собирающаяся в отсеке 14 очищенная вода насосами 15 типа ЗМС-10 подается в систему ППД. Автоматическая откачка нефти из сепарационной емкости осуществляется с помощью автомата откачки АО-5, смонтированного в отсеке 13, и блока управления двигателем шестеренчатого насоса 12. Автоматическое регулирование уровня очищенной воды в сепарационной емкости обеспечивается с помощью регулятора уровня 7 типа РУМ-17. Исполнительный механизм регулятора установлен на выкидной линии центробежных насосов. Измерение объема очищенной воды ведется комплектом, включающим камерную диафрагму 11, дифманометр 19 типа КАЗ-10-20, показывающий вторичный прибор 22 типа ВФСМ-2С-0 и частотный интегратор 23, дающий суммарное значение объема. На установке предусмотрен контроль давления с помощью манометров 17 типа ОБМ-1-1606 в трубопроводе подачи воды на блок отстойника и регистрирующим манометром 18 на выкидном трубопроводе насоса.

Технологические схемы и схемы контроля установок УОВ-1500 и УОВ-3000 аналогичны рассмотренной.

Автоматическое управление водозаборной скважиной (рис. 153) осуществляется блоком местной автоматики БМА-19, который обеспечивает централизованное телеуправление с диспетчерского пункта насосным агрегатом (пуск и остановка); автоматическую защиту электродвигателя при перегреве подшипников и обмотки статора электродвигателя, срыве давления на выкидной линии (срыв давления возможен при недостатке воды на приеме насоса или неисправности на всасывающей стороне насоса, при поломке вала, порыве нагнетательной линии и т. д.), угрозе затопления прискважинного помещения, исчезновении напряжения в цепях контроля и автоматики; сигнализацию на диспетчерский пункт аварийного состояния при автоматическом отключении насосного агрегата

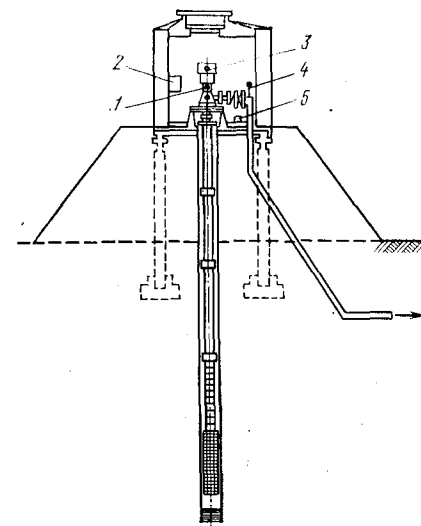


Рис. 153. Схема автоматизированной водозаборной скважины:

1 — термоматрон в обмотке статора; 2 — блок местной автоматики БМА-19; 3 — термоматрон; 4 — электроконтактный манометр ЭКМ-1; 5 — датчик утечки (контроль затопления)

и потере напряжения в цепях контроля; местное управление насосным агрегатом (пуск, остановка).

Автоматическая защита электродвигателя при перегрузке, коротком замыкании, исчезновении напряжения на одной из фаз осуществляется предохранителями и тепловыми элементами, встроенными в магнитный пускатель или размещенными в распределительном устройстве.

Для вакуум-насосов первого подъема на каждый агрегат ставится блок БМА-19.

§ 82. Автоматизированные блочные кустовые насосные станции

Блочная кустовая насосная станция (БКНС) состоит из блоков (рис. 154): сепарационно-буферного I, насосов II, управления электродвигателями III, распределительных устройств IV, распределительной гребенки V. Сепарационно-буферный блок состоит из двух горизонтальных емкостей 1 по 50 м³ и предназначен для сепарации содержащихся в воде газов (метана), а также для отстаивания воды и удаления механических примесей, для создания гидравлического буфера, обеспечивающего нормальную работу насосов. Выделяющийся из воды при отстое газ сжигается в свече. Насосные блоки предназначены для закачки воды в нагнетательные скважины. Насосные блоки состоят из центробежных насосов 2 типа ЦН-150-100 с синхронными двигателями 3 типа СДБ-800-2К, установленными на рамных основаниях. Насосные блоки помещаются в утепленное помещение, собранное из стандартных панелей.

Для автоматического управления, защиты и контроля параметров технологического оборудования насосных блоков и общестанционного хозяйства КНС применяется разработанная СПКБ объединения «Союзнефтеавтоматика» система «Пласт 1М» (рис. 155). Эта система выполнена по блочно-функциональному принципу и включает аппаратуру: щиты автоматизации КНС, автоматизации насосного агрегата, местного контроля и управления насосного агрегата, контроля и управления вспомогательного оборудования станции, а также комплект датчиков, необходимый для нормальной работы технологического оборудования КНС. Щит автоматизации КНС включает панель КИП, блок защиты и сигнализации, блок управления и сигнализации, блок исполнительных реле (БИР). Щит автоматизации насосного агрегата включает панель КИП, блок БЗС, блок БИР, блок контроля температуры, блок задания программ.

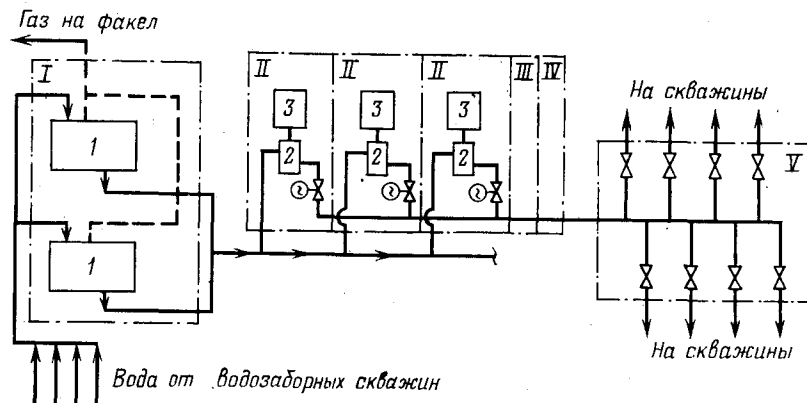


Рис. 154. Схема блочной кустовой насосной станции

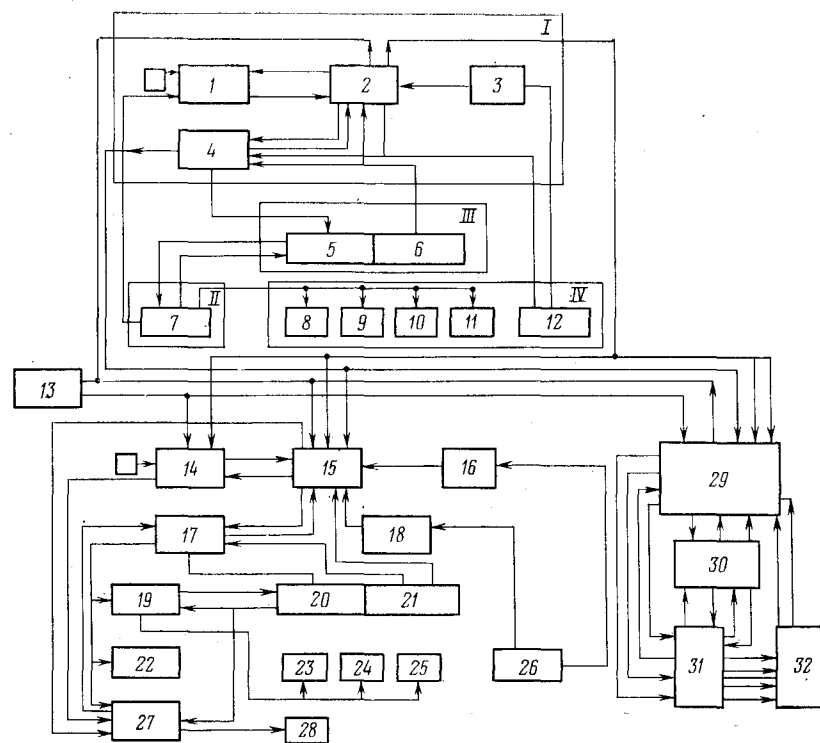


Рис. 155. Блок-схема системы автоматизации «Пласт 1М»:

I — аппаратура щита автоматизации БКНС; II — силовое электрооборудование; III — аппаратура щита местного контроля и управления вспомогательным оборудованием БКНС; IV — оборудование насосной станции; 1, 14 — блоки управления станцией; 2, 15 — блоки защиты станции; 3, 16 — панели контрольно-измерительных приборов; 4, 17 — блоки исполнительных реле; 5, 20 — аппаратура давления; 6, 21 — манометры; 7, 19 — щиты сигнализации и управления; 8, 9, 28 — насосы откачивающие; 10 — электрозадвижка на всасывании; 11, 25 — электрозадвижки на нагнетании; 12, 26 — датчики по месту; 13 — устройство формирования сигналов ТУ и ТС; 18 — блок контроля температуры; 22 — шкаф тиристорного возбуждения; 23, 24 — маслонасосы; 27 — пусковое устройство; 28 — насосный агрегат; 29 — аппаратура щита автоматизации насосного агрегата; 30 — аппаратура щита местного контроля и управления насосным агрегатом; 31 — силовое оборудование насосного блока; 32 — оборудование насосного блока

1М» (рис. 155). Эта система выполнена по блочно-функциональному принципу и включает аппаратуру: щиты автоматизации КНС, автоматизации насосного агрегата, местного контроля и управления насосного агрегата, контроля и управления вспомогательного оборудования станции, а также комплект датчиков, необходимый для нормальной работы технологического оборудования КНС. Щит автоматизации КНС включает панель КИП, блок защиты и сигнализации, блок управления и сигнализации, блок исполнительных реле (БИР). Щит автоматизации насосного агрегата включает панель КИП, блок БЗС, блок БИР, блок контроля температуры, блок задания программ.

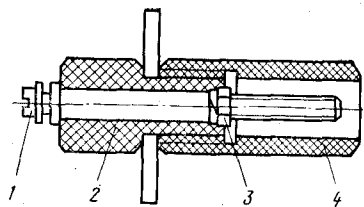


Рис. 156. Датчик утечки:
1 — контактный винт; 2 — изоляция;
3 — гайка; 4 — втулка

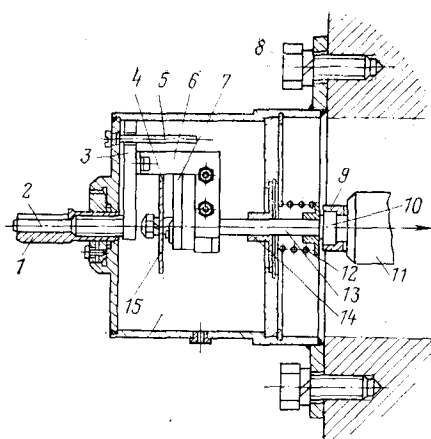


Рис. 157. Датчик осевого смещения вала насоса

Комплект датчиков включает датчики утечки из сальников ДУ-1, датчики слива воды ДСВ-1, датчики уровня жидкости ДУЖ-1М, преобразователи температуры ПТ-1 и ПТ-2.

Аппаратура щита автоматизации насосной станции осуществляет:

выбор режима работы оборудования насосной станции (автоматический, резервный, местный — от щита местного контроля и управления, отключено — насосы выключены), управление электроприводом задвижки на нагнетательной линии (полуавтоматический, местный), управление электроприводом задвижки сброса воды после регулятора давления на входе станции (полуавтоматический, местный);

измерение, контроль, аварийную и предупредительную сигнализацию предельных значений параметров работы насосной станции (давление на входе станции после регулятора давления — максимальное 0,85 МПа, давление на общем приемном коллекторе — минимальное 0,17 МПа, давление охлаждающей воды после регулятора давления — минимальное 0,25 МПа и максимальное 0,35 МПа);

выдачу сигнала разрешения запуска насосного агрегата; защиту насосного агрегата по аварийному параметру.

Аппаратура щита местного контроля и управления насосным агрегатом включает устройство для измерения давления (отсек манометров), устройство управления электроприводами (отсек управления). Аппаратура щита местного контроля и управления вспомогательным оборудованием насосной станции осуществляет измерение и контроль параметра давления на насосной станции, управление электроприводами насосной станции. Система автоматизации обеспечивает автоматический запуск всех работающих агрегатов при восстановлении напряжения после его кратковременного отключения. Резервный насос включается при снижении давления масла в начале линии до 0,3 МПа.

Датчик утечки (ДУ) предназначен для сигнализации пробоя сальника насоса (рис. 156). При пробое сальника вода замыкает электрическую цепь контактного винта 1 с «землей» и двигатель насоса отключается. Датчик крепится над картером сальника втулкой 4 электродом вниз. Втулка 4 длиннее винта 1, поэтому исключается ложное срабатывание датчика от замыкания цепи водяной пылью, которая может образоваться в картере при незначительном пропуске сальника. Преобразователи температуры ПТ-1 и ПТ-2 представляют собой латунную трубку с помещенным в нее терморезистором.

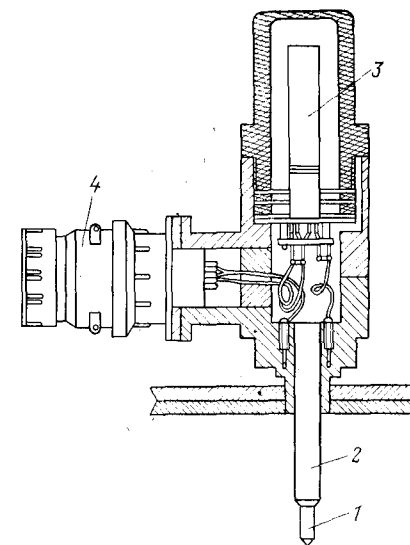


Рис. 158. Датчик уровня ДУВ-3

Для сигнализации осевого смещения вала насоса применяют разработанный Октябрьским филиалом ВНИИКАнефтегаздатчик осевого смещения ДС-1 (рис. 157). При смещении вала 11 ротора насоса ось 13 при помощи пружины 12, постоянно прижимающей ее к торцу вала, скользит во втулке 14. На конец оси, которым она прижимается к торцу вала, плотно насажен подшипник 10, на который напрессована втулка 9. Вследствие этого ось 13 не вращается, но может перемещаться поступательно. На другой конец оси с помощью пружинной шайбы и гайки крепится диск 4. Смещение вала на величину зазора диска разгрузочного устройства вызывает перемещение диска 4, который нажимает на кнопку 15 микровыключателя 7, закрепленного на кронштейне 6. При этом насосный агрегат отключается. Настройка датчика осуществляется перемещением регулирующей гайки 1 по винту 2. Микровыключатель с сектором 3 стопорится винтом 5. Для крепления датчика снимают торцовую крышку подшипника и на ее месте болтами 8 крепят фланец прибора.

Для сигнализации об угрозе затопления помещения насосной применяют серийные датчики уровня ДУВ-3 (рис. 158), состоящие из электрода 1, изготовленного из нержавеющей стали и изолированного от корпуса эпоксидной смолой 2, и поляризованного реле 3 типа РП-7. Датчик устанавливается в сигнальных углублениях пола помещения насосной, где может накапливаться жидкость. Для соединения датчика с кабелем предусмотрен штекерный разъем 4. При достижении уровнем воды электрода электрическая цепь электрод — корпус замкнется, реле РП-7 сработает и замкнет цепь управления.

§ 83. Характеристика магистрального нефтепровода как объекта автоматизации

К магистральным нефтепроводам относятся трубопроводы протяженностью более 50 км, предназначенные для транспортировки нефти из района добычи на предприятия по ее переработке, а также на железнодорожные, речные и морские пункты налива. Магистральный нефтепровод состоит из линейной части, головной и промежуточных станций, системы подводящих и отводящих трубопроводов диаметром более 500 мм и наливных пунктов. Магистральный трубопровод является весьма удобным для автоматизации объектом, что определяется простотой основного технологического процесса, заключающегося в непрерывной перекачке заданного объема нефти по трубопроводу с поддержанием в допустимых пределах давлений на нагнетании и всасывании в зависимости от установленного режима при минимальном суммарном расходе энергии на перекачку.

Режим работы магистрального нефтепровода определяется режимом работы перекачивающих станций: «через емкость», «с подключенной емкостью» и «без емкости». При режиме «через емкость» поступающая на станцию нефть подается в один или несколько резервуаров станции, а закачиваемая в трубопровод забирается в это же время подпорной насосной из другого резервуара или группы резервуаров. Этот режим применяется обычно на головных станциях, где отсутствуют средства измерения объема, массы и качества нефти, вследствие чего количество и качество поступающей и откачиваемой нефти определяются по измерениям в резервуарах. При этом режиме работы на станции должно быть большое число резервуаров с громоздкой и дорогой трубопроводной обвязкой и сложными манифольдами задвижек.

При режиме «с подключенной емкостью» основной поток нефти, поступающей из трубопровода на прием станции, подается непосредственно на всасывание подпорной насосной, а в резервуары или из них поступает только количество нефти, равное разности между потоками до и после станции. При таком режиме на станции нет необходимости иметь большое число резервуаров, значительно упрощается трубопроводная обвязка, уменьшаются потери паров нефти из-за «больших дыханий», существенно уменьшается расход на перекачку, сокращается также численность обслуживающего персонала.

При режиме «без емкости» («из насоса в насос») весь поток из трубопровода на приеме станции поступает на всасывание основной магистральной насосной. На станции не сооружаются ни резервуары, ни подпорная насосная. Трубопровод-

ная обвязка предельно упрощается. Этот режим применяется на промежуточных станциях, где не требуется иметь емкость для приема нефти от потребителя при аварийных ситуациях на магистральном трубопроводе или на этой станции. Недостатком режима «из насоса в насос» является снижение пропускной способности магистрального трубопровода на участке перед станцией, работающей на этом режиме, по сравнению с работой при наличии емкости, поскольку на всасывании основной насосной нельзя снижать давления ниже минимально допустимого по условиям кавитации насосных агрегатов. Снижение пропускной способности нефтепроводов больших диаметров при этом доходит до 10 % по сравнению с работой станций на режиме «через емкость» или «с подключенной емкостью».

Для обеспечения максимальной пропускной способности трубопровода при минимальном объеме емкостей на промежуточной станции могут применяться технологические схемы, обеспечивающие ее работу как в режиме «из насоса в насос», так и «с подключенной емкостью», с автоматическим переключением с одного режима на другой в зависимости от заполнения емкости. Эффективность такой комплексной технологической схемы особенно велика при применении телемеханики, когда диспетчер магистрального нефтепровода может быстро изменять режим работы станции, обеспечивая оптимальный режим работы нефтепровода в целом.

Линейная часть нефтепровода состоит из собственно трубопровода с установленными на нем задвижками на всем протяжении, исключая территории перекачивающих и наливных станций. К линейной части относятся также устройства защиты трубы от почвенной коррозии и разрушающего действия блуждающих токов и линии связи, простирающиеся вдоль магистрали. Магистральные нефтепроводы сооружают из труб высококачественной легированной стали диаметром 500—1200 мм. Давление на каждом участке трассы трубопровода зависит как от режима перекачки, так и от профиля местности. Наивысшее давление обычно бывает со стороны нагнетания перекачивающих станций, а также в наиболее низких местах трассы. Линейная часть — наиболее дорогая и ответственная часть магистрального нефтепровода. Аварии на линейной части (порывы и утечки из трубопровода) могут привести к огромным потерям нефти, загрязнению водоемов, гибели посевов и лесных угодий. Аварийные внеплановые остановки и перекачки снижают также экономические показатели работы трубопровода и вызывают серьезные нарушения нормальной работы многих важнейших предприятий народного хозяйства, в частности предприятий нефтехимии, автомобильного транспорта и т. д. Поэтому при автоматизации предъявляются жесткие требования к надежности применяемых систем, устройств и отдельных приборов.

Головная станция предназначена для приема нефти с нефтепромыслов и закачки ее в трубопровод. Для непрерывного приема нефти с нефтепромыслов в случае неисправности магистрального нефтепровода, а также для оптимального режима работы на головной станции предусматривают специальные емкости (резервуары). По возможности головные станции располагают на площадках центральных пунктов подготовки нефти на нефтепромыслах, что дает возможность совместного использования промышленного резервуарного парка и вспомогательных сооружений. Товароучетные операции приема нефти от нефтепромыслов (контроль качества, объема и массы нефти) могут проводиться как на головной станции магистрального нефтепровода, так и непосредственно на нефтепромыслах. Головные перекачивающие станции характеризуются производительностью, типом и мощностью установленного оборудования, числом и производительностью поставщиков, числом резервуаров и суммарной вместимостью резервуарного парка, видом энергоснабжения. На головных станциях осуществляются временное хранение, учет количества и качества нефти, а также при необходимости смешивание нефтей нескольких сортов. На приеме головной станции (рис. 159) по числу подающих нефтепроводов устанавливаются камеры 1—3 приема скребков-очистителей и фильтры-грязеуловители 4—6 [2]. Очищенная от грязи и механических примесей нефть поступает в камеру счетчиков 7, где учитывается поступившая от каждого поставщика отдельно масса нефти. С камеры счетчиков нефть поступает в распределительный коллектор 8, предназначенный для направления нефтяных потоков к свободным емкостям резервуарного парка 9. Для предотвращения попадания грязи и механических примесей из резервуарного парка в магистральный трубопровод на всасывании подпорных агрегатов 11 устанавливаются фильтры 10. Подпорные агрегаты, размещаемые под нижним уровнем жидкости в резервуарах, обеспечивают откачку нефти из резервуаров и создание необходимого подпора на приеме основных агрегатов 12. На выходе основных перекачивающих агрегатов устанавливают регулятор давления 13, поддерживающий параметры перекачки в заданных пределах. На нагнетании перекачивающей станции монтируется площадка 14 пуска скребка-очистителя.

Перекачивающие насосные обеспечивают движение нефти по трубопроводу. Число перекачивающих станций (НПС) и расстояние между ними определяются расчетным путем и зависят от многих факторов, основными из которых являются максимальная пропускная способность магистрального трубопровода при минимальных затратах на его строительство, а при эксплуатации — затратами на перекачку по нему 1 т нефти. При размещении перекачивающих станций учитываются такие параметры линейной части, как максимально допустимые давления в трубопроводе, его диаметр, свойства пе-

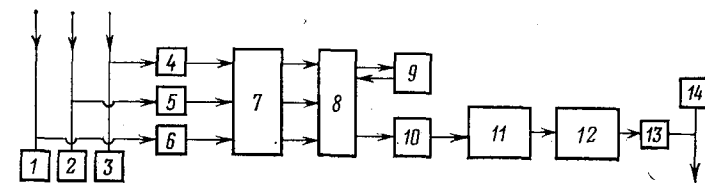


Рис. 159. Блок-схема головной насосной станции

рекачиваемой нефти, рельеф местности, эксплуатационно-технические характеристики перекачивающих агрегатов и другие факторы.

В перекачивающих насосных обычно устанавливают три-четыре однотипных магистральных насосных агрегатов, один из которых является резервным. Каждый агрегат, как правило, состоит из центробежного насоса с приводом от высоковольтного электродвигателя. Помещение, где размещаются насосные, относится к взрывоопасным, поэтому либо выбирают электродвигатели насосных агрегатов во взрывозащищенном исполнении и устанавливают их в общем помещении с насосами, либо применяют электродвигатели в нормальном исполнении и устанавливают в отдельном помещении, отгороженном от помещения насосов герметичной стеной. Трубопроводная обвязка магистральных насосов предусматривает в большинстве случаев их последовательное соединение. На всасывании и нагнетании каждого насоса устанавливается задвижка, а параллельно насосу — обратный клапан таким образом, чтобы при остановке насоса и перекрытии его задвижек поток нефти автоматически направлялся по обводному трубопроводу к следующему насосу или в магистральный нефтепровод. В результате параллельно насосам создается обводной трубопровод насосной с обратными клапанами (коллектор насосной). В конце этого коллектора со стороны нагнетания монтируются регулирующие дросселирующие органы системы автоматического регулирования давлений на всасывании и нагнетании насосной.

Технологическая схема промежуточной нефтеперекачивающей насосной, работающей в режиме «из насоса в насос», изображена на рис. 160. Поток жидкости, поступающий на станцию, попадает в камеру приема и пуска скребка. При закрытых задвижках 3 и 35 перекачивающая станция отключена от магистрали и поток жидкости, пройдя задвижки 2 и 36 и обратный клапан 22, транзитом направляется в магистральный трубопровод. Задвижки 1 и 37 служат соответственно для приема и пуска скребков-очистителей. На всасывающей части НПС устанавливаются фильтры-грязеуловители 27, 29, 31, 33, предотвращающие попадание механических примесей в перекачивающие агрегаты. Для очистки фильтров предусмотрены дренажная линия и задвижки 23, 24, 25, 26, 28, 30, 32, 34. После

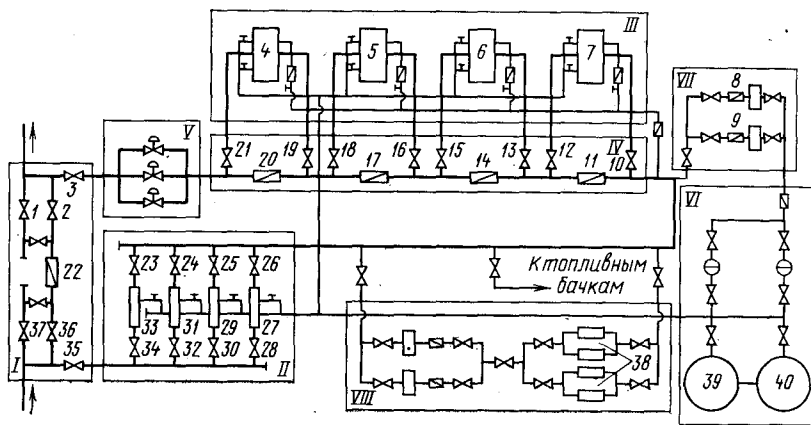


Рис. 160. Технологическая схема промежуточной нефтеперекачивающей насосной:

I — площадка приема и пуска скребка; II — площадка с фильтрами-грязеуловителями; III — перекачивающая насосная; IV — коллектор общестанционный; V — камера регуляторов; VI — резервуары-сборники утечек; VII — насосы системы откачки утечек; VIII — система охлаждения масла

фильтров-грязеуловителей поток нефти направляется в общестанционный коллектор, оборудованный обратными клапанами 11, 14, 17, 20 и агрегатными задвижками 10, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 21. Агрегатные задвижки позволяют отключать или подключать агрегаты 4, 5, 6, 7 к общестанционному коллектору. Обратные клапаны предохраняют агрегаты от работы «на себя». В камере регуляторов обычно устанавливаются не менее двух регуляторов давления (один — резервный), предназначенных для регулирования технологических параметров в заданных пределах. Из камеры регуляторов поток жидкости через задвижку 3 по магистральному трубопроводу направляется к следующей НПС. Для сбора утечек самотеком устанавливаются под землей резервуары — сборники утечек 39, 40. При резервуарах размещается камера задвижек с фильтрами и обратным клапаном, который вместе с насосами откачки утечек 8, 9 не допускает заполнения резервуаров из магистрали. Нагнетательный патрубок насосов откачки присоединяется к всасывающему трубопроводу НПС. Масло, подаваемое на подшипники перекачивающих агрегатов, охлаждается в теплообменниках 38, по которым при помощи специальных насосов перекачивается нефть.

Система охлаждения предохраняет основные электродвигатели от перегрева. Если в качестве охлаждающего реагента привода принят воздух, сооружаются специальные камеры вентиляторов с оборудованием для очистки воздуха от пыли, регуляторами температуры и давления. Избыточное регулируемое давление воздуха в корпусе электродвигателя предотвра-

щает попадание паров нефти или нефтепродуктов и образование взрывоопасных смесей.

При перекачке нефти и нефтепродуктов не всегда удается полностью исключить выделение паров нефтепродуктов, которые вместе с воздухом образуют взрывоопасные смеси. Поэтому здания насосных оборудуются системой принудительной приточно-вытяжной вентиляции, предназначенной для контроля и регулирования процентного содержания паров нефтепродуктов в атмосфере нефтенасосного помещения. Из этих же соображений насосный зал обогревается воздухом, подогретым в специальных теплообменниках — калориферных установках.

Наливные станции, промежуточные и конечные, предназначены для приема нефти из магистрального трубопровода в резервуары его потребителей. В зависимости от назначения данного трубопровода потребителями могут быть нефтеперерабатывающие заводы, железнодорожные цистерны, речные или морские танкеры или другой магистральный трубопровод. Возможна работа трубопровода на несколько различных по своим характеристикам и технологическим особенностям потребителей.

Несмотря на значительную рассредоточенность перекачивающих станций при оперативном управлении магистральный трубопровод должен рассматриваться как единый технологический комплекс. Это объясняется значительной зависимостью работы любого участка трубопровода от работы других участков. Более или менее автономная работа отдельных участков наблюдается только на магистральных нефтепроводах, промежуточные станции которых оборудованы технологическими резервуарами. Однако и в этом случае автономная работа отдельного участка возможна только в течение ограниченного промежутка времени, который определяется пропускной способностью трубопровода и запасами нефти в резервуарах предыдущего участка или объемом свободной емкости последующего участка.

На магистральных трубопроводах, обязанных по схеме «из насоса в насос», взаимосвязь работы отдельных участков носит еще более выраженный характер, поскольку в этом случае отсутствуют резервуары на промежуточных станциях. Волна возмущения, возникнув на одном из участков, может распространиться по обе стороны этого участка, достигнуть начальных и конечных пунктов магистрального трубопровода. Такой нефтепровод с позиций оперативного управления необходимо рассматривать как единый гидравлический комплекс.

§ 84. Автоматизация процессов перекачки нефти

Нефтеперекачивающая насосная станция представляет собой сложный технологический комплекс, состоящий из основных и вспомогательных систем, обеспечивающих бесперебойное

выполнение операций по перекачке нефти. К основным системам относятся подпорные насосные станции, резервуарные парки. К вспомогательным — котельные, водонасосные, насосные автоматического пожаротушения, охранная сигнализация, трансформаторные подстанции, канализационные насосные.

На НПС предусматриваются автоматическая защита оборудования при возникновении ситуаций, опасных для оборудования насосной или магистрального нефтепровода, программное управление каждым магистральным насосным агрегатом, автоматизация вспомогательных систем, насосной, централизация контроля и управления насосной. На НПС, работающих в режиме «из насоса в насос», кроме того, предусматривается автоматическое регулирование давлений на всасывании и нагнетании, а на промежуточных станциях нефтепроводов больших диаметров — и системы защиты от крутых волн давления. На перекачивающих насосных имеется также автоматическое пожаротушение, представляющее собой часть общестанционной системы автоматического тушения пожаров.

Для автоматизации различных типов перекачивающих насосных станций магистральных нефтепроводов, формирования информации для автоматизированной системы управления технологическими процессами нефтепровода и приема управляющих воздействий институтом ВНИИКАНефтегаз разработана аппаратура «Блик-1». Аппаратура представляет собой многофункциональный комплекс, включающий пневматические и электрические приборы. Система обеспечивает: программное управление технологическим оборудованием насосной станции, автоматическую защиту технологического оборудования станции в аварийных ситуациях, автоматическое включение резервного технологического оборудования, автоматическое регулирование давления на нагнетании и всасывании станции, централизованный контроль и сигнализацию состояния оборудования и параметров процесса. Схема автоматизации перекачивающей насосной станции изображена на рис. 161.

Автоматическая защита заключается в автоматическом выполнении операций управления основным и вспомогательным оборудованием, обеспечивающим локализацию аварийных ситуаций. По построению логических схем защиты подразделяются на допускающие и не допускающие повторный дистанционный запуск насосных агрегатов из районного диспетчерского пункта (РДП). У не допускающих повторный дистанционный запуск насосных агрегатов после их остановки устройствами защиты в электрической схеме защиты имеется элемент с памятью, запрещающий запуск агрегатов до тех пор, пока эта память не будет отменена. Ключ отмены памяти устанавливается только в операторной перекачивающей насосной.

Защиты, не допускающие дистанционный запуск, предусматриваются по параметрам, связанным с аварийными ситуациями, непосредственно на станции. К ним относятся: аварий-

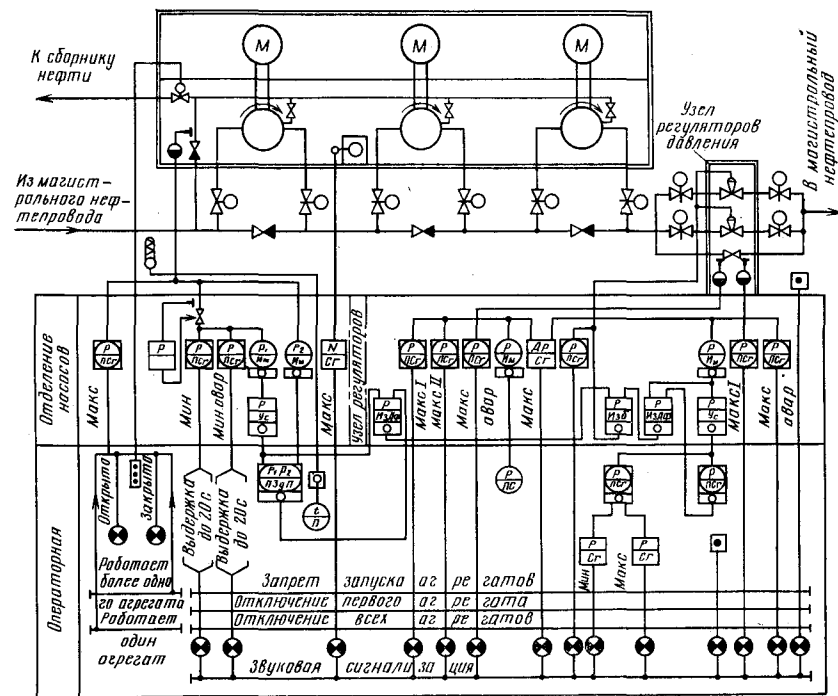


Рис. 161. Схема автоматизации перекачивающей насосной станции

ная загазованность, пожар, затопление, аварийный максимальный уровень в сборнике утечек из сальников или в резервуаре сброса волн, авария насосов централизованной смазки и охлаждения водой, авария подпорных вентиляторов отделения электродвигателей и подпора воздушных камер беспровальной установки. При срабатывании этих защит в насосную должен быть немедленно направлен соответствующий ремонтный персонал, который после устранения неисправностей снимает запрет на дистанционное включение насосной. Недопустимые изменения давления нефти на всасывании и нагнетании насосной, как правило, зависят от режима работы трубопровода, поэтому при срабатывании защит по этим параметрам диспетчер должен выяснить, какими причинами это изменение режима было вызвано, и, если это допустимо и целесообразно, повторно включить агрегаты на станции.

При аварийной загазованности в отделении насосов защита отключает все магистральные насосные агрегаты и агрегаты всех вспомогательных систем насосной, за исключением вентиляционных установок. Магистральные насосные агрегаты отключаются по программе с закрытием задвижек на всасывании и нагнетании каждого агрегата. Таким образом, при срабаты-

вании защиты прекращается доступ нефти в насосную. Включение вентиляции в отделении насосов при повышенной загазованности выполняется соответствующими устройствами автоматики. Срабатывание защиты при загазованности сопровождается световой и звуковой сигнализацией для оповещения обслуживающего персонала, который может оказаться в это время в насосной, о необходимости немедленно покинуть помещение насосной.

Защита при пожаре в отделении насосов или отделении электродвигателей срабатывает так же, как и защита при загазованности, за исключением того, что отключаются также и все вентиляционные установки. Отключение магистральных насосов, насосов откачки, сборников нефти и маслоснасосов предотвращает подачу горячей среды в насосную. Остановка вентиляторов и компрессоров предотвращает раздувание пламени воздухом. Одновременно со срабатыванием защиты при пожаре включаются система автоматического пожаротушения, подающая пену в соответствующее помещение перекачивающей насосной, и световая и звуковая сигнализация в насосной, известяющая о необходимости покинуть помещение. В качестве датчиков защиты при пожаре применяют приборы, контролирующие температуру или скорость повышения температуры над опасными местами или под потолком помещения. В отделении насосов могут применяться приборы только во взрывозащищенном исполнении, а в отделении электродвигателей — и в нормальном исполнении.

Защита при затоплении отделения насосов срабатывает так же, как и защита при загазованности, что обусловлено недостаточной надежностью датчиков аварийной загазованности. Кроме того, при проливе в насосной большого количества нефти содержание нефтяных паров в воздухе насосной намного меньше нижнего предела взрывоопасной концентрации и сигнализаторы загазованности не срабатывают. Но это не значит, что опасность взрыва в насосной отсутствует. Непосредственно над поверхностью нефти имеется взрывоопасная концентрация, и при появлении искры могут возникнуть взрыв и пожар. В качестве датчиков затопления обычно используются поплавковые реле уровня во взрывозащищенном исполнении, устанавливаемые в нижней точке лотка для отвода стоков.

При незначительных утечках нефти, масла или воды из трубопроводов в насосной защита или сигнализация при затоплении не срабатывает, так как эти утечки успевают стечь в резервуар-сборник канализационных стоков без накопления в канале насосной, служащем одновременно лотком для отвода стоков. Для информации персонала, периодически посещающего насосную, об интенсивности поступления стоков в операторной предусматривается сигнализация об автоматическом включении насосов откачки, резервуара-сборника стоков с памятью, снимаемой вручную. При аварийном макси-

мальном уровне в резервуаре-сборнике утечек из насосных агрегатов защитой предусмотрено отключение всех магистральных насосных агрегатов перекачивающей насосной, а также перекрытие задвижек на всасывающей и напорной линиях. При аварийном максимальном уровне в резервуаре сброса волны, устанавливаемом на промежуточных станциях, работающих без емкости, защита срабатывает так же, как и при переполнении сборника утечек. В этом случае дополнительно перекрывается задвижка на подключении всасывающего трубопровода насосной к магистральному нефтепроводу, что необходимо для прекращения поступления нефти в резервуар, а из него на территорию станции. В качестве датчиков аварийного максимального уровня применяют поплавковые реле уровня во взрывозащищенном исполнении.

При минимальной температуре в отделении электродвигателей происходит автоматическое отключение магистральных насосных агрегатов. Эта защита требуется при применении электродвигателей, не допускающих работу при низких температурах. В качестве датчиков используют обычные реле минимальной температуры.

Защита при аварии вспомогательных систем насосной, обеспечивающих циркуляцию смазочного масла и воды, а также подачу воздуха в отделение электродвигателей и в воздушные камеры уплотнения стальных сальников беспромвальных насосных агрегатов, осуществляется отключением магистральных насосных агрегатов. Защиты при аварии систем циркуляции смазки и воды не предусматриваются, если в системе автоматики магистральных насосных агрегатов имеются соответствующие устройства защиты.

Защита при аварии систем подачи воздуха в отделение электродвигателей требуется в соответствии с правилами техники безопасности для предотвращения проникновения в отделение электродвигателей из отделения насосов воздуха, который может при аварийных ситуациях содержать пары нефти во взрывоопасной концентрации. По той же причине требуется защита при аварии системы подачи воздуха в камеры уплотнения стальных сальников беспромвальных насосных агрегатов.

Объем автоматической защиты магистрального насосного агрегата определяется его конструктивными особенностями и технической характеристикой. Схема автоматизации магистрального насосного агрегата изображена на рис. 162. В качестве датчиков защиты по максимальной температуре применяют различные реле температуры, термометры сопротивления и термопары. В качестве датчиков утечки применяют реле уровня, контролирующее заполнение камер утечек, имеющих доступ к корпусу насоса на обоих концах его вала. Все датчики, устанавливаемые в помещении насосной, должны быть во взрывозащищенном исполнении.

Защита при повышенной вибрации дублирует защиту по

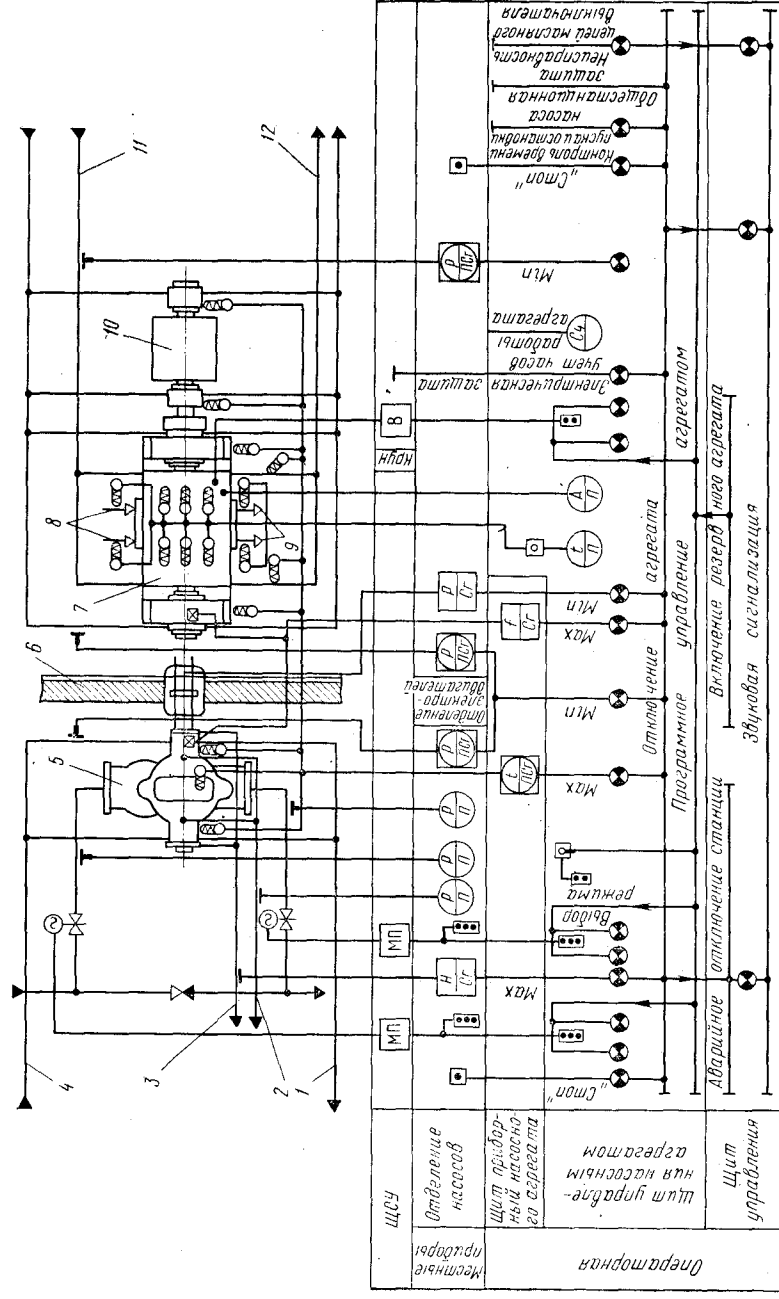


Рис. 162. Схема автоматизации магистрального насосного агрегата:

1 — масло к маслобакам; 2 — коллектор разгрузки; 3 — коллектор утечек; 4 — масло от маслоохладителей; 5 — насос; 6 — воздух от подпорных вентиляторов беспровальных камер; 7 — электродвигатель; 8 — холодный воздух; 9 — горячий воздух; 10 — воздух; 11 — вода от циркуляционных насосов; 12 — вода в канализацию

температуре подшипников, а также защиту насосной по минимальному давлению на всасывании (кавитация). Кроме того, защита при вибрации срабатывает при всевозможных механических повреждениях агрегата. Таким образом, вибрация является обобщенным параметром, характеризующим механическое состояние агрегата. На насосных, где защита по вибрации не применяется, необходимо периодически контролировать вибрацию агрегатов, чтобы судить о состоянии и необходимости их ремонта. В период запуска агрегата неизбежна повышенная вибрация, поэтому логическая схема защиты по вибрации предусматривает ее включение в работу только после того, как агрегат будет полностью запущен. В схеме предусматривается также отключение устройств защиты по вибрации у всех магистральных насосных агрегатов насосной на время переходного процесса, связанного с отключением любого из ее магистральных насосных агрегатов, так как во время этого переходного процесса наблюдается повышенная вибрация всех работающих агрегатов.

Защиты при незавершении программы запуска или остановки требуются при дистанционном управлении агрегатом для возврата его задвижек в исходное, закрытое положение. Без этой защиты неработающий агрегат может оказаться подключенным к коллектору и через его устройства разгрузки и торцовое уплотнение нефть будет течь в соответствующие резервуары-сборники, приводя к необходимости их более частой откачки. Незавершение программы остановки при срабатывании защиты по максимальным утечкам может привести к затоплению насосной нефтью. Защита при изменении состояния предусматривается на случай, если при включенном основном электродвигателе агрегата его всасывающая задвижка окажется неоткрытой. Эта защита необходима для предотвращения кавитации насоса при ошибочном закрытии задвижки на всасывании.

Управление насосными агрегатами из местного пункта управления (МПУ) и РДП, как правило, предусматривается программно-автоматическое, заключающееся в автоматическом выполнении заданной последовательности включения и отключения агрегата при получении соответствующей единичной команды. Программа включения насосного агрегата может различаться последовательностью открытия задвижек и запуска основного электродвигателя агрегата. При дистанционном включении «на закрытую задвижку» программа предусматривает сначала полное открытие задвижки на всасывании, затем запуск основного электродвигателя и после этого — открытие напорной задвижки. До команды на включение обе задвижки агрегата закрыты. Программа «на закрытую задвижку» обеспечивает наиболее легкие условия включения основного электродвигателя, так как в период запуска насос потребляет наименьшую мощность. Однако корпус насоса и на-

порная задвижка при таком запуске подвергаются повышенному давлению, так как при нулевом расходе центробежный магистральный насос развивает обычно наибольшее давление. Программа включения на приоткрытую задвижку отличается тем, что напорная задвижка агрегата включается на открытие немного раньше, чем запускается основной электродвигатель. Таким образом, облегчаются условия работы электропривода задвижки, так как в момент запуска и достижения номинальной частоты вращения электродвигателя привода затвор задвижки практически разгружен. При запуске на открытую задвижку основной двигатель агрегата включается после полного открытия напорной задвижки. При этой программе в процессе включения агрегата корпус насоса и напорная задвижка практически не испытывают давления большего, чем при работе агрегата в стационарном режиме, обратный клапан практически не испытывает ударной нагрузки и перепад давления на напорной задвижке в процессе ее открытия отсутствует. Исследования, проведенные в последние годы [2], показали, что отечественные магистральные насосные агрегаты почти при всех условиях могут запускаться по этой программе. Исключения составляют случаи, когда для уменьшения токов короткого замыкания в схеме электроснабжения двигателей устанавливаются специальные реакторы, а также когда понижающие трансформаторы установлены без соответствующего запаса мощности.

Кроме перечисленных программ агрегаты, переведенные в положение резервных для системы АВР, могут включаться по программе, при которой обе задвижки открываются заранее при переключении агрегата в резерв, а основной электродвигатель запускается при отключении работавшего агрегата и срабатывании системы АВР. При таком переключении агрегатов давления на всасывании и нагнетании станции меняются весьма незначительно и линейная часть магистрального трубопровода практически не испытывает никаких дополнительных нагрузок из-за волн давления.

При отключении агрегата предусматривается одновременное выключение основного электродвигателя и включение обеих задвижек на закрытие.

Автоматизация вспомогательных систем. Вспомогательные системы перекачивающей насосной в отношении автоматизации подразделяются на системы, работающие непрерывно при работе насосной, и системы, включаемые в работу в зависимости от значения какого-либо параметра или нескольких параметров. К первой группе относятся системы масло- и водоснабжения, приточной вентиляции отделения электродвигателей и система подачи воздуха в камеры уплотнения беспромвальной установки магистральных насосных агрегатов. Ко второй группе относятся системы откачки утечек, приточно-вытяжной вентиляции отделения насосов и компрессорной установки.

При автоматизации систем первой группы обычно предусматривается устройство для их одновременного включения по одной общей команде и отключения по другой. Команды управления даются либо вручную из диспетчерских или операторной, либо устройствами автоматики при включении отключении магистральных насосных агрегатов. Для всех вспомогательных систем, как правило, предусматриваются устройства автоматического включения резервного агрегата при неисправности рабочего. Исправность рабочего насоса или вентилятора обычно контролируется по давлению на нагнетании (величина уставки — $0,5p_{\text{раб}}$), так как большинство неисправностей этих агрегатов приводит к уменьшению этого давления. Если через несколько секунд после команды на запуск агрегат не разовьет требуемого давления, он отключается и запускается другой агрегат системы, выбранный переключателем в качестве резервного. Одновременно в операторной и МПУ включается сигнал неисправности. Сигнал в операторной дается по каждой вспомогательной системе индивидуально, а в МПУ — один общий сигнал для всех вспомогательных систем. Если через несколько секунд давление не достигнет установленной величины, он отключается и дается команда в систему защиты перекачивающей насосной на ее аварийное отключение. При остановке перекачивающей насосной дается команда на отключение вспомогательных систем первой группы. Кроме того, подается команда отключения системы маслонасосов при пожаре и загазованности в насосной. При пожаре в насосной для предотвращения дополнительного притока воздуха к очагу загорания автоматически отключается система подпорных вентиляторов отделения электродвигателей и вентиляторов подпора воздушных камер беспромвальной установки.

Автоматизация вспомогательных систем второй группы выполняется принципиально так же, как и систем первой группы. Отличие заключается главным образом в командах на включение и отключение. Система откачки утечек включается при максимальном, а отключается при минимальном уровне в одном из резервуаров. Система приточно-вытяжной вентиляции отделения насосов включается и отключается в зависимости от загазованности и температуры в помещении, а система компрессорной установки — в зависимости от давления (0,6—0,8 МПа) в соответствующем ресивере. Кроме того, по системе откачки утечек предусматриваются автоматическое подключение на слив резервуара, где появился максимальный уровень (открытие задвижки), с одновременным оклчением параллельного резервуара, а также параллельное включение резервного насоса, если максимальный уровень в откачиваемом сборнике нефти не снижается за заданное время (10—30 с).

Для предотвращения повышения давления воздуха во взрывоопасном помещении насосов сверх давления, имеющегося в смежном отделении электродвигателей, где установлено обо-

рудование в нормальном исполнении, схемой автоматизации предусмотрена защита, не допускающая включения приточных вентиляторов до включения вытяжных.

Системой автоматического управления перекачивающей насосной предусматривается аварийная сигнализация в случаях: аварийной или повышенной загазованности, пожара, затопления, аварийного максимального уровня в сборнике утечек из сальников или в резервуаре сброса волны, аварийного минимального давления всасывания, аварийного максимального и минимального давления нагнетания до и после регулирующих органов, минимальной температуры в отделении насосов, аварии вспомогательных систем первой группы (по каждой системе в отдельности).

На полностью автоматизированных и телемеханизированных магистральных нефтепроводах контроль и управление перекачивающими насосными осуществляются из РДП или МПУ. В РДП и МПУ предусматриваются контроль и управление перекачивающей насосной в объеме, требуемом для ее эксплуатации при всех возможных режимах работы и для своевременного вызова ремонтного персонала при неисправностях и аварийных ситуациях. Объемы контроля и управления принимаются минимально необходимыми как из соображений упрощения и удешевления системы, так и для предотвращения перегрузки диспетчера чрезмерно детальной информацией, которая не соответствует его роли и обязанностям. Для минимизации объемов управления используются соответствующие устройства автоматики перекачивающей насосной: устройство программно-автоматического запуска и остановки каждого магистрального насосного агрегата, устройство запуска и остановки вспомогательных систем, работающих одновременно с магистральными насосами, устройства автоматического переключения задвижек в узле пуска и приема скребка или пропуска скребка. Благодаря применению этих устройств для управления каждым магистральным насосом используются только две команды («пуск» и «стоп»), а для контроля его состояния — два сигнала («включен», «отключен собственной защитой»). Для управления всеми вспомогательными системами используются также только две команды («пуск» и «стоп»), а для контроля — два общих сигнала («включены» и «требуется ремонт»). Для управления задвижками в узле пропуска или пуска и приема скребка используются две команды («подключить» и «отключить»), а для контроля — два соответствующих сигнала.

В индивидуальной операторной, создаваемой на каждой перекачивающей насосной, предусматриваются контроль и управление в полном объеме, требуемом для ее эксплуатации при всех возможных режимах работы, на случай неисправности или отсутствия устройств дистанционного управления в диспетчерской. В операторную также выносятся вся информация о состоянии основных магистральных насосных агрегатов и

всех вспомогательных систем в объеме, позволяющем определить необходимость их ремонта. На щиты управления в операторной выносятся ключи переключения каждого основного и вспомогательного агрегата на управление вручную или на автоматическое управление в качестве основного или резервного агрегата. Для магистральных насосных агрегатов на щит выносятся также ключи управления агрегатом в целом по программе и отдельно основным электродвигателем и электроприводами задвижек на всасывании и нагнетании. Для обеспечения удобства ревизии и наладки устройств автоматики и дистанционного управления на щит оператора выносятся ключи управления и лампы сигнализации положения всех вспомогательных агрегатов. Для указания оператору или представителю ремонтно-восстановительной службы причин срабатывания устройств автоматической защиты насосной, как допускающих, так и не допускающих дистанционного запуска, а также причин срабатывания предупредительной сигнализации о неисправностях и неполадках на щите оператора монтируются соответствующие сигнальные лампы или указатели.

§ 85. Автоматическая защита нефтепроводов от перегрузок

В процессе перекачки нефти нефтепровод может испытывать превышающие устанавливаемые режимом его эксплуатации максимальные и минимальные давления. Эти перегрузки могут привести к аварии магистрального нефтепровода и оборудования, установленного на всех перекачивающих станциях. Резкие изменения давления в магистральном нефтепроводе могут быть следствием изменения режимов перекачки, порывов трубопроводов и аварийных отключений перекачивающих станций.

Автоматическая защита нефтепроводов и насосных станций от резких изменений давления осуществляется на насосных станциях следующими способами:

отключением агрегатов при достижении давления, превышающего допустимое по условиям работы трубопровода и оборудования;

автоматическим регулированием давления;

применением методов снижения крутизны фронта возникающей волны повышения давления.

Автоматическая защита насосной станции по давлениям. Эта защита предусматривает отключение агрегатов при достижении максимально допустимого давления на нагнетании и минимального — на всасывании.

В качестве сигнализаторов в схемах автоматической защиты применяют взрывозащищенные контактные манометры ВЭ-16РБ или МП4-IV. Эти приборы имеют по два сигнальных

контакта разрывной мощностью 10 В·А (ВЭ-16РБ) и 40 В·А (МП4-IV). Класс точности приборов 1,6, погрешность срабатывания сигнальных устройств 2,5%. Контакты приборов защиты по аварийным давлениям действуют непосредственно на промежуточное реле аварийного отключения насосной станции.

Первая ступень защиты по предельным давлениям при срабатывании обеспечивает отключение только одного насосного агрегата. Если в результате срабатывания системы после кратковременного снижения давление вновь будет повышаться, система отключит еще один агрегат. Таким образом, поочередно могут быть отключены все агрегаты. Поочередное отключение позволяет сохранить в работе часть агрегатов станции.

Для облегчения условий последующего запуска поочередное отклонение предусматривается, начиная с первых агрегатов по потоку нефти. Защита по минимальным давлениям на всасывании предусматривает наличие выдержки времени для предотвращения ложного срабатывания. Дело в том, что кратковременные снижения давления (8—12 с) на всасывании возможны при прохождении воздушной пробки или при переходных процессах, связанных с включением соседних агрегатов на этой станции или отключением агрегатов на предыдущей.

При наладке схемы защиты существенным является правильный выбор значений настройки сигнализаторов давлений. Неправильная настройка может привести либо к неоправданному отключению, либо к появлению опасных давлений, приводящих к аварии. Из-за погрешностей приборов и их сигнальных устройств каждый прибор может работать внутри какой-то зоны давлений. Это надо учитывать при настройке последовательности срабатываний защит.

Автоматическое регулирование давлений. Задачей автоматического регулирования давления является обеспечение поддержания регулируемого параметра на заданном уровне. Регулирование давления в магистральном нефтепроводе можно осуществлять одним из следующих способов: дросселированием потока, перепуском части потока с нагнетания на всасывание и изменением частоты вращения насосов [2]. Дросселирование потока заключается в создании искусственного сопротивления внутри потока, из-за чего увеличиваются потери на трение в дросселирующем органе и снижается давление после него (рис. 163, а). Потери энергии при дросселировании определяются значением расхода при перекачке Q и потерей напора при дросселировании $\Delta H_{др}$. Перепуск потока может осуществляться как у одного агрегата, так и у всей насосной установки, соединенной последовательно. Так как характеристика $Q-H$ магистральных насосов близка к горизонтальной, для небольшого снижения давления нагнетания (рис. 163, б) требуется большой перепуск (большой расход), при котором потребляемая насосом мощность сильно возрастает. Из рис. 163 видно, что при регулировании дросселированием мощность, потребляемая на-

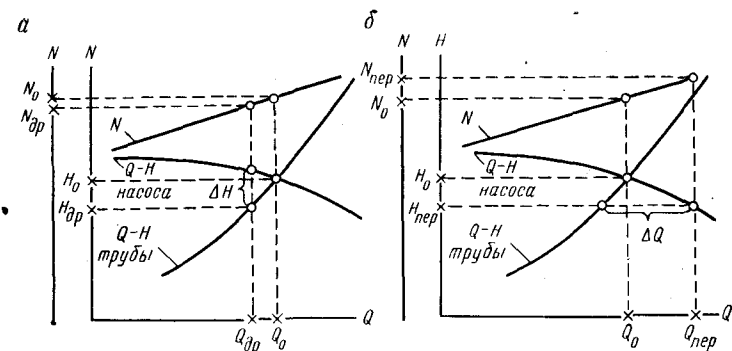


Рис. 163. График совмещенной характеристики перекачивающей насосной и трубопровода при регулировании дросселированием (а) и перепуском (б): N — мощность, потребляемая насосной; N_0 — мощность до регулирования; $N_{др}$ — мощность при регулировании дросселированием; $N_{пер}$ — мощность при регулировании перепуском; H_0 — напор, создаваемый насосной до регулирования; $H_{др}$ — напор при регулировании дросселированием; $H_{пер}$ — напор при регулировании перепуском; ΔH — потери напора при дросселировании; Q — расход при перекачке; Q_0 — расход до регулирования; $Q_{др}$ — расход при регулировании дросселированием; $Q_{пер}$ — расход при регулировании перепуском; ΔQ — расход перепуска

сосом, больше, чем при регулировании перепуском, при перекачке одного и того же объема нефти.

Метод перепуска может быть применен при крутых характеристиках насосных агрегатов или в схемах, где невозможно дросселирование. Возможность регулирования давления изменением частоты вращения насосных агрегатов обуславливается зависимостью

$$p_{рег}/p_0 = (n_{рег}/n_0)^2,$$

где p_0 и n_0 — давление и частота вращения в расчетном режиме; $p_{рег}$ и $n_{рег}$ — давление и частота вращения в режиме регулирования. Для насосов с электроприводом регулирование частоты вращения может быть получено применением промежуточной регулирующей гидромолфты или специального двигателя с регулируемой частотой вращения.

Критерием выбора метода регулирования являются наименьшие затраты на перекачку, связанные с применением данного метода регулирования. В условиях нефтепроводов необходима ограничение давления в статических режимах составляет по времени не более 3—5% от общей продолжительности перекачки и глубина регулирования — не более 10—25% от дифференциального напора, развиваемого одним агрегатом. При указанных ограничениях наиболее экономичным по суммарным затратам является метод дросселирования, получивший наибольшее распространение. При этом регулирующий орган устанавливают на нагнетании насосной, что обеспечивает

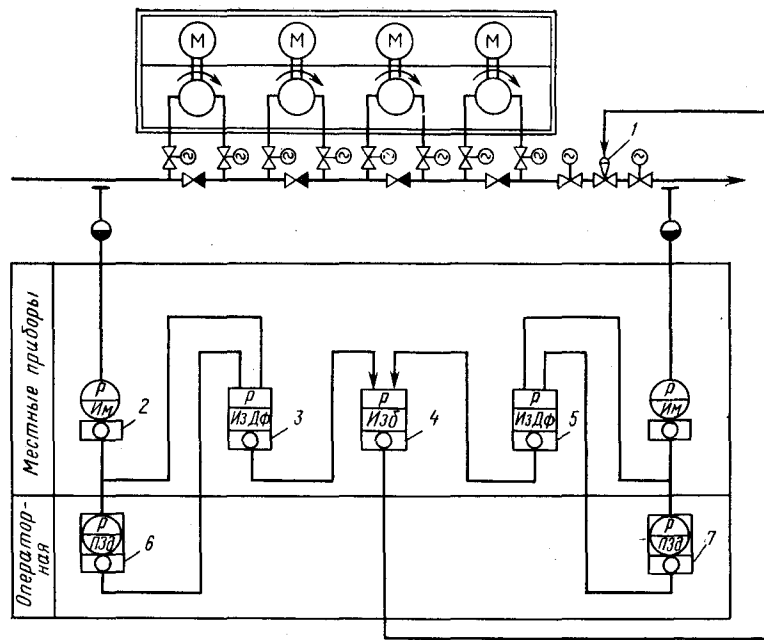


Рис. 164. Схема регулирования давлений

регулирование как давления нагнетания, так и всасывания насосной.

На рис. 164 изображена схема регулирования давлений. На привод регулирующего органа 1 поступает сигнал от регулятора давления на всасывании 3 или нагнетании 5. Регуляторы сравнивают значения измеряемых давлений с заданием от датчиков давления на всасывании 6 и нагнетании 7 и при рассогласовании подают командный импульс на исполнительный механизм регулирующего органа. Для контроля давления на трубопроводе устанавливаются манометры 2 типа МП-П2. Выходной пневмосигнал, пропорциональный измеряемому давлению, подается на пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. В регуляторе давление трубопровода p_T сравнивается с величиной задания p_3 . При рассогласовании на выходе регулятора появляется сигнал

$$p_{\text{вых}} = k(p_T - p_3) + \frac{1}{T} \int_0^t (p_c - p_3) dt + m \frac{d(p_T - p_3)}{dt},$$

где $k = (1/D) 100\%$; D — диаметр дросселирования; T — постоянная времени; m — время предварения.

Регулятор на нагнетании настраивается на прямую работу, т. е. выходной сигнал появляется при возрастании давления

выше заданного и он увеличивается по мере роста рассогласования. Регулятор на всасывании настраивается на обратную работу, т. е. его выходной сигнал увеличивается при снижении давления ниже заданного. Сигналы от обоих регуляторов поступают на прибор селектирования большого сигнала 4 типа ПФ4/5-1, который повторяет на своем выходе больший из имеющихся на входе сигналов.

Защита трубопроводов от перегрузок при переходных процессах. Такие перегрузки возникают в магистральных нефтепроводах, работающих при режимах перекачки «из насоса в насос». В этих условиях при отключении одного или нескольких насосов на промежуточной станции возникает волна повышения давления в направлении предыдущей станции и понижения — в сторону последующей. При распространении волны повышения давления в отдельных точках трассы трубопровода могут возникнуть перегрузки, превышающие предельно допустимые. Местоположение опасных точек зависит от диаметра трубопровода, скорости перекачки, расстояния между станциями и других факторов. Локальная система автоматического регулирования на станции не в состоянии предотвратить динамическое повышение давления в трубопроводе. Значение перегрузки повышается при увеличении диаметра трубопровода. Поэтому для всех трубопроводов диаметром 720 мм и более следует рассматривать необходимость применения устройств защиты трубопровода от волн повышения давления, возникающего при внезапной остановке станции. Расчет следует выполнять на худший случай: одновременное отключение всех трех агрегатов на насосной станции. Такое отключение может произойти из-за исчезновения электроэнергии.

Снижение возникающих перегрузок до допустимых значений возможно двумя способами. Первый способ заключается в создании со стороны предыдущей станции встречной волны снижения давления путем мгновенного снижения развиваемого давления при возникновении волны на последующей станции. Если встречная волна достигнет опасной точки раньше, чем к ней подойдет волна повышения давления, то суммарное давление не превысит допустимого. Встречная волна может быть создана благодаря отключению одного из агрегатов на предыдущей станции или частичному дросселированию потока на ней. Существует специальное устройство — датчик опасных возмущений (ДОВ), который при резком повышении давления за короткий промежуток времени (1—1,2 МПа за 5—6 с) дает сигнал на предыдущую станцию [2]. С приходом этого сигнала на насосной происходит соответствующее отключение агрегата или уставки регулятора давления на нагнетании. Если такой сигнал поступит на предыдущую станцию через 15—20 с после отключения, то перегрузки в трубопроводе не возникнут.

Второй способ заключается в искусственном поддержании потока в трубопроводе путем сброса части его в емкость при

остановке перекачивающей станции. Сущность процесса заключается в следующем: к трубопроводу на всасывании насосной подключается емкость, доступ потока в которую при установленном режиме герметично перекрыт. При отключении насосной станции поток начинает поступать в емкость, вследствие чего нарастание давления на всасывании насосной происходит медленно. Поскольку основное нарастание волны повышения давления происходит в первые 3—4 с, применяемые защитные устройства должны обеспечить полное открытие сливного трубопровода и пропуск максимального расхода практически мгновенно.

ГЛАВА 16.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОБЫЧИ И ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ ГАЗА

§ 86. Характеристика газовых и газоконденсатных промыслов как объектов автоматизации

Газовые и газоконденсатные промыслы представляют собой распределенную систему с многочисленными контролирующими объектами добычи, подготовки и сбора газа и конденсата. В начальный период развития газовой промышленности основными источниками газоснабжения были чисто газовые месторождения, в газах которых не содержались тяжелые углеводороды или количество их было незначительным. В настоящее время более половины добываемого газа приходится на долю газоконденсатных месторождений, при эксплуатации которых добываются как газ, так и жидкая углеводородная фаза — конденсат, являющийся ценным сырьем для химической промышленности. Особенностью газоконденсатных залежей является то, что конденсат в пластовых условиях, как правило, представлен углеводородной смесью в единой газовой фазе. Схема сбора газа и конденсата изображена на рис. 165. Газ от скважины 1 по шлейфу 2 направляется на газосборный пункт (ГСП), где проводится его полная обработка для подготовки к транспортировке (очистка от механических примесей и отделение воды и конденсата). С выхода всех ГСП газ собирается в промышленном газосборном коллекторе 3 и направляется в магистральный газопровод (МГ), а конденсат по конденсатопроводу 4 — на газодифференцирующую установку (ГФУ) для его последующей переработки. В некоторых районах на ГСП осуществляются лишь сбор и первичная сепарация газа, а окончательно он обрабатывается централизованно на головных сооружениях (ГС), совмещенных с одним из ГСП.

Для отделения газового конденсата или осушки газа на ГСП применяются установки низкотемпературной сепарации (НТС). Суть ее заключается в использовании энергии высокого

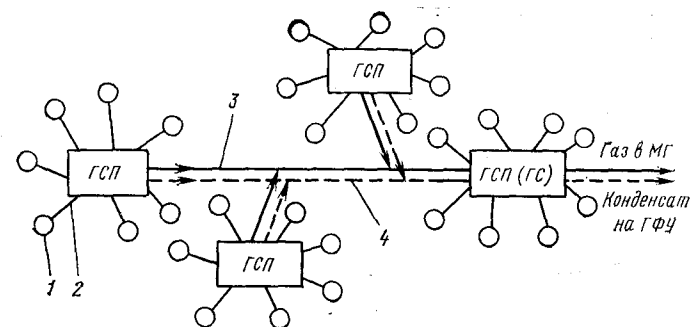


Рис. 165. Схема сбора газа и конденсата

давления газа, под которым он поступает из пласта, для получения низких температур, обеспечивающих глубокое выделение из газа углеводородного конденсата и воды. При достаточно высоком давлении газа можно снизить его температуру за счет дроссельного эффекта. Поскольку процесс низкотемпературной сепарации газа протекает при температуре -10°C и ниже, а на установку поступает обычно насыщенный влагой газ, возникают условия для образования гидратов углеводородов. Для предотвращения гидратообразования на установках НТС в поток газа впрыскивается ингибитор гидратообразования, в качестве которого наиболее часто применяется диэтиленгликоль (ДЭГ). Ингибитор растворяется в воде, имеющейся в газе, и снижает давление паров воды. После воздействия ингибитора гидраты в газе могут образоваться лишь при более низкой температуре, т. е. ингибитор снижает температуру гидратообразования. Насыщенный ДЭГ может быть регенерирован и возвращен в процесс. Однако НТС не может привести к полному извлечению высококипящих углеводородов, так как для их выделения потребовалась бы очень низкая температура. Кроме того, с помощью существующих сепараторов различных конструкций не удается полностью отделить выделившийся конденсат. Поэтому иногда совместно с НТС используется процесс короткоциклового адсорбции (КЦА), основанный на поглощении из газа влаги и углеводородного конденсата твердым адсорбентом. В таком совместном процессе при помощи НТС из газа извлекаются тяжелые углеводороды и большая часть влаги, а при помощи КЦА — оставшаяся влага и высококипящие углеводороды.

Газовые и газоконденсаторные месторождения находятся обычно в отдаленных от промышленных центров районах, объекты газовых промыслов рассредоточены на больших площадях, достигающих десятков и сотен квадратных километров, поэтому автоматизация и телемеханизация газовых и газоконденсатных месторождений играют огромную роль в повышении эффективности их эксплуатации.

При автоматизации добычи газа предусматривается регулирование давления в газосборном коллекторе. Поддержание заданного давления газа на выходе с промысла обеспечивает наилучшие условия работы компримирующих агрегатов головной компрессорной станции. Сложность автоматической стабилизации давления определяется рассредоточенностью ГСП и их связью через промысловый газосборный коллектор, а также неравномерностью отбора газа в магистральном газопроводе.

Для получения максимального количества конденсата и лучшей осушки газа весьма важным является автоматическое поддержание заданной температуры в сепараторах. Система автоматизации должна предусматривать автоматический ввод ингибиторов против образования кристаллогидратов. Система автоматизации и телемеханизации должна также обеспечить автоматический сброс конденсата из линейных конденсатосборников, дистанционное включение и отключение скважин, дистанционный контроль основных технологических и учетных параметров.

§ 87. Автоматическое управление производительностью промысла

Основная задача автоматического управления производительностью газового промысла заключается в поддержании ее в соответствии с газопотреблением. Потребителями газа являются магистральные газопроводы, близлежащие населенные пункты и предприятия. Известно, что газопотребление носит нестационарный характер и различно в различные времена года, дни недели и часы суток. Необходимо оперативно согласовывать число материальных потоков во всех звеньях добычи и потребления газа, управляя производительностью промысла.

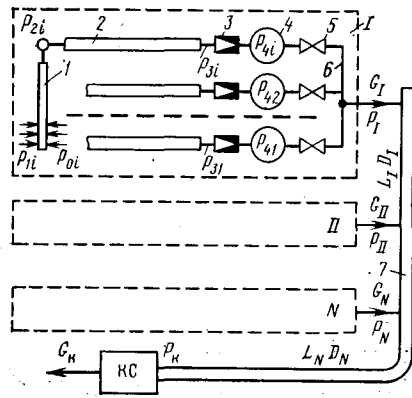


Рис. 166. Схема газосборной сети промысла

Схема газосборной сети промысла изображена на рис. 166. Газ из скважины 1 по газовому шлейфу 2 поступает на сборный пункт (СП) I, II, ..., N через регулирующие штуцеры 3. После очистки в сепараторах 4, пройдя запорные задвижки 5, он собирается в коллекторе СП 6 и направляется в промысловый газосборный коллектор 7, имеющий длину \$L_N\$ до первой компрессорной станции (КС). За критерий оптимальности уп-

равления производительностью газового промысла можно принять минимальные энергозатраты на сжатие газа. Это будет при максимальном давлении газа на входе в компрессорную станцию. Движение газа в промысловой газосборной сети описывается следующей системой уравнений [36]: на участке между сборными пунктами I и II

$$p_I^2 - p_{II}^2 = \frac{16}{\pi^2} \lambda_I z_I R T_I \frac{L_I}{D_I^5} G_I^2; \quad (16.1)$$

на участке между сборными пунктами II и III

$$p_{II}^2 - p_{III}^2 = \frac{16}{\pi^2} \lambda_{II} z_{II} R T_{II} \frac{L_{II}}{D_{II}^5} (G_I + G_{II})^2; \quad (16.2)$$

на участке между сборными пунктами N-1 и N

$$p_N^2 - p_K^2 = \frac{16}{\pi^2} \lambda_N z_N R T_N \frac{L_N}{D_N^5} (G_I + G_{II} + \dots + G_N)^2. \quad (16.3)$$

Суммируя правые и левые части уравнений (16.1), (16.2) и (16.3), получим

$$p_K^2 = p_I^2 - \frac{16}{\pi^2} \sum_{j=1}^N \lambda_j z_j R T_j \frac{L_j}{D_j^5} \left(\sum_{j=1}^N G_j \right)^2, \quad (16.4)$$

где \$p_I, \dots, p_K\$ — давления газа в точках подключения j-го СП (\$j=I, II, \dots, N\$) и перед компрессорной станцией; \$\lambda_j\$ — коэффициент гидравлического сопротивления; \$z_j\$ — коэффициент сжимаемости газа; \$R\$ — газовая постоянная; \$T_j\$ — абсолютная температура; \$L_I, L_{II}, \dots, L_N, D_I, D_{II}, \dots, D_N\$ — соответственно длина и диаметр трубопровода между соответствующими СП; \$G_I, G_{II}, \dots, G_N\$ — притоки газа в точках подключения соответствующего СП.

Из (16.4) видно, что давление на входе в компрессорную станцию зависит от давления в начале промыслового газосборного коллектора \$p_I\$ и распределения нагрузок между сборными пунктами. При этом чем больше давление \$p_I\$, тем больше давление \$p_K\$. Отсюда следует, что давление газа в точке подключения первого сборного пункта к промысловому коллектору необходимо поддерживать максимальным. Так как по мере удаления от точки подключения первого СП к коллектору давление падает, при поддержании \$p_I = p_{I\max}\$ и одинаковой прочностной характеристике трубопровода на всех его участках \$p_{j\max} = p_{I\max}\$ обеспечивается ограничение по давлению \$p_j \leq p_{j\max}\$. Для обеспечения максимального давления на входе в компрессорную станцию необходимо так распределить нагрузку между сборными пунктами, чтобы второе слагаемое уравнения (16.4) стало минимальным. Отсюда задача оптимального управления производительностью промысла заключается в том,

чтобы обеспечить равенство $p_1 = p_{1\max}$ и установить такие производительности G_j сборных пунктов, при которых

$$\min F(G_j) = \min \sum_{j=1}^N a_j (\sum G_j)^2 \quad (16.5)$$

при

$$\sum G_j = G_k, \quad (16.6)$$

$$m_j \leq G_j \leq M_j, \quad (16.7)$$

где

$$a_j = \frac{16}{\pi^2} \lambda_j z_j R T_j \frac{L_j}{D_j^5};$$

G_k — нагрузка промысла (отбор газа компрессорной станцией); m_j и M_j — соответственно минимальная и максимальная производительности сборного пункта

$$m_j = \sum_{i=1}^n G_{ji \min}; \quad M_j = \sum_{i=1}^n G_{ji \max}, \quad (16.8)$$

$G_{ji \min}$, $G_{ji \max}$ — минимально и максимально допустимые дебиты газовых скважин на j -м СП, устанавливаемые геологической службой газодобывающего предприятия; n — число скважин на СП.

Задача (16.5) — (16.7) состоит в том, чтобы из множества допустимых распределений нагрузок между сборными пунктами выбрать такую, которая обеспечит заданную производительность промысла с наименьшими потерями давлений, поддерживать максимально допустимое давление в точке подключения первого СП к промысловому коллектору, обеспечить постоянное давление на входе компримирующих агрегатов, т. е. согласовывать производительность промысла с количеством отбираемого магистральным газопроводом газа.

С целью стабилизации давления на выходе промыслового газосборного коллектора на промысле выделяют две группы скважин: скважины, дебит которых регулируют в целях компенсации внешних возмущений, и скважины, дебит которых поддерживают в течение длительного промежутка времени постоянным. Объединив регулируемые скважины на одном СП, получают регулируемый СП. Остальные СП с нерегулируемыми скважинами являются базовыми. Задача поддержания постоянного давления в промысловом газосборном коллекторе решается путем автоматического изменения производительности регулируемого СП. Если регулируемый СП не может компенсировать изменение отбора газа, то диспетчер промысла изменяет в допустимых пределах дебит базовых скважин, после чего вступает в действие автоматическая система изменения производительности регулируемого СП.

Рис. 167. Схема автоматического управления производительностью регулируемого сборного пункта

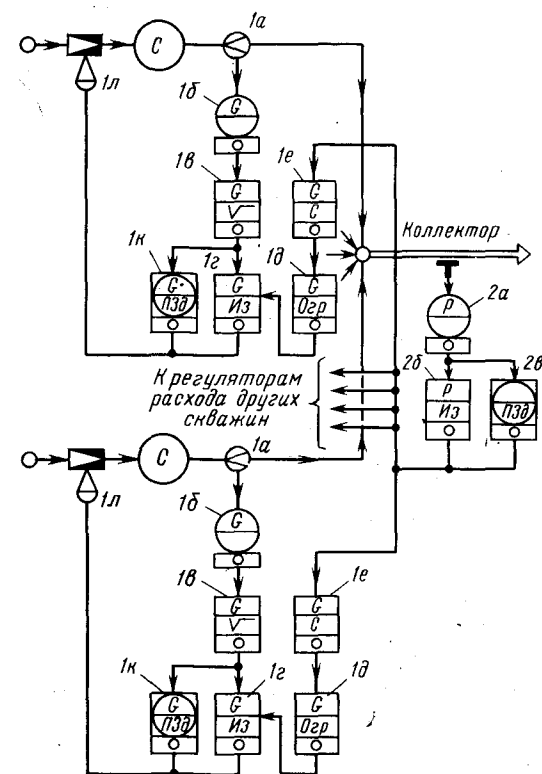


Схема автоматического управления производительностью регулируемого СП изображена на рис. 167. Давление на выходе измеряется манометром с пневмопреобразователем 2а типа МП-П2, выходной сигнал которого поступает на автоматический пропорционально-интегральный регулятор 2б типа ПР321, установленный на вторичном регистрирующем приборе 2в типа ПВ10.13. Вторичный прибор снабжен переключателем на автоматическое и дистанционное управление ручным задатчиком. При рассогласовании текущего и заданного значений давления ПИ-регулятор выдает корректирующий импульс параллельно на все системы автоматического регулирования дебита скважин. При помощи переключателя вторичного прибора 2в можно перейти на ручное управление, а при помощи ручного задатчика — дистанционно изменить задание регулятором 1г дебита скважин. Система автоматического регулирования дебита скважины состоит из камерной диафрагмы 1а, дифманометра с пневмовыходом 1б, блока извлечения квадратного корня 1в типа ПФ1.17, пропорционально-интегрального регулятора 1г типа ПР3.21, вторичного регистрирующего прибора 1к типа ПВ10.13, регулирующего штуцера 1л типа ШРП-1, прибора умножения сигнала на постоянный коэффициент (С) 1е

типа ПФ1.9 и блока ограничения сигнала 1д типа ПП11.1. При помощи прибора 1е достигается требуемое соотношение между дебитами различных скважин. Если из всех скважин допускается одинаковый отбор газа, этот прибор исключают из системы. Блок ограничения сигнала 1д поддерживает дебит скважины в допустимых пределах. На рисунке показан один такой блок, но на практике устанавливают два: один для ограничения по максимуму, другой — по минимуму.

Системы могут работать в следующих режимах.

Режим каскадного регулирования. Переключатель вторичного прибора 2в находится в положении «автоматическое», и система регулирования поддерживает заданное регулятором давления 2б значение расхода газа.

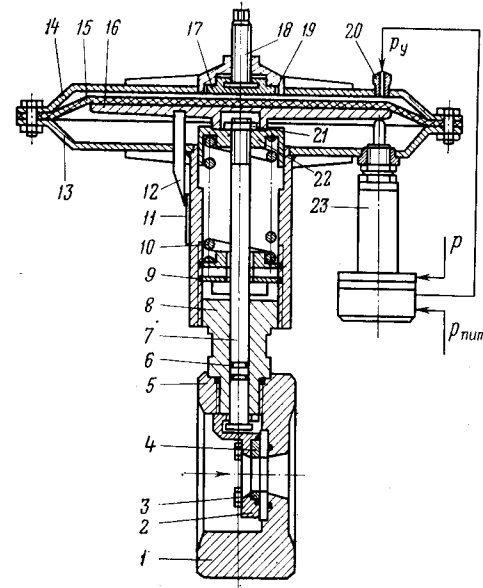
Режим дистанционного управления производительностью СП. Переключатель прибора 2в находится в положении «ручное», и задание всем регуляторам расхода поступает от его ручного задатчика.

Режим автоматической стабилизации дебита отдельной скважины. Переключатель прибора 1к отключает регулятор дебита 1г от регулятора давления 2б. Заданное значение расхода вводится в регулятор 1г при помощи задатчика вторичного прибора 1к. Регулятор поддерживает это значение расхода.

Режим дистанционного управления регулирующим штуцером. Переключатель вторичного прибора 1к находится в положении «ручное». Выходной сигнал регулятора 1г отключен от регулирующего штуцера 1л, и последний управляется сигналом ручного задатчика прибора 1к. Возможность изменения режима отдельных элементов не прекращается функционирование системы в целом. Дебит скважин регулируют на базовых сборных пунктах при помощи систем, отличающихся от рассмотренной отсутствием регулятора давления 2б, блоков 1е и 1д. Заданные значения расхода газа устанавливаются оператором. Когда сборный пункт является необслуживаемым объектом, задание регуляторам устанавливается диспетчером промысла по системе телемеханики. Для этого сигнал, пришедший с диспетчерского пункта на контролируемый, при помощи электропневмопреобразователя преобразуется в пневматический сигнал и вводится в камеры задания регуляторов расхода. В остальном действие системы такое же.

Применяемый для регулирования дебита скважин исполнительный механизм — регулирующий штуцер ШРП-1 — состоит из проходного отверстия переменного сечения и мембранного пневмопривода (рис. 168). Регулирующий штуцер рассчитан на давление 32 МПа и имеет условный проход 100 мм. В корпусе 1 регулирующего устройства расположены вкладыши 3, 4 и заслонка. Вкладыш 3 неподвижен, а вкладыш 4 может совершать возвратно-поступательное движение вместе с заслонкой 2. Уплотнение между вкладышем 3 и корпусом 1 вы-

Рис. 168. Схема регулирующего штуцера ШРП-1



полнено резиновым кольцом. Так же выполнено уплотнение между заслонкой и вкладышем 3. Заслонка 2 перемещается в двух направляющих типа «ласточкина хвоста». Пневмопривод штуцера состоит из нижней 13 и верхней 14 крышек, между которыми закреплена мембрана 15 штока 7. Нижний конец штока связан с заслонкой 2, а верхний при помощи гайки 21 прикреплен к подвижной втулке 22 позиционера 23. Мембрана 15 расположена на диске 16, нижний торец которого опирается на подвижную втулку 22. На диске укреплен указатель 12, перемещающийся при работе штуцера относительно неподвижной шкалы 11. Внутри цилиндра, приваренного к нижней крышке мембраны, между втулками 9 и 22 расположена пружина 10. Натяжение пружины регулируется резьбовой втулкой 9. Пневмопривод крепится к корпусу регулирующего устройства при помощи соединительной втулки 8, уплотненной резиновыми кольцами 5 и 6. На нижней крышке 13 закреплен позиционер 23. Шток позиционера упирается в диск 16. К позиционеру подводится воздух под давлением $p_{пит} = 0,25$ МПа с управляющим давлением $p = 20 - 100$ кПа от автоматического регулятора. От позиционера через штуцер 20 управляющий сигнал p_y поступает в надмембранную полость. Под действием этого давления мембрана развивает усилие, при котором перемещается вниз шток 7 с заслонкой 2 и вкладышем 3. При этом проходное сечение регулирующего штуцера уменьшается. Перемещение штока с заслонкой, а следовательно, и проходное сечение штуцера пропорционально значению управляющего давления. Регулирующий штуцер комплектуется сменными вкладышами,

позволяющими изменять рабочий проход в диапазонах 30—21, 25—16, 20—11, 18—8 мм при изменении управляющего сигнала от 20 до 100 кПа. При отказе автоматического регулятора или ручного задатчика проходное сечение штуцера изменяется вручную вращением винта 18 (в резьбе крышки 19), который при этом нажимает на тарель 17, что приведет к перемещению штока 7 с заслонкой.

Для регулирования производительности высокодебитных скважин применяется регулирующий штуцер ШР-10, имеющий условный проход 200 мм. Этот штуцер также состоит из мембранного пневмопривода и регулирующего устройства. В качестве регулирующего устройства применена расположенная в корпусе заслонка, закрепленная на поворотном валу. Вал поворачивается пневмоприводом, действующим от управляющего пневмосигнала.

§ 88. Автоматическое управление процессом низкотемпературной сепарации газа

Метод низкотемпературной сепарации (НТС) обеспечивает выделение из добываемого газа воды и конденсата, что необходимо для нормальной работы газосборных сетей и магистрального газопровода. Осушка и очистка газа достигаются в результате его охлаждения и последующей сепарации сконденсировавшейся жидкости. Для получения низких температур в установках используют пластовую энергию газа или искусственное охлаждение. В первом случае температура понижается в результате адиабатического расширения (дросселирования) газа, во втором — использования специальных машин и установок. В промышленности преимущественное распространение получили технологические схемы с получением холода за счет дросселирования газа на штуцере. Для предупреждения образования кристаллогидратов в местах резкого снижения температуры вводят ингибиторы гидратообразования. Сущность предупреждения гидратообразования методом ввода ингибиторов состоит в том, что последний поглощает из газа парообразную влагу и вместе со свободной водой, сконденсировавшейся в результате охлаждения газа, образует раствор. Упругость паров воды, соответственно и температура точки росы снижаются. При этом понижается и равновесная температура гидратообразования. В качестве ингибиторов применяют метиловый спирт (метанол) и диэтиленгликоль (ДЭГ). Опыт показал, что наиболее надежным ингибитором является ДЭГ. Учитывая возможность его регенерации на промышленной установке, применение ДЭГ, несмотря на высокую стоимость его, выгоднее, чем метанола. Понижение равновесной температуры гидратообразования является функцией концентрации ингибитора и определяется по формуле [36]

$$\Delta\theta = \frac{1297c}{M(100-c)}, \quad (16.9)$$

где c — концентрация ингибитора; M — молярная масса ингибитора (для ДЭГ $M=106$).

Из (16.9) следует, что для понижения температуры гидратообразования на $\Delta\theta$ концентрация насыщенного ДЭГ на выходе из сепаратора должна быть

$$c = \frac{100}{1 + \frac{1297}{M(\theta' - \theta)}}, \quad (16.10)$$

где θ' — равновесная температура гидратообразования; θ — температура газа в сепараторе. Равновесная температура однозначно определяется по давлению и относительной плотности газа:

$$\theta' = a + bp, \quad (16.11)$$

где a и b — коэффициенты, значения которых для газов с различной относительной плотностью могут быть определены по равновесным кривым; p — давление в сепараторе.

С учетом (16.11) уравнение (16.10) примет вид

$$c = \frac{100}{1 + \frac{12,24}{a + bp - \theta}}. \quad (16.12)$$

Таким образом, если расход ДЭГ поддерживать на уровне, обеспечивающем его конечную концентрацию, определяемую (16.12), то тем самым будет обеспечено нужное понижение равновесной температуры гидратообразования.

Отсюда может быть определен алгоритм управления процессом ввода ДЭГ:

по текущим значениям θ и p с использованием отношения (16.12) определить величину c ;

определить текущее значение концентрации ДЭГ c в сепараторе и разность $\Delta c = c' - c$;

при $\Delta c > 0$ уменьшить, а при $\Delta c < 0$ увеличить расход ДЭГ на величину, обеспечивающую равенство $\Delta c = 0$.

Этот алгоритм можно реализовать замкнутой системой автоматического регулирования концентрации.

Системой автоматического управления НТС должно быть обеспечено автоматическое регулирование производительности установок, температурного режима, расхода ингибитора гидратообразования, давления газа в аппаратах и газопроводах и уровня жидкости в аппаратах.

При автоматизации установки низкотемпературной сепарации газа (рис. 169) газ от скважины под действием устьевого давления поступает в сепаратор первой ступени $C-1$, где происходит сепарация жидкости, выделившейся из газа при движении от забоя скважины. Жидкость сбрасывается в емкость $E-1$, а газ направляется в теплообменник $T-1$ типа «труба

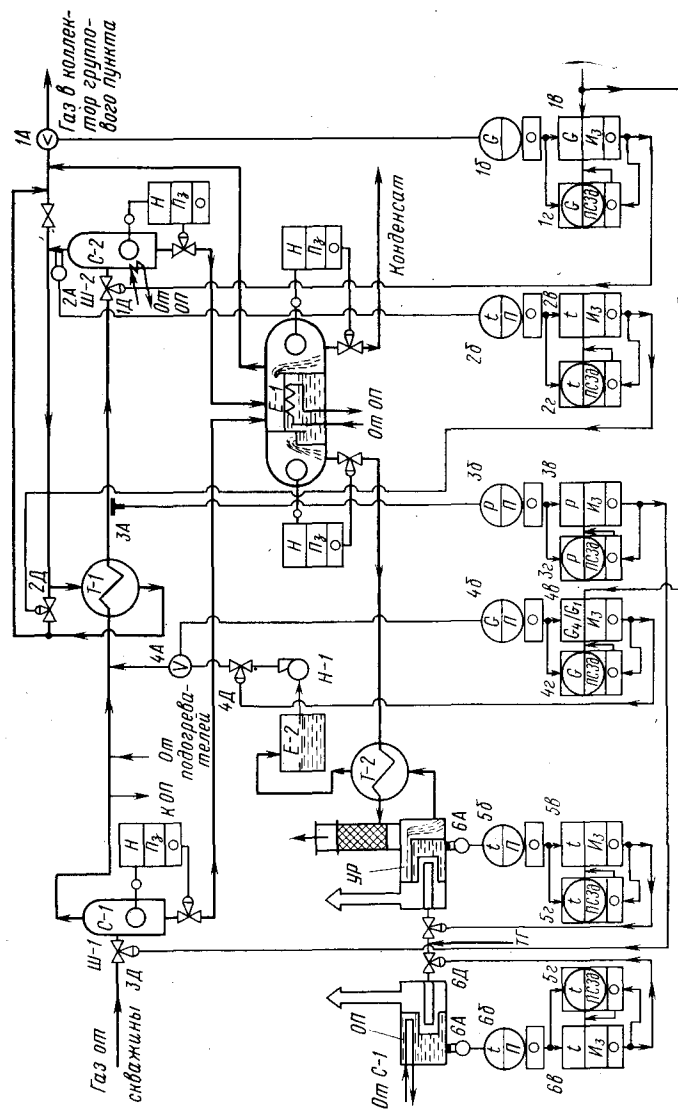


Рис. 169. Схема автоматизации установки низкотемпературной сепарации газа

в трубе», где он охлаждается газом, поступающим в межтрубное пространство из низкотемпературного сепаратора С-2. Из теплообменника Т-1 газ поступает через регулирующий штуцер Ш-2 в низкотемпературный сепаратор С-2. С помощью штуцера осуществляется регулирование давления газа. В результате совместного действия теплообменника Т-1 и штуцера Ш-2 температура газа в сепараторе достигает 10—14 °С и происходит выделение жидкости. Осушенный газ поступает в теплообменник Т-1, где охлаждает поступающий из скважины, а затем направляется в газосборный коллектор группового пункта. В газовый поток перед входом в теплообменник Т-1 высоконапорным дозировочным насосом Н-1 впрыскивается через форсунки концентрированный раствор ДЭГ, который поглощает имеющуюся в газе влагу. В результате этого в нижней части низкотемпературного сепаратора собирается смесь конденсата и насыщенного ДЭГ, которая поступает в разделительную емкость Е-1. Разделение происходит за счет разности плотностей и имеющих в емкости перегородок. Для улучшения разделения смеси сепаратор С-2 и разделительная емкость Е-1 снабжены змеевиковыми подогревателями, подогреваемыми частью газа высокого давления, который после сепаратора С-1 направляется в огневой подогреватель ОП. С температурой около 150 °С газ поступает в змеевики подогреваемых аппаратов, а затем возвращается в газовый поток перед теплообменником Т-1.

Конденсат из разделительной емкости Е-1 направляется в конденсатопровод, газ — в коллектор газосборного пункта, а насыщенный ДЭГ — через теплообменник Т-2 на установку регенераций УР. После предварительного подогрева в теплообменнике Т-2 насыщенный ДЭГ поступает в отпарную колонну установки регенерации. Пары воды отводятся через верхнюю часть колонны, а собирающийся в нижней части установки регенерированный ДЭГ перетекает в промежуточную емкость Е-2, подогревая по пути через теплообменник Т-2 поток насыщенного ДЭГ. С помощью дозировочного насоса Н-1 ДЭГ снова вводится в процесс. Установка регенерации и огневой подогреватель — общие для группового пункта.

Система регулирования основных технологических параметров показана на рис. 169. При реализации этих систем в качестве измерительных устройств применяются главным образом серийные приборы ГСП, а также пневматические регуляторы и вторичные приборы системы «Старт».

Система автоматического регулирования дебита скважины. Дебит измеряют с помощью диафрагмы 1А и дифманометра 1Б. Для регулирования дебита скважины выходной пневматический сигнал дифманометра 1Б, пропорциональный текущему значению дебита, поступает на вход изодромного регулятора 1В и одновременно на вторичный прибор 1Г. От задатчика, помещенного во вторичном приборе 1Г, пневматический сигнал,

пропорциональный заданному значению дебита, поступает во вторую камеру издромного регулятора 1в. Выходной сигнал регулятора поступает на регулируемый штуцер Ш-2 (1Д) и одновременно на вторичный прибор 1г. Таким образом, на вторичном приборе 1г сведены значения трех параметров: текущего и заданного значений дебита и давления в линии исполнительного механизма. Все элементы этой системы, за исключением исполнительного механизма Ш-2, могут быть реализованы с помощью серийно выпускаемых общепромышленных средств автоматизации.

В качестве исполнительного механизма может быть применен регулируемый штуцер с пневмоприводом типа ШРП-1. При изменении выходного сигнала регулятора пневматический мембранный привод этого штуцера перемещает заслонку регулирующего органа, изменяя площадь его проходного сечения. Таким образом, при изменении расхода газа через диафрагму 1а система регулирования будет восстанавливать заданное значение расхода изменением площади проходного сечения штуцера Ш-2. Однако при перемещении заслонки штуцера кроме стабилизации расхода исполнительный орган может оказать возмущающее действие по отношению к давлению в сепараторе С-1. Отборное устройство давления 3А расположено после теплообменника Т-1. Давление измеряется вторичным прибором 3б. В случае рассогласования между текущим значением давления на входе манометра 3б и заданным значением, поступающим от задатчика вторичного прибора 3г, регулятор 3в изменит проходное сечение исполнительного механизма Ш-1 (3Д), восстанавливая заданное значение давления в сепараторе С-1.

Система автоматического регулирования расхода ДЭГ. Непрерывный ввод ДЭГ в газовый поток в заданном количестве является необходимым условием нормальной работы установки НТС. Расход ингибитора должен соответствовать дебиту газа, поступающего из скважины. При изменении дебита газа система регулирования расхода ингибитора должна перестраиваться на другое значение. Указанное условие может быть реализовано с помощью системы связанного регулирования, показанной на рис. 169. Она состоит из датчика расхода ингибитора 4А, дифманометра 4б, регулятора соотношения двух параметров 4в, вторичного прибора 4г и исполнительного механизма 4д.

Приборы переменного перепада давления для измерения расхода не могут быть применены в качестве датчиков расхода ингибитора из-за пульсирующего характера потока на выходе плунжерного дозирующего насоса Н-1, небольшого значения расхода, существенного изменения вязкости ДЭГ, а также большого статического давления.

Датчик расхода ингибитора ДР-22 (рис. 170) состоит из собственно датчика и дифманометра. Датчик имеет приемник — камеру 6 переменного уровня и дроссель 3, расположенный в корпусе 8. Корпус датчика одновременно является уравни-

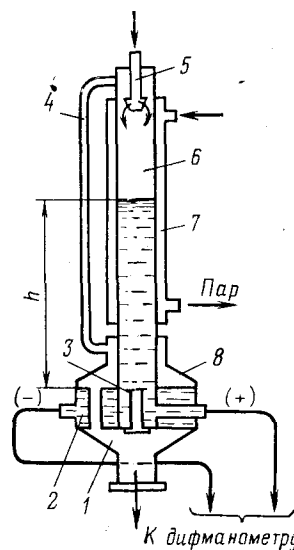


Рис. 170. Датчик расхода ингибитора ДР-22

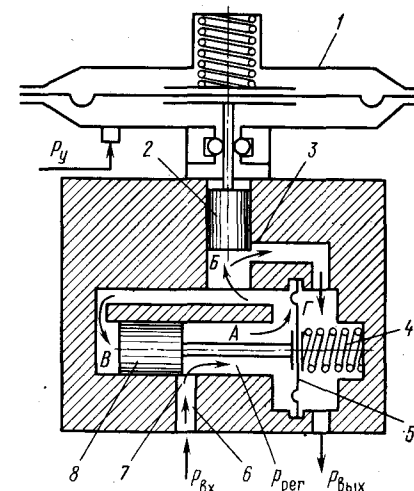


Рис. 171. Регулятор расхода жидкости РРЖ-1

тельным сосудом, в который заливается жидкость. Благодаря переливной трубке 2 в уравнительном сосуде устанавливается постоянный уровень жидкости. Приемная камера 6 при необходимости может обогреваться паром, подаваемым в кожух 7. В верхней части 6 приемника расположен штуцер 5, через который жидкость разбрызгивается и стекает по стенке приемника, чем достигается сглаживание пульсирующего потока. При помощи трубки 4 выравниваются давления в газовом пространстве приемника и трубопроводе, поэтому истечение ингибитора через дроссель 3 происходит только под действием столба жидкости в приемной камере. Каждому установившемуся значению притока жидкости в приемник соответствует определенный уровень. Уровень и расход связаны отношением

$$H = Q^2 / (\alpha^2 F^2 \cdot 2g), \quad (16.13)$$

где Q — расход ингибитора; α — коэффициент расхода; F — площадь отверстия диафрагмы.

Уровень измеряется дифманометром типа ДС-П с пневматическим выходным сигналом. Датчик расхода ДР-22 рассчитан на рабочее давление 32 МПа и диапазоны расхода 0—0,007, 0—0,1, 0—0,02 и 0—0,03 кг/с. Датчик устанавливается на трубопроводе при помощи фланца 1.

Регулятор расхода жидкости РРЖ-1 (рис. 171) представляет собой регулируемый дроссель, совмещенный с регулятором перепада давления. Регулятор обеспечивает постоянный расход ингибитора гидратообразования при колебаниях давления жидкости на его входе и выходе. Регулируемый дрос-

сель включает в себя щель 3 и плунжер 2 с мембранным приводом 1. Регулятор перепада давления состоит из поршня 8, мембраны 5 и пружины 4. Ингибитор от насоса поступает по каналу 6 через отверстие 7 в камеру А регулятора, затем в камеры В и Б, далее через щель 5 в камеру Г и на выход. В отверстии 7 осуществляется редуцирование входного давления $p_{вх}$ до величины $p_{рег}$. Площадь отверстия 7 изменяется при перемещении поршня 8. При этом изменяется $p_{рег}$, которое действует на мембрану 5 и сжимает пружину 4. Усилие пружины определяет перепад давления на щели 3. Под действием пневматического сигнала, поступающего от регулятора соотношения 4в (см. рис. 169) под мембрану пневмопривода 1, плунжер 2 будет изменять проходное сечение щели 3, устанавливая необходимое значение расхода ингибитора. Возможные колебания давлений на входе $p_{вх}$ и выходе $p_{вых}$ регулятора могут привести к изменению расхода ингибитора через щель 3. В этих условиях заданный расход ингибитора при постоянном сечении щели 3 обеспечивается регулятором перепада давления. Например, при увеличении входного давления $p_{вх}$ увеличивается и давление $p_{рег}$. Мембрана 5, преодолевая упругость пружины 4, перемещается вправо. Поршень 8 уменьшает площадь проходного сечения отверстия 7, восстанавливая давление $p_{рег}$, а следовательно, и перепад давления на щели 3 и расход через нее до прежних значений. При уменьшении давления на входе $p_{вх}$, а также при изменении давления на выходе $p_{вых}$ регулятор действует аналогично.

Регулятор РРЖ-1 рассчитан на рабочее давление 32 МПа, расход жидкости 3—90 л/ч и ее температуру 10—30 °С.

В целом система связанного регулирования расхода ингибитора работает следующим образом. На регулятор соотношения 4в (см. рис. 169) поступают пневматический сигнал от дифманометра 4б, пропорциональный текущему значению расхода ингибитора, и пневматический сигнал, пропорциональный заданному значению дебита скважины, определяемому центральным регулятором давления в промышленном газосборном коллекторе. В случае постоянного задания регулятору дебита скважины 1в задание регулятору соотношения 4в также не меняется и регулятор 4в, воздействуя на исполнительный механизм 4д (РРЖ-1), устанавливает соответствующее значение расхода ингибитора. Возможные отклонения расхода ингибитора устраняются регулятором перепада давления блока РРЖ-1. При изменении задания регулятору дебита 1в заданное значение регулятора 4в также меняется и в соответствии с установленным коэффициентом соотношения его выходной сигнал с помощью пневмопривода блока РРЖ-1 устанавливает новый расход ингибитора.

Система автоматического регулирования температурного режима. Такая система может быть реализована с помощью серийно выпускаемых средств автоматизации общепромышлен-

ного назначения. Система автоматического регулирования сепаратора С-2 (см. рис. 169) состоит из термобаллона 2А манометрического термометра, манометра 2б с пневмовыходом, изодромного регулятора 2в, вторичного прибора 2г с задатчиком исполнительного механизма 2д. При отклонении текущего значения температуры от заданного регулятор 2в с помощью исполнительного механизма 2д изменит количество холодного газа на входе в теплообменник Т-1, который служит для охлаждения потока сырого газа перед сепаратором С-2.

Подогрев газа в огневом подогревателе ОП происходит следующим образом. При сгорании топливного газа тепло передается от жаровой трубы к теплообменнику, по которому проходит холодный газ через нитрат-нитритную смесь, постоянно циркулирующую между ними. Автоматизация огневого подогревателя сводится к стабилизации температуры смеси с помощью элементов 6а—6д путем изменения количества сжигаемого газа. Аналогично построена и система автоматического регулирования температуры в нижней части установки регенерации УР. Температура поддерживается с помощью элементов 5а—5д путем изменения количества сжигаемого газа.

Огневой подогреватель и установка регенерации кроме регулирующих устройств оснащаются средствами защитной автоматики.

Автоматическое регулирование уровня жидкости. Наличие кристаллогидратов и абразивных частиц в потоках жидкости на установках НТС и малый приток жидкости в емкость при значительных перепадах давления на регулирующем органе привели к необходимости создания специальных регуляторов для отвода жидкости из технологических емкостей. На рис. 172 изображена схема автоматического регулирования уровня в горизонтальной емкости. Чувствительным элементом регулятора является боек 1, подвешенный на пружине 2 и помещенный в защитную трубу 20. К буйку прикреплен штанг 3, на свободном конце которой закреплены постоянные магниты 5, изолированные от наружной среды разделительной трубкой 7. В средней части штанги закреплен стакан 4, при помощи которого образуется масляный гидрозатвор. Последний препятст-

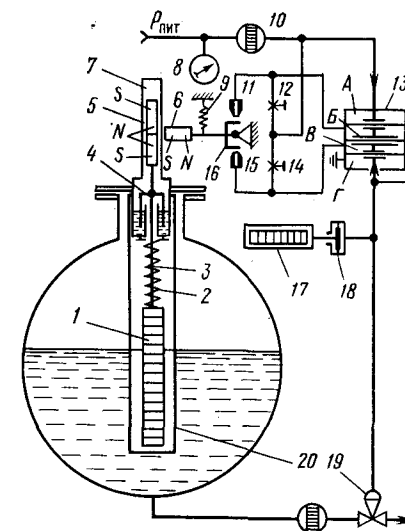


Рис. 172. Схема автоматического регулирования уровня в горизонтальной емкости

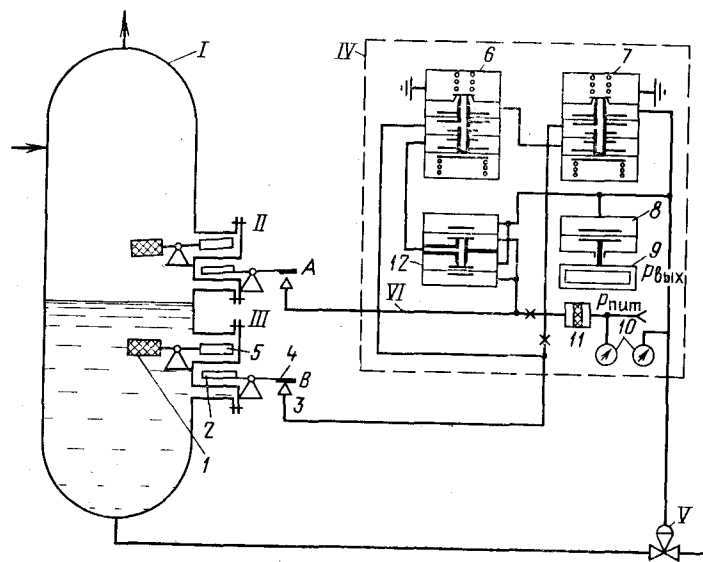


Рис. 173. Схема системы автоматического регулирования уровня жидкости с регулятором Р-2Д

вует проникновению природного газа из конденсатосборника в разделительную трубку 7. Внутренняя полость трубки 7 защищена от образования кристаллогидратов, что повышает надежность работы регулятора. Изменение уровня жидкости приводит к перемещению магнитов 5 в разделительной трубке 7, изготовленной из немагнитного материала. При этом постоянный магнит 6, закрепленный на коромысле, уравновешенном пружиной 9, перемещает заслонку 16 относительно сопел 11 и 15. К соплам через фильтр 10 и дроссели 12 и 14 подается сжатый воздух, давление которого контролируется по манометру 8. Линия сопла 11 соединена с камерой Б трехмембранного реле 13, а линия сопла 14 — с камерой В того же реле. При достижении верхнего предельного уровня жидкости заслонка 16 закрывает сопло 11, давление в камере Б возрастает и под его действием реле 13 переходит в крайнее нижнее положение. Давление питания проходит через камеру А реле на исполнительный механизм 19 и открывает его. Жидкость сбрасывается из емкости. При достижении нижнего предельного уровня закрывается сопло 15, увеличивается давление в камере В и реле 13 переходит в крайнее верхнее положение. Линия питания при этом перекрывается, а воздух из линии исполнительного механизма 19 сбрасывается в атмосферу. Линия слива жидкости перекрывается. Число сбросов жидкости контролируется счетчиком 17 при помощи пневмопривода 18. Регуляторы уровня РУЖ выпускаются на рабочее давление до 32 МПа.

На рис. 173 изображена схема регулирования уровня жидкости в вертикальном аппарате с помощью регулятора Р-2Д с пневмодатчиком ДУЖП-200. Система состоит из объекта регулирования I, датчиков верхнего II и нижнего III уровней регулятора IV и исполнительного механизма V. Чувствительный элемент — поплавков 1 при достижении уровнем крайнего положения поднимается и расположенный на противоположном конце рычага сердечник 5 опускается. При этом постоянный магнит 2 поднимается и заслонка 4 прикрывает сопло 3. Питание к соплу 3 подается от регулятора через фильтр 11 и дроссель постоянного сечения.

Рассмотрим работу системы. Если давление в мембранном приводе клапана V отсутствует, он закрыт и уровень в емкости повышается. При достижении уровня в емкости до поплавка верхнего датчика II он срабатывает и перекидной клапан 12 подключает давление питания ко второй (снизу) камере реле 6. При этом мембранный блок реле 6 перемещается вниз и линия VI под высоким давлением через среднюю камеру и сопло реле 6 соединяется со второй (снизу) камерой реле 7. Мембранный блок этого реле перемещается вниз, соединяя линию питания с запорным клапаном V и перекидным клапаном 12. Клапан V открывается, и жидкость выбрасывается из емкости. Понижение уровня жидкости приводит к обратному действию верхнего датчика. Давление в линии его сопла снижается, однако реле находится в прежнем положении, так как перекидной клапан 12 под действием выходного давления реле 7 подключает это давление ко второй (снизу) камере реле 6. При срабатывании нижнего датчика давление в линии его сопла и в средней камере 6 снижается. При этом снижается давление во второй (снизу) камере реле 7 и под действием пружины мембранный блок перемещается вверх. Сопло мембранного блока перекрывается заслонкой и отсекает подачу управляющего воздуха на клапан. Реле 7 сообщается с атмосферой, клапан V при этом закрывается, и схема возвращается в исходное положение. Число циклов сброса жидкости определяется по счетчику 9 с пневмоприводом 8. Давление пневмопитания и в линии клапана контролируют манометрами 10. В качестве исполнительных механизмов применяют клапаны КЗП, ОМК5М или К43П. Датчики выпускают на давление 20 МПа.

§ 89. Автоматизация абсорбционного процесса осушки газа

Процесс абсорбционной осушки газа основан на избирательном поглощении влаги раствором диэтиленгликоля в тарельчатых колоннах, особенностью которых является ступенчатый характер проводимого в них процесса. Газ и жидкость последовательно соприкасаются на отдельных ступенях (тарелках) аппарата. Поверхность соприкосновения фаз развива-

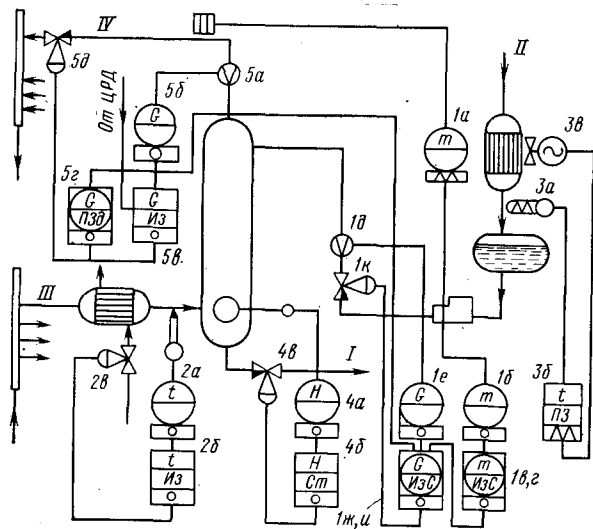


Рис. 174. Схема каскадного автоматического управления процессом абсорбции: I — насыщенный абсорбент; II — орошение колонны; III — ненасыщенный абсорбент; IV — осушенный газ

ется потоком газа, распределяющимся в жидкости в виде пузырьков и струек. Среды движутся по аппарату по принципу противотока: сверху вниз движется абсорбент, а снизу вверх — осушаемый газ. В результате контакта фаз происходит массообмен: пары воды из газа переходят в раствор абсорбента. Степень осушки газа на абсорбционных установках определяется главным образом концентрацией подаваемого в абсорбер раствора, а концентрация раствора, в свою очередь, зависит от используемого на установке метода регенерации отработанного абсорбента. Для глубокой регенерации раствора и получения низких (от -20 до $+30$ °С) точек росы осушенного газа регенерацию ДЭГ проводят под вакуумом.

В промысловых условиях адсорбционные установки осушки подвержены различным внешним воздействиям, что и вызывает необходимость управления ими. Основная задача управления состоит в обеспечении заданной степени осушки газа при минимальных энергетических и материальных затратах и соблюдении ограничений на технологические параметры процесса. Процесс осушки газа на газовых промыслах осуществляют, как правило, в нескольких параллельно работающих абсорберах, входы и выходы которых подключены к коллекторам. Опыт эксплуатации их показывает, что, несмотря на одинаковые конструктивные характеристики аппарата, их гидравлические сопротивления различны. Это приводит к неравномерной нагрузке аппаратов и уменьшению общей эффективности их работы. Поэтому задача автоматического управления заключается не только в поддержании требуемой точки росы осушенного газа, но и

в обеспечении равномерного распределения потоков газа между абсорберами. Эта задача решается каскадной автоматической системой (рис. 174), построенной по схеме, изображенной на рис. 167, из которой исключаются блоки 1в, 1д и 1е, а регулирующий штуцер 1л устанавливается после абсорбера [36]. Изменение расхода и влагосодержания осушаемого газа, а также условий массообмена (температуры контакта фаз, давления и др.) приводит к изменению влагосодержания осушенного газа. Для поддержания постоянного влагосодержания осушенного газа изменяют либо расход адсорбента, либо его концентрацию, либо то и другое одновременно.

Если абсорбер работает в переменном (по расходу газа) режиме, то система автоматического управления строится по принципу регулирования соотношения расход газа — расход абсорбента с коррекцией соотношения по отклонению влажности газа от заданного значения. Система функционирует следующим образом (см. рис. 174). Текущее значение влажности газа, воспринимаемое датчиком 1а, при помощи электропневматического преобразователя 1б преобразуется в пневматический унифицированный сигнал, который подает на вход ПИ-регулятора ситема «Старт» (ПР3.21). От ручного задатчика вторичного прибора 1г (тип ПВ17.1Э) на вход этого регулятора подается пневматический сигнал, пропорциональный заданному значению влажности. При отклонении текущего значения влажности газа от заданного регулятор по пропорционально-интегральному закону выдает корректирующий пневматический сигнал, который подается на вход регулятора соотношения 1ж (тип ПР3.24). Последний, действуя на исполнительный механизм 1к, изменяет расход абсорбента до тех пор, пока текущее значение влажности не станет равным заданному. При изменении расхода газа нарушается соотношение расхода газа — расход абсорбента и регулятор 1ж по сигналу от датчиков расхода газа 5а и 5б изменяет расход абсорбента. Ввод в контур регулирования сигнала от датчика расхода газа обеспечивает повышение динамической точности регулирования влажности.

В системе управления используются в основном пневматические приборы ГСП. Вторичный прибор 1и типа ПВ10.1Э предназначен для регистрации расхода абсорбента и дистанционного управления исполнительным механизмом 1д при переходе на ручное дистанционное управление. В качестве исполнительного механизма используется регулятор расхода жидкости типа РРЖ (см. рис. 171).

Заданная нагрузка абсорбера поддерживается при помощи системы автоматического регулирования, в состав которой входят (см. рис. 174) камерная диафрагма 5а, дифманометр 5б, регулятор 5в, вторичный прибор 5г, регулирующий штуцер 5д. Заданное значение нагрузки устанавливается центральным регулятором давления (ЦРД). Температурный режим абсорбера автоматически стабилизируется при помощи двух систем регу-

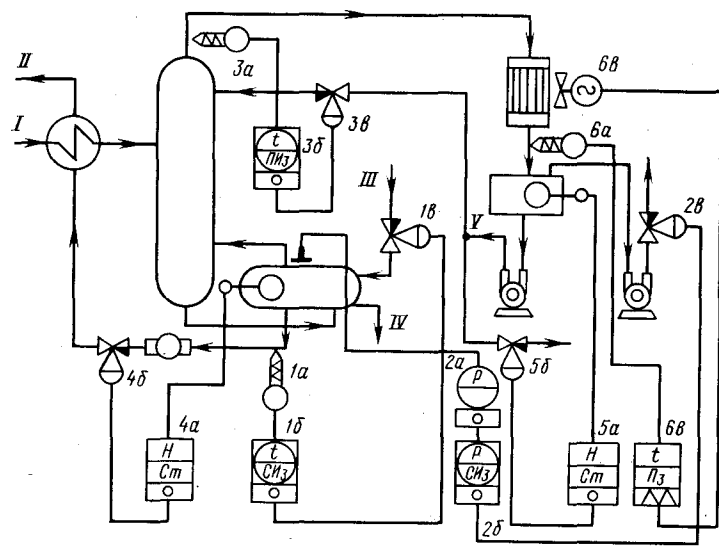


Рис. 175. Схема системы автоматического управления процессом регенерации ДЭГ:

I — насыщенный абсорбент; II — регенерированный ДЭГ; III, IV — теплоноситель; V — флегма

лирования: температуры газа и температуры абсорбента на входе в абсорбер. Первая система состоит из манометрического термометра с пневмовыходом 2а, ПИ-регулятора 2б и регулирующего клапана 2в. Вторая представляет собой термометр сопротивления 3а и двухпозиционное регулирующее устройство 3б, включающее или отключающее вентилятор 3в. В качестве двухпозиционного регулирующего устройства используется серийный электронный мост с двухпозиционным регулятором. Уровень жидкости в абсорбере регулируется системой, состоящей из датчика уровня 4а типа УБ-П, пропорционального регулятора 4б типа ПР1.5 и регулирующего клапана 4в типа УКН.

Для обеспечения надежной осушки газа при переменном его поступлении необходимо поддерживать максимальный расход ДЭГ, постоянную его концентрацию, а также постоянную температуру контакта фаз (под максимальным понимается такой расход абсорбента, который при максимальной нагрузке аппарата по газу и постоянной концентрации гликоля обеспечивает заданную степень осушки газа). Такая система управления обеспечивает инвариантность влажности газа по отношению к его расходу.

Система автоматического управления процессом регенерации абсорбента. Основная задача системы автоматического управления процессом регенерации абсорбента состоит в стабилизации концентрации регенерированного раствора диэтиленгликоля. При постоянном вакууме в испарителе и колонне

концентрация регенерированного раствора однозначно определяется температурой кипения. Чем больше концентрация ДЭГ в растворе, тем выше температура его кипения при одном и том же давлении (вакууме). При поддержании постоянных значений температуры и вакуума в испарителе обеспечивается постоянная концентрация регенерированного раствора. Система автоматического управления, построенная на таком принципе, изображена на рис. 175. Стабилизация температуры раствора осуществляется системой автоматического регулирования, состоящей из датчика температуры 1а, ПИ-регулятора 1б и регулирующего клапана 1в. При отклонении температуры от заданного значения регулятор, действуя на регулирующий клапан, изменяет подачу пара в испаритель до тех пор, пока рассогласование не станет равным нулю. В качестве датчика и регулятора используются термометр сопротивления и электронный автоматический мост с регулирующим устройством. Могут быть применены также манометрические термометры. Могут быть применены также манометрические термометры с пневматическим выходным сигналом и регуляторы системы «Старт» типов ПР3.21 или ПР3.22. В качестве исполнительных механизмов используют мембранные регулирующие клапаны.

Стабилизация вакуума обеспечивается системой автоматического управления, состоящей из датчика вакуума 2а, ПИ-регулятора 2б и клапана 2в. Вакуум измеряется вакуумметром типа ВС-П1, пневмосигнал которого поступает на регулятор ПР3.21, устанавливаемый на вторичном самопишущем приборе ПВ40.1Э. При отклонении текущего значения вакуума от заданного регулятор воздействует на мембранный регулирующий клапан 2в, установленный после вакуум-насоса, поддерживая рассогласование равным нулю. Для уменьшения потерь диэтиленгликоля, содержащегося в парах воды, предусматривается автоматическая стабилизация температуры верха колонны. Система регулирования включает датчик температуры 3а, ПИ-регулятор 3б и мембранный клапан 3в. Уровни жидкости в испарителе и емкости флегмы автоматически поддерживаются пропорциональными регуляторами 4а, 5а, изменяющими проходное сечение регулирующих клапанов 4б и 5б, установленных после насоса на трубопроводах отвода жидкости из аппаратов. Для регулирования уровня применяют регуляторы системы «Старт» типа ПР2.5 в комплекте с пневматическими датчиками уровня 2Б-П. Температура флегмы на выходе воздушного холодильника-конденсатора регулируется включением одного или нескольких вентиляторов 6в, управляемых двухпозиционным регулятором температуры 6б. Текущее значение температуры измеряется термометром сопротивления 6а.

ВЕКТОРНОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ

1. Производная вектора-столбца X по скаляру λ есть вектор-столбец

$$\frac{dX}{d\lambda} = \begin{pmatrix} \frac{dx_1}{d\lambda} \\ \frac{dx_2}{d\lambda} \\ \vdots \\ \frac{dx_n}{d\lambda} \end{pmatrix} \equiv \left(\frac{dx_1}{d\lambda}, \frac{dx_2}{d\lambda}, \dots, \frac{dx_n}{d\lambda} \right).$$

2. Производная скаляра по вектору-столбцу X есть вектор-строка

$$\frac{dX}{dX} = \left(\frac{d\lambda}{dx_1}, \frac{d\lambda}{dx_2}, \dots, \frac{d\lambda}{dx_n} \right).$$

3. Производная вектора-строки по вектору-столбцу есть матрица

$$\frac{dY}{dX} = \begin{pmatrix} \frac{dy_1}{dx_1} & \frac{dy_1}{dx_2} & \dots & \frac{dy_1}{dx_n} \\ \frac{dy_2}{dx_1} & \frac{dy_2}{dx_2} & \dots & \frac{dy_2}{dx_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dy_n}{dx_1} & \frac{dy_n}{dx_2} & \dots & \frac{dy_n}{dx_n} \end{pmatrix}$$

4. Вторая производная скаляра по вектору есть матрица

$$\frac{d^2X}{d^2X} = \frac{d}{dX} \left(\frac{dX}{dX} \right) = \begin{pmatrix} \frac{d^2\lambda}{dx_1 dx_1} & \frac{d^2\lambda}{dx_1 dx_2} & \dots & \frac{d^2\lambda}{dx_1 dx_n} \\ \frac{d^2\lambda}{dx_2 dx_1} & \frac{d^2\lambda}{dx_2 dx_2} & \dots & \frac{d^2\lambda}{dx_2 dx_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2\lambda}{dx_n dx_1} & \frac{d^2\lambda}{dx_n dx_2} & \dots & \frac{d^2\lambda}{dx_n dx_n} \end{pmatrix}$$

5. Производная скалярного произведения $\langle X, Y \rangle$ по вектору-столбцу Z есть вектор-строка

$$\frac{d\langle XY \rangle}{dZ} = \frac{d}{dZ} \langle X'Y \rangle = X' \frac{dY}{dZ} + Y' \frac{dX}{dZ}$$

6. Производная от квадратичной формы по вектору-столбцу есть вектор-строка

$$\frac{d}{dZ} \langle X'AX \rangle = \frac{dZ}{d} \langle X, AX \rangle = X'AI + X'AI = 2X'A,$$

где A — симметричная матрица; I — единичная матрица

Примечание: знак $'$ означает транспонирование.

1. Абдрахманов Г. С. Контроль технологических процессов в бурении. М., Недра, 1974.
2. Автоматизация и телемеханизация магистральных нефтепроводов/ А. И. Владимирский, Ю. М. Дронговский, Л. А. Зайцев и др. М., Недра, 1976.
3. Ахметов Р. М., Ливанов Ю. В., Матвиенко А. В. Диспетчеризация и учет на нефтепроводах. М., Недра, 1976.
4. Бахвалов Н. С. Численные методы. М., Наука, 1973.
5. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М., Наука, 1978.
6. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации/ П. М. Атлас, В. Г. Беренштейн, А. А. Воробьян и др. М., изд. ЦНИИТЭИприборостроение, 1978, т. 3, вып. 1.
7. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. М., изд. ЦНИИТЭИприборостроение, 1979, т. 3, вып. 1.
8. Гренандер У., Фрайбергер В. Краткий курс вычислительной вероятности и статистики. Пер. с англ. М., Наука, 1978.
9. Грот Д. Методы идентификации систем. Пер. с англ. М., Мир, 1979.
10. Де Грот М. Оптимальные статистические решения. Пер. с англ. М., Мир, 1974.
11. Дехтяренко П. И., Коваленко В. П. Определение характеристик звеньев систем автоматического регулирования. М., Энергия, 1973.
12. Ибрагимов И. А., Фарзана Н. Г., Илясов Л. В. Элементы и системы пневмоавтоматики. М., Высшая школа, 1975.
13. Исакович Р. Я. Технологические измерения и приборы. М., Недра, 1979.
14. Казинер Ю. Я., Слободкин М. С. Пневматические исполнительные устройства в системах автоматического управления. М., Энергия, 1972.
15. Капустин А. Г., Малецкий В. А. Комплексная автоматизация нефтегазодобывающих предприятий. М., изд. ВНИИОЭНГ, 1973.
16. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химической технологии. М., Химия, 1976.
17. Коган В. Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. Л., Химия, 1977.
18. Комягин А. Ф. Автоматизация производственных процессов газонефтепроводов. М., Недра, 1973.
19. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., Советское радио, 1974.
20. Логинов В. И. Обезвоживание и обессоливание нефти. М., Химия, 1979.
21. Локотош Б. Н., Семенцов Г. С. Автоматизация процесса бурения глубоких скважин. Львов, Вища школа, 1977.
22. Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти и газа и воды. М., Недра, 1979.
23. Маргулов Р. Д., Тагиев В. Г., Гергедава Ш. К. Организация управления газодобывающим предприятием. М., Недра, 1981.
24. Мееров М. В., Михайлов Ю. Н., Фридман В. Г. Основы автоматического управления. М., Недра, 1979.
25. Наладка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами. Под ред. А. С. Ключева. М., Энергия, 1977.
26. Нисман Л. Н., Иткина Д. М. Определение расходных характеристик исполнительных устройств систем автоматического управления.— Приборы и системы управления, 1973, № 6.
27. Погарский А. А., Чефранов К. А., Шишкин О. П. Оптимизация процессов глубокого бурения. М., Недра, 1981.
28. Погарский А. А. Автоматизация процесса бурения глубоких скважин. М., Недра, 1972.
29. Прангшвили И. В. Микропроцессы и микро-ЭВМ. М., Энергия, 1979.
30. Свердлов Г. М., Ягудин Р. Ю. Технологические объекты нефтеперерабатывающих предприятий и их автоматизация. М., Недра, 1975.
31. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. М., Наука, 1979.
32. Слободкин М. С., Смирнов П. Ф., Казинер Ю. Я. Исполнительные устройства регуляторов. М., Недра, 1972.
33. Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа/ Ю. М. Котелевский, Г. В. Мамонтов, Л. Н. Нисман и др. М., Недра, 1976.
34. Справочник по автоматизации производственных процессов в газовой промышленности/ В. В. Дубровский, В. П. Максимов, В. Б. Шифрин и др., Киев, Техника, 1980.
35. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М., Энергия, 1972.
36. Тараненко Б. Ф., Герман В. Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. М., Недра, 1976.
37. Темный В. П. Основы гидроавтоматики. М., Наука, 1972.
38. Теория автоматического управления. Под ред. проф. Нетушила. М., Высшая школа, 1976.
39. Хартман К., Лецкий Э. К., Шефер В. Планирование эксперимента исследования технологических процессов. М., Мир, 1977.
40. Хемминг Р. В. Численные методы. Пер. с англ. М., Мир, 1978.
41. Худсон Д. Статистика для физиков. Пер. с англ. М., Мир, 1970.
42. Чарный И. А. Неустойчившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Недра, 1975.
43. Чупраков Ю. И. Гидропривод и средства гидроавтоматики. М., Машиностроение, 1979.
44. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Пер. с англ. М., Мир, 1972.
45. Шишкин О. П., Парфенов А. Н. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов. М., Недра, 1973.

Введение	3
РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.	
Глава 1. Методы теории размерностей и их применение при построении математических моделей	6
§ 1. Размерности и критерии подобия	6
§ 2. Построение безразмерных комплексов. л-теорема	8
§ 3. Выбор безразмерного базиса	12
§ 4. Определение вида модели в безразмерном базисе	14
§ 5. Определение исходных переменных при построении модели	19
§ 6. Применение теории размерностей при подготовке эксперимента и при анализе экспериментальных результатов	20
§ 7. Применение безразмерных переменных при обработке статистического материала	23
§ 8. Приведение к безразмерному виду уравнений	25
Глава 2. Методы приближения функций и их применение при построении математических моделей	26
§ 9. Постановка задачи. Критерии приближения	26
§ 10. Интерполирование функций	31
§ 11. Конечные разности и их применение в задачах интерполяции	37
§ 12. Приближения по критерию совпадения признаков функций	43
§ 13. Среднеквадратичное приближение	50
§ 14. Приближение в классе экспоненциальных функций	55
Глава 3. Планирование эксперимента при построении математической модели	65
§ 15. Неоднозначные функции и постановка задачи их приближения	65
§ 16. Статистические свойства метода наименьших квадратов	67
§ 17. Постановка задачи планирования эксперимента. Критерии планирования	73
§ 18. Планы для линейных моделей	75
§ 19. Дробные планы и эффект смещения факторов	81
§ 20. Ортогональный центральный композиционный план для квадратичных моделей	86
Глава 4. Идентификация линейных динамических объектов	90
§ 21. Общие сведения из теории автоматического управления	90
§ 22. Постановка задачи идентификации	94
§ 23. Идентификация переходной функции объекта на основе методов аппроксимации в классе экспоненциальных функций	96
§ 24. Частные случаи идентификации переходных функций	98
§ 25. Идентификация дифференциальной модели на основе метода приближения по критерию совпадения моментов	102
§ 26. Идентификация импульсной переходной функции на основе метода корреляционных функций	106
§ 27. Идентификация параметров дифференциальной модели на основе регрессионных методов	108
Глава 5. Общие принципы и физические основы построения аналитических моделей технологических процессов	111
§ 28. Аналитические модели в задачах автоматического регулирования и автоматизации	111
§ 29. Общие принципы построения аналитических моделей	113
§ 30. Закон сохранения массы	114

§ 31. Закон сохранения количества движения	116
§ 32. Закон переноса массы и энергии	118
§ 33. Закон сохранения энергии	121
§ 34. Сохранение термодинамических функций при равновесном состоянии системы. Уравнения равновесного состояния	123
§ 35. Закономерности описания процессов переноса вещества в двухфазных системах	126
Глава 6. Модели технологических процессов	129
§ 36. Процесс бурения скважин	129
§ 37. Моделирование сборных и распределительных коллекторов	133
§ 38. Дифференциальная форма модели линейного трубопровода	136
§ 39. Трубопровод как система регулирования	140
§ 40. Основы процессов подготовки газа и постановка задачи их моделирования	143
§ 41. Процесс низкотемпературной сепарации	144
§ 42. Процесс абсорбционной очистки газа	145
§ 43. Процесс регенерации гликолей	147
§ 44. Процесс дегазации конденсата	148
§ 45. Основы процессов подготовки нефти и постановка задачи их моделирования	149
§ 46. Моделирование процесса разделения водонефтяных эмульсий в отстойном аппарате	151
§ 47. Моделирование процессов обессоливания нефтей	155
РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ	
Глава 7. Общие сведения об автоматических регуляторах	159
§ 48. Принципы построения и классификация автоматических регуляторов	159
§ 49. Математические модели и способы реализации автоматических регуляторов	163
§ 50. Регуляторы прямого действия	174
Глава 8. Пневматические регуляторы	176
§ 51. Основные особенности пневматических регуляторов	176
§ 52. Элементы и узлы устройств непрерывного действия	179
§ 53. Элементы и узлы устройств дискретного действия	188
§ 54. Регуляторы непрерывного действия	194
§ 55. Экстремальные регуляторы	208
Глава 9. Гидравлические и электрические регуляторы	219
§ 56. Гидравлические регуляторы	219
§ 57. Электрические регуляторы	228
§ 58. Применение микропроцессоров в качестве регулирующих устройств	232
Глава 10. Исполнительные устройства	234
§ 59. Общая характеристика и классификация исполнительных устройств	234
§ 60. Регулирующие органы	240
§ 61. Исполнительные механизмы	246
§ 62. Расчет и выбор исполнительных устройств	252
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
Глава 11. Автоматизация управления процессом бурения	264
§ 63. Теоретические основы автоматического управления процессом бурения	264
§ 64. Фрикционные устройства подачи долота	272
§ 65. Гидравлические устройства подачи долота	276

§ 66. Электромашинные устройства подачи долота	279
§ 67. Забойные устройства подачи долота	290
§ 68. Принципы оптимального автоматического управления процес- сом бурения	295
Глава 12. Автоматизация добычи и промышленного сбора нефти и по- путного газа	298
§ 69. Характерные особенности нефтедобывающих предприятий и ос- новные принципы их автоматизации	298
§ 70. Типовая технологическая схема автоматизированного нефтедо- бывающего предприятия	303
§ 71. Автоматизация нефтяных скважин	304
§ 72. Автоматизированные групповые измерительные установки	314
§ 73. Автоматизированная система сбора и обработки информации о производительности нефтяных скважин «Спутник ВМР»	323
§ 74. Автоматизированные сепарационные установки	335
§ 75. Автоматизированные блочные дожимные насосные станции	344
Глава 13. Автоматизация подготовки и откачки товарной нефти	346
§ 76. Характеристика технологического процесса и задачи автомати- зации	346
§ 77. Автоматизированные блочные установки подготовки нефти	349
§ 78. Автоматическое измерение массы и качества товарной нефти	355
§ 79. Автоматизация нефтеперекачивающих насосных станций	360
Глава 14. Автоматизация объектов поддержания пластового давления	365
§ 80. Характеристика системы поддержания пластового давления	365
§ 81. Автоматизированные блочные установки для очистки сточных вод и автоматизация водозаборных скважин	368
§ 82. Автоматизированные блочные кустовые насосные станции	372
Глава 15. Автоматизация магистральных нефтепроводов	376
§ 83. Характеристика магистрального нефтепровода как объекта ав- томатизации	376
§ 84. Автоматизация процессов перекачки нефти	381
§ 85. Автоматическая защита нефтепроводов от перегрузок	391
Глава 16. Автоматизация добычи и промышленной подготовки газа	396
§ 86. Характеристика газовых и газоконденсатных промыслов как объектов автоматизации	396
§ 87. Автоматическое управление производительностью промысла	398
§ 88. Автоматическое управление процессом низкотемпературной се- парации газа	404
§ 89. Автоматизация абсорбционного процесса осушки газа	413
Приложение	418
Список литературы	420