

*К 80 летию РГУ нефти и газа
имени И.М.Губкина*

V.S. Zamakhaev, V.G. Martinov

WELLSITE EXPLOSIVE OPERATIONS



**Москва
НЕДРА
2010**

В.С Замахаев, В.Г. Мартынов

ВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ В СКВАЖИНАХ

«Допущено УМО по образованию в области прикладной геологии в качестве учебника по дисциплине СД.13 «Взрывные и другие работы в скважинах» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130203 «Геофизические методы исследования скважин» направления подготовки дипломированных специалистов 130200 «Технологии геологической разведки» и по направлению подготовки бакалавров техники и технологии 130301 «Геология и разведка полезных ископаемых»



**Москва
НЕДРА
2010**

УДК 550.832(075.8)
ББК 26.2
З-26

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, академик РАЕН *И.Н. Гайворонский*,
Председатель Совета Директоров ОАО «ВНИПИВзрывгеофизика»,
ФГУ «ИПК ТЭК»,
доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАЕН
А.К. Ягофаров (Тюменский государственный нефтегазовый университет,
Институт нефти и газа)

З-26 **Замахаев В.С., Мартынов В.Г.**
Взрывные работы в скважинах. Учебник для вузов. –
М.: ООО «Издательский дом Недра», 2010. – 247 с.: ил.
ISBN 978-5-8365-0366-6

Рассмотрен перечень задач, которые могут быть эффективно решены в нефтегазовой отрасли взрывными технологиями: ликвидация сложных аварий в глубоких и сверхглубоких скважинах, повышение качества изоляции затрубного и межтрубного пространства, вторичное вскрытие пластов, разобщение пластов и объектов в обсаженных скважинах, разрыв пластов и термогазохимическое воздействие на пласты.

Описана физическая сущность взрывных процессов, а также процессов-откликов в нефтегазовых пластах. Даны рекомендации по подходам к решению проблем вскрытия нефтегазовых пластов на стадиях поиска, разведки и разработки месторождений. Рассмотрены вопросы ликвидации аварий при бурении. Для студентов, магистров, аспирантов и специалистов в области исследования скважин. Может быть использована в качестве учебного пособия для других смежных специальностей.

Данное издание является собственностью РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, и его репродуцирование (воспроизведение) любыми способами без согласия университета запрещается.

ISBN 978-5-8365-0366-6

© Замахаев В.С., Мартынов В.Г., 2010
© Российский государственный университет
нефти и газа имени И.М. Губкина, 2010
© Оригинал-макет.
ООО «Издательский дом Недра», 2010
© Голубев В.С., оформление серии, 2010



ВВЕДЕНИЕ

С ростом глубин залегания пластов приходится сталкиваться с высокими давлениями и температурами, осложняющими процессы бурения и исследования скважин. В этой связи техника и технология должна постоянно совершенствоваться. Взрывные технологии отличает возможность доставки на большие глубины концентрированной энергии и санкционировано строго направленно выделить её. Поэтому взрывные технологии оказались при решении многих задач безальтернативными. С разработкой новых термостойких и энергетически насыщенных взрывчатых веществ стало возможным создание кумулятивных перфораторов и торпед, эффективно работающих на любых реально достижимых в настоящее время глубинах. Так, развинчивание колонны бурильных труб с помощью термостойких торпед осуществлено Е.А. Левиным в Кольской сверхглубокой скважине на глубине свыше 10 км.

Для решения проблем установления гидродинамической связи скважины с пластом в сложных геолого-технических условиях В.М. Тебякиным созданы кумулятивные перфораторы со сверхвысокой пробивной способностью. Для разобщения объектов и изоляции пластов в скважинах Е.А. Левин создал целый ряд взрывных пакеров, которые широко применяются в газовых и нефтяных скважинах. Большой объём работ в области исследования гидродинамики прискважинных зон выполнил И.Н. Гайворонский. Специальные перфораторы для простреливания утяжелённых бурильных труб создал П.В. Вольницкий. Особая заслуга в организации многих современных разработок принадлежит Н.Г. Григоряну, А.С. Державцу, Ф.А. Бауму, Л.Я. Фридляндеру и С.А. Ловле, который написал учебник и на протяжении многих лет вёл предмет «Прострелочно-взрывные работы в скважинах» в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Прошло уже более 30 лет со дня издания этого учебника. Появились новые технологии, заколонные взрывные пакеры, применяется в производстве широкий спектр перфораторов, требуется точная привязка интервалов перфорации к геологическому разрезу, а также установление фактического положения интервалов перфорации. При работе с перфораторами, спускаемыми на насосно-компрессорных трубах, необходимо не только установить факт срабаты-

вания перфоратора, но и полноту срабатывания. То же относится и к полностью разрушающимся малогабаритным перфораторам. В учебниках полностью отсутствует информация о процессах, протекающих в пластах при динамических воздействиях (перфорации, сжигании в скважинах пороховых зарядов и горюче-окислительных систем) и определяющих возможность получения гидродинамической связи скважины с пластом. Это далеко не полный перечень проблем, требующий написания нового учебника.

Авторы выражают свою признательность за содействие при подготовке учебника М.А. Асланову, И.Н. Гайворонскому, В.Н. Кончакову, Е.А. Левину, В.М. Тебякину, Г.Г. Шахназарову и другим сотрудникам ОАО «ВНИПИВзрывгеофизика».

1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗРЫВА

К взрывам относятся процессы физического или химического превращения при которых накопленная в системе потенциальная энергия выделяется в течение очень короткого интервала времени в окружающую среду.

К простейшим взрывам можно отнести разрушение баллона, заполненного газом высокого давления, или корпуса парового котла, в котором под большим давлением находилась перегретая вода. Быстрый переход воды в пар будет сопровождаться достаточно длительным поддержанием высокого давления в системе и, соответственно, возникновением высокой плотности потока энергии в окружающую воздушную среду. Сюда же можно отнести и быстрое горение порохов или смесей газов с образованием продуктов сгорания высокого давления.

К более сложным взрывам относятся процессы, характеризующиеся «размазанной» накопленной энергией и локальным выделением этой энергии. Примером может служить накопление электрического заряда в облаке, а затем локальное выделение энергии в виде молнии с колоссальной плотностью потока энергии. Аналогично этому в глубокозалегающих породах происходит накопление энергии и локальное выделение её при землетрясениях.

Еще более сложным взрывом является детонация, процесс при котором фронт химической реакции движется со скоростями, превышающими скорость звука в данном веществе.

В практике разведки и разработки месторождений углеводородов используются как физические, так и химические взрывы. Что касается процессов в самом источнике взрыва, то они наиболее сложны при химическом взрыве. Это же относится и к процессам, протекающим на границах раздела взрывчатое вещество – окружающая среда. В удалённых от поверхности источников зонах действия физических и химических взрывов имеют полную аналогию.

Поэтому химические взрывы, и прежде всего детонация, заслуживают того чтобы процессам в самом взрывчатом веществе и на его границах было уделено большое внимание. Интерес к детонации подогревается ещё и тем фактом, что тепломассоперенос за фронтом детонации во многом схож с тепломассопе-

реносом в пористых средах (нефтегазовых пластах, находящихся в метастабильном состоянии) при всякого рода воздействиях на последние. Физические взрывы представляют интерес только с позиции воздействия на окружающую среду, в том числе на нефтегазовые пласты.

В разделе 1 будут рассмотрены только химические взрывы и процессы внутри самого источника взрыва, а также на его границе. Детонации, относящейся к химическим взрывам, но имеющей более сложную физическую природу, будет уделено особое внимание.

1.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

1.1.1. ЯВЛЕНИЕ ВЗРЫВА

Взрывчатые вещества представляют собой системы, в которых содержится горючее и окислитель и их взрывное превращение связано с окислительными реакциями без привлечения кислорода воздуха. Они относятся к неустойчивым с точки зрения термодинамики системам. Внешние воздействия, способные сыграть роль «спускового крючка», могут запустить в них быстрые экзотермические превращения, сопровождающиеся образованием газов или паров.

Газообразные продукты взрыва в зависимости от скорости химической реакции и квантово-механических процессов в первоначальный момент могут занимать объём, соизмеримый с объёмом самого ВВ или даже меньший и характеризуются сильно сжатым состоянием. Поэтому в месте бывшего нахождения ВВ возникает газовая область с резко повышенным давлением.

Таким образом, способность систем к взрывчатым превращениям определяется следующими основными факторами: независимостью окислительного процесса от кислорода воздуха, экзотермичностью процесса, большой скоростью его распространения и наличием газообразных (парообразных) продуктов реакции. Каждое из этих свойств может быть выражено более или менее ярко у различных ВВ, однако только их совокупность придаёт явлению химического превращения характер взрыва.

Для подтверждения данного положения рассмотрим значение каждого из этих факторов.

Экзотермичность реакции. Выделение тепла при химическом превращении является первым необходимым условием протекания взрывного процесса. Только благодаря выделяющейся теплоте происходит спонтанное развитие взрыва. Хи-

мические превращения, требующие постоянного подтока тепловой энергии извне, естественно, не могут быть отнесены к взрывным.

Выделяющееся при экзотермической реакции тепло расходуется на разогрев образующихся газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов. Но в то же время экзотермичность реакции не является достаточным признаком взрыва, поскольку теплота взрыва даже самых мощных взрывчатых веществ не превосходит, а часто даже ниже, теплотворной способности обычных горючих. Так, например, теплота взрыва современных взрывчатых детонирующих веществ варьирует в диапазоне от 900 до 1800 ккал/кг, взрывчатых горючих смесей может достигать 3000 ккал/кг, но при этом теплотворная способность нефти превышает 10 000 ккал/кг. В табл. 1.1 для сравнения приведены теплоты взрыва детонирующих веществ, теплотворная способность горючих взрывчатых смесей и нефти.

Большая скорость процессов. Отличительной особенностью взрывного процесса является протекание химической реакции от начала до образования конечных продуктов за кратчайшие промежутки времени.

Учитывая значительное возрастание скорости горения горючих смесей с ростом внешнего давления можно утверждать, что взрывной процесс в таких смесях происходит при горении их в ограниченном пространстве или в условиях действия достаточно большого внешнего давления. Образование газообразных продуктов реакции из всего объема горючей смеси за миллисекунды приводит к тому, что они в первоначальный момент занимают объем, занятый самой исходной смесью. Разогретые до высокой температуры и находящиеся при высоком давлении газообразные продукты реакции обеспечивают очень высокую концентрацию энергии, которая не сопоставима с концентрацией энергии при обычных химических реакциях.

Детонация взрывчатых веществ не зависит от внешних условий, если последние не приводят к разложению (разрушению) самих веществ или изменению их насыщенности в результате

Таблица 1.1

Взрывчатые детонирующие вещества	Теплота взрыва
Нитроглицерин	1485 ккал/кг
Пироксилин (13,3 % N)	1040 ккал/кг
Взрывчатые горючие смеси	Теплотворная способность
Смесь водорода с кислородом	3230 ккал/кг
Смесь бензола с кислородом	2330 ккал/кг
Горючее	Теплотворная способность
Нефть	10500 ккал/кг

проникновения в поровый объём посторонних флюидов. Взрывчатое превращение при детонации даже достаточно больших объёмов вещества происходит за доли миллисекунды. Поэтому начальная концентрация энергии при детонации может быть ещё большей, чем при самом быстром горении. О скорости взрывчатого превращения в отдельных случаях можно судить по скорости распространения взрыва по заряду ВВ. Максимальная скорость распространения фронта детонации по веществу для современных ВВ может достигать 9000 м/с.

Газообразование. Образующиеся при взрывах газообразные продукты являются именно теми агентами, в процессе расширения которых осуществляется быстрый переход потенциальной энергии ВВ в кинетическую или в механическую работу. При детонации потенциальная энергия ВВ переходит не только в кинетическую энергию расширяющихся продуктов взрыва, но и в ударную волну, движущуюся на начальной стадии со сверхзвуковыми скоростями, намного превышающими скорость расширения продуктов взрыва. Кажущийся естественным вывод об отсутствии необходимости газообразования при детонации является ошибочным, поскольку именно из газообразных продуктов черпается энергия для поддержания ударной волны, ведущей химическую реакцию. В то же время следует отметить, что в основе подпитки ударной волны от продуктов взрыва лежит сложный квантовомеханический процесс, но не простой удар расширяющихся продуктов по исходному взрывчатому веществу.

1.1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Все быстропротекающие взрывные процессы подразделяются на горение и взрыв. Характерным признаком горения является зависимость скорости химического превращения вещества от внешнего давления. Рост последнего вызывает существенное возрастание скорости горения.

Для того чтобы горючие вещества могли производить значительную работу, их заключают в ограниченный объём, добиваясь направленного истечения продуктов горения. Такой подход применяется в метательных системах (пулевых перфораторах) и системах, производящих работу против гидростатического давления для направленной деформации узлов механических устройств (взрывных пакеров).

В скважинах при сжигании зарядов на большой глубине инерционность столба жидкости обеспечивает интенсивное воздействие раскалённых газов высокого давления на продуктивные пласты через фильтры или перфорационные каналы.

Взрыв от горения отличается не только количественными характеристиками и независимостью скорости химической реакции от внешних условий, но является совершенно иным физическим процессом. И, прежде всего, это отличие связано с возникновением при взрыве между частицами продуктов реакции специфического взаимодействия, которое обеспечивает тепломассоперенос в продуктах реакции в сторону большего давления, то есть в сторону фронта реакции. Таким образом, на движущемся фронте реакции постоянно происходит концентрация выделяющейся энергии. Такая концентрация энергии достигает огромных величин и является главной причиной сверхзвуковых скоростей химического превращения и возникновения локальных давлений в несколько тысяч МПа.

Взрывной процесс, распространяющийся с постоянной и максимально возможной для данного вещества скоростью называется детонацией. *Скорость детонации* для каждого вещества является константой и одной из важнейших его характеристик. Все взрывные процессы, происходящие с меньшей скоростью, являются нестационарными и в конечном счёте затухают.

Детонация газовых смесей отличается тем, что объём газообразных продуктов может не претерпевать существенных изменений или быть меньше объёма исходной смеси. Условно процесс взрыва газовой смеси можно разделить на две стадии. На первой стадии из-за специфического взаимодействия между частицами продуктов реакции тепломассоперенос в продуктах осуществляется в сторону большего давления (в сторону фронта реакции), что делает возможным само распространение взрывного превращения по газовой смеси. На второй стадии возможны два процесса: простое расширение разогретых продуктов взрыва или изменение направления массопереноса продуктов реакции за счёт изменения характера специфического взаимодействия между частицами продуктов. В последнем случае за зоной сжатия в окружающей среде возникнет зона глубокого вакуума.

1.1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Взрывчатые вещества и взрывчатые системы в соответствии с основными областями их применения разбиваются на четыре группы:

- 1 – иницирующие ВВ;
- 2 – бризантные ВВ;
- 3 – метательные ВВ или пороха;
- 4 – пиротехнические составы.

Иницирующие взрывчатые вещества. Отличаются низкой работоспособностью, но высокой чувствительностью к тепловым

и механическим воздействиям, под действием которых в них развивается детонация. Период нарастания скорости детонации до максимального значения у инициирующих взрывчатых веществ очень мал и поэтому даже малые заряды могут применяться в качестве инициаторов взрывных процессов для возбуждения детонации в основных зарядах взрывных герметичных патронов, капсюлей-детонаторов, устройств инициирования и других взрывных устройств.

Важнейшими представителями этой группы взрывчатых веществ являются:

1. Соли тяжёлых металлов гремучей кислоты. Из них наиболее широко применяемая – гремучая ртуть $\text{Hg}(\text{ONC})_2$.

2. Соли азотистоводородной кислоты или азиды. Наиболее широкое применение получил азид свинца – PbN_6 .

3. Соли тяжёлых металлов стифниновой кислоты. Важнейшим представителем этого ряда является стифнат или тринитрорезорцинат свинца (ТНРС) – $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}\cdot\text{H}_2\text{O}$.

4. Кабиды тяжёлых металлов или ацетилениды, из которых наиболее известный ацетиленид серебра Ag_2C_2 .

Используются также инициирующие смеси, состоящие из гремучей ртути, хлората кальция и трехсернистой сурьмы.

Все инициирующие вещества относят к первичным взрывчатым веществам.

Бризантные взрывчатые вещества. Отличаются высокой работоспособностью и применяются в торпедах, кумулятивных зарядах, кумулятивных труборезах, сейсмических зарядах и других устройствах для использования в скважинах. Детонация их вызывается достаточно большими внешними воздействиями и, как правило, для этого используют инициирующие вещества. Поэтому бризантные вещества называют вторичными.

Основным видом их взрывчатого превращения является детонация, но при возбуждении взрыва период нарастания скорости процесса до максимума у них значительно больше чем у первичных.

Важнейшими представителями взрывчатых соединений этой группы являются:

1. Нитраты или сложные эфиры азотной кислоты. Среди них нитроглицерин (глицеринтринитрат) $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$, тэн (пентаэритриттетранитрат) – $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$, нитраты целлюлозы $\text{C}_{24}\text{H}_{28}\text{O}_9(\text{ONO}_2)_{11}$.

2. Нитросоединения. Наиболее широкое применение получили нитросоединения ароматического ряда, преимущественно тринитропроизводные. К ним относятся:

- тротил (тринитротолуол) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$,
- пикриновая кислота (тринитрофенол) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$.

Из неароматических нитросоединений необходимо отметить широко применяющийся во взрывных скважинных устройствах гексоген (триметилентринитрамин) $C_3H_6O_6N_6$ и тетранитрометан $C(NO_2)_4$.

3. Взрывчатые смеси. К ним относятся аммониты, динамиты, сплавы тротила с гексогеном.

Метательные взрывчатые вещества или пороха. Основным видом взрывчатого превращения их является быстрое горение.

Они подразделяются на две группы:

1. Пороха – механические смеси.

2. Пороха бездымные или нитроцеллюлозные пороха.

К первой группе относится дымный порох, состоящий из калийной селитры (75 %), древесного угля (15 %) и серы (10 %).

Пороха нитроцеллюлозные, в зависимости от природы растворителя, применяемого для желатинирования (застудневания) их основного компонента – нитроцеллюлозы, подразделяются на четыре группы.

1. Пороха на летучем растворителе или пироксилиновые пороха, содержащие в своём составе пироксилина до 98 %, спирто-эфирный растворитель, дифениламин и влагу.

2. Пороха на труднолетучем растворителе или баллиститы, в которых растворителем пироксилина служит нитроглицерин, нитродигликоль и т.п. вещества. Баллиститы изготавливаются на основе так называемого растворимого пироксилина, содержат 40 % нитроглицерина, в котором этот вид пироксилина полностью растворяется, до 15 % других добавок.

3. Пороха на смешанном растворителе или кордиты изготавливаются на основе так называемого нерастворимого пироксилина. Они содержат до 60 % нитроглицерина и в качестве добавочного растворителя до 1,5 % ацетона, а также некоторые другие добавки.

4. Пороха на нелетучем растворителе, в которых для желатинирования пироксилина служат такие ВВ, как тротил, динитротолуол и другие.

1.1.4. КИСЛОРОДНЫЙ БАЛАНС

У бризантных взрывчатых веществ в большинстве случаев окислителем является кислород. Речь идёт, конечно, о кислороде, входящем в состав взрывчатого вещества. Если при взрывном превращении весь кислород расходуется на полное окисление горючих компонентов, то такие вещества или смеси называются **стехиометрическими**. У реальных взрывчатых и горючих веществ имеет место избыток или недостаток кислорода. В случае избытка кислорода в продуктах взрыва не содержится опасных

для здоровья человека соединений. Недостаток кислорода влечёт за собой реальную возможность образования ядовитых соединений (СО и др.). Поэтому перед испытанием прострелочной и взрывной аппаратуры, вскрытием корпусов частично сработавших устройств, применением взрывных устройств в закрытых помещениях необходимо знать и уметь оценивать такую характеристику, как кислородный баланс. Кислородный баланс ВВ может быть положительным и отрицательным. Положительный кислородный баланс – избыток кислорода в граммах, остающийся неиспользованным при полном окислении 100 граммов вещества. Имеет обозначение: +20. Отрицательный кислородный баланс – недостаток кислорода в граммах, по сравнению с необходимым его количеством для полного окисления 100 граммов вещества. Обозначается как –30.

Рассмотрим некоторые примеры определения кислородного баланса. Из самого определения кислородного баланса следует, что максимальный кислородный баланс имеет чистый кислород +100. Для определения кислородного баланса чистого водорода составим уравнение реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ и пропорцию $4 : 32 = 100 : x$, откуда $x = 800$ или кислородный баланс чистого водорода равен (–800). Это максимальный отрицательный кислородный баланс.

Определим кислородный баланс для некоторых других веществ, считая, что азот не участвует в реакциях. Для четырёхоксида азота он равен +70 ($\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{O}_2$). Пропорцию составляем исходя из следующих соображений: при распаде N_2O_4 (92 г – мол.) выделяется 64 г-мол. кислорода, а при распаде 100 г N_2O_4 выделится x г кислорода. Для тетранитрометана $\text{C}(\text{NO}_2)_4$ кислородный баланс составляет +49 ($\text{CO}_2 + 4\text{N} + 3\text{O}_2$) $196 : 96 = 100 : x$.

Гексоген имеет отрицательный кислородный баланс ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$), равный –21,6; у тротила он ещё больше ($\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$) – (–74).

1.1.5. ВЫВОДЫ

Для того чтобы горение смесей было признано взрывным, процесс должен обладать следующей совокупностью свойств:

- основная окислительная реакция в горючей смеси должно происходить без участия кислорода воздуха;
- реакция окисления должна быть экзотермической;
- скорость процесса должна быть большой, для того чтобы обеспечить быстрый переход всей горючей смеси в газообразное состояние и тем самым создать высокую концентрацию энергии на начальной стадии расширения продуктов реакции;

– газообразование должно быть значительным, так как объём газов и их температура определяют эффективность перехода потенциальной энергии горючей смеси в кинетическую энергию или механическую работу.

Для развития процесса детонации во взрывчатом веществе необходимо чтобы продукты реакции и сам процесс обладали следующими свойствами:

– основная окислительная реакция во взрывчатом веществе должна происходить без участия кислорода воздуха;

– частицы, представляющие собой продукты реакции, должны находиться в возбуждённом состоянии и обеспечивать локальное выделение большей части энергии из зоны реакции на фронт этой зоны, приводя к огромной концентрации энергии (то есть энергия из зоны химической реакции стекается в область большего давления);

– частицы, представляющие собой продукты реакции, могут находиться в возбуждённом состоянии ограниченное время, что требует высоких скоростей процесса;

– при наличии первых трёх свойств экзотермичность реакции и газовыделение способствуют увеличению импульса и работы, совершаемой детонацией;

– отсутствие экзотермичности и газовыделения не исключает детонации, но делает её низкоэнергетичной, характерной для инициирующих ВВ.

1.2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

1.2.1. НАЧАЛЬНЫЙ ИЛИ ИНИЦИИРУЮЩИЙ ИМПУЛЬС

К используемым в промышленности зарядам взрывчатого вещества предъявляются требования полной безопасности при обращении с ними, с учётом возможного случайного падения, удара или другого воздействия, и, в то же время, абсолютно надёжного срабатывания при возбуждении взрыва существующими средствами взрывания. Чувствительность ВВ к внешним воздействиям характеризуется величиной того начального или инициирующего импульса, который при определённых условиях требуется для возбуждения в них взрыва. В качестве начального импульса могут быть использованы различные виды энергии: механическая, тепловая, электрическая, лучистая, а также энергия другого инициирующего ВВ.

Количество энергии, необходимое для возбуждения взрыва, даже для одного и того же ВВ, при заданном его состоянии не является величиной строго постоянной, но может заметно колебаться в зависимости от формы начального импульса и характера передачи воздействия ВВ.

Так, например, при медленном сжатии некоторых ВВ, взрыв может не возникать даже в том случае если в процессе сжатия будет произведена огромная работа и при этом достигнуты большие давления, в то время как в условиях ударной нагрузки взрыв может быть инициирован несоизмеримо меньшей энергией. Согласно данным Бриджмена, тротил в условиях медленного нагружения не взрывается даже при давлениях порядка 5000 МПа и выше. Кроме того, характер импульса может оказывать определяющим в развитии того или иного процесса во взрывчатом веществе. Из практики ведения работ известно, что под действием теплового импульса во многих ВВ может обеспечиваться лишь горение, в то время как при ударе – детонация.

Контакт взрывчатого вещества с поверхностью металлов и сплавов может повлиять не только на чувствительность их к внешнему воздействию, но и изменить сам характер процесса. Это связано с наличием на поверхности металлов оксидных плёнок, которые, выступая в роли катализаторов, способны модифицировать в прилегающих слоях исходную структуру взрывчатого вещества. В таких случаях наиболее опасным воздействием является сдвиг ВВ относительно твёрдой поверхности.

В процессе хранения взрывчатых веществ их чувствительность к внешним воздействиям может изменяться за счёт испарения отдельных компонентов или эксудации – выделения жидких веществ из ВВ. Особенно это опасно, если выделяющееся вещество взрывчатое и чувствительно к удару, например нитроглицерин. Эксудация капелек нитроглицерина из динамитов или нитроглицериновых порохов увеличивает опасность обращения с ними. Могут иметь место и обратные эффекты – потеря чувствительности к внешним воздействиям, в том числе к инициирующему импульсу, в результате поглощения влаги из воздуха. Ярким примером может служить чёрный порох и аммониты. Общим для них является вхождение в состав этих систем солей азотной кислоты – калийной или аммиачной селитры. Обе селитры обладают высокой гигроскопичностью и поэтому требуют специальных условий хранения или нанесения на изделия из них водоотталкивающих покрытий.

Длительное нахождение изделий из взрывчатых веществ в нефтегазосодержащих флюидах высокого давления также может повлиять не только на чувствительность их к инициирующему импульсу, но и изменить сам характер процесса. Так, через поли-

этиленовые оболочки детонирующего шнура при высоком давлении в скважине происходит диффузия газов во взрывчатое вещество и шнур теряет способность полноценно детонировать. Существенно меняется чувствительность ВВ к инициирующему импульсу в условиях высоких температур, характерных для глубоких скважин. С одной стороны, с ростом температуры меняется температура вспышки и энергия активации, с другой – усиливается термическое разложение ВВ.

Следовательно, чувствительность ВВ к внешним воздействиям не является величиной строго постоянной, но зависит от предистории обработки и хранения ВВ, термобарических условий, сред, с которыми контактирует ВВ, формы и природы начального импульса. Поэтому к работе со штатными изделиями допускаются только квалифицированные специалисты, прошедшие специальную подготовку и неуклонно выполняющие технологическую дисциплину.

1.2.2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К ТЕПЛОВЫМ ИМПУЛЬСАМ

В составе любого ВВ имеются все компоненты, необходимые для протекания реакции. Но в любом ВВ, используемом в промышленности, химические реакции в условиях дневной поверхности протекают с очень малыми скоростями, во многих случаях трудно поддающимися регистрации. Это позволяет длительно хранить ВВ при нормальных условиях.

Зависимость скорости реакции K от температуры вещества и концентраций $[A]$ и $[B]$, реагирующих по бимолекулярному закону веществ, определяется уравнением Аррениуса

$$K = Z [A][B] \exp \{-E/RT\}. \quad (1.1)$$

Под **скоростью реакции** подразумевается изменение концентраций реагирующих веществ за единицу времени. Концентрации в этом случае принято выражать числом грамм-молекул вещества в одном литре, а время в секундах. Если скорость реакции, например, 0,08 моля в секунду, то это значит, что за секунду концентрация реагирующих веществ уменьшилась на 0,08 моля в литре. Важнейшими факторами, влияющими на скорость реакции являются: концентрация реагирующих веществ, температура и катализаторы, роль которых могут выполнять примеси. Z называется константой скорости реакции и для бимолекулярных реакций при условии: $[A] = [B] = 1$ моль/л; она численно равна скорости реакции.

Для мономолекулярных реакций уравнение (1.1) будет иметь вид

$$K = Z \exp \{-E/RT\}. \quad (1.2)$$

При этом Z равна числу молей вещества, распавшихся в единицу времени в единице объёма. Величина Z принимается постоянной, что является достаточно условным положением. В уравнении R – газовая постоянная, численно равная работе, совершаемой одним молем идеального газа при изобарном нагревании его на один градус: $8,31 \cdot 10^3$ Дж/К·кмоль. Согласно уравнению (1.2), в реакцию вступают далеко не все молекулы, а только активные, энергия которых превосходит некоторую величину E , характерную для данной реакции. Величину E называют энергией активации. Энергия активации рассчитывается в Дж на кмоль. Множитель $\exp\{-E/RT\}$ характеризует относительное число активных молекул в одной килограмм-молекуле (кмоль) вещества.

Вычисление значений E и Z производится аналитически или эмпирически путём построения графиков зависимости скорости реакции от температуры.

Логарифмируя уравнение Аррениуса для мономолекулярных реакций, можем получить связь между $\ln K$ и обратной величиной температуры.

$$\ln K = \ln Z - E/RT. \quad (1.3)$$

Эта связь выражается прямой линией (рис. 1.1).

Тангенс угла α наклона прямой линии к оси абсцисс определяет величину E/R , а отрезок, отсекаемый ею на оси ординат, равен $\ln Z$.

Для оценки меры чувствительности взрывчатых веществ к тепловому импульсу обычно служит так называемая температура вспышки, которую экспериментально устанавливают при определённых условиях.

Температурой вспышки называется температура, до которой должно быть нагрето данное количество ВВ для его воспламенения, в процессе которого химическая реакция сопровождается звуковым эффектом. Для обеспечения вспышки необходимо превышение теплопритока, обусловленного протеканием химической реакции над теплопотерями, возникающими вследствие проводимости и радиации тепла.

Таким образом, при нагревании ВВ моменту вспышки предшествует период самоускорения химической реакции. Промежуток времени от начала нагрева до момента вспышки ВВ называется временем задержки вспышки или периодом индукции.

Из самого определения периода индукции τ следует, что он должен быть обратно пропорционален скорости химической реакции K : $\tau \approx 1/K$. Используя уравнение Аррениуса можно запи-

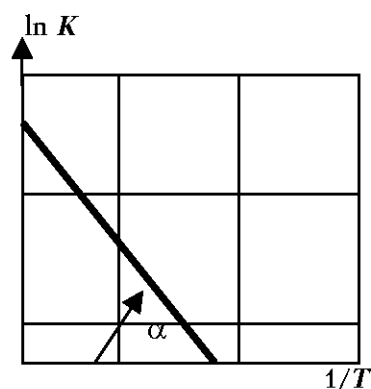


Рис. 1.1. Зависимость скорости реакции от температуры

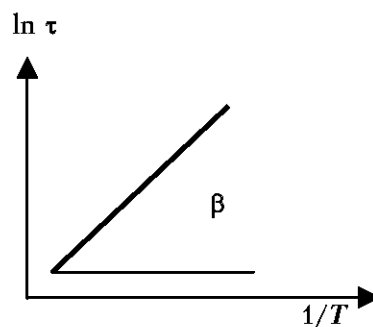


Рис. 1.2. Зависимость периода индукции от температуры

сать $\tau = C \exp\{E/RT\}$, (где C – постоянная, зависящая от состава ВВ, его количества и начальной температуры ВВ).

Из этого выражения видно, что с уменьшением энергии активации и увеличением температуры нагрева период задержки будет уменьшаться. Представляя уравнение в логарифмическом виде: $\ln \tau = \ln C + E/RT$ нетрудно увидеть линейную связь между $\ln \tau$ и $1/T$. На рис. 1.2 представлена зависимость периода задержки вспышки от температуры. На графике тангенс угла β наклона прямой к оси абсцисс равен E/R . Это позволяет на основе экспериментальных данных по зависимости времени задержки (или периода индукции) вспышки от температуры определить энергию активации.

В связи с зависимостью $\ln C$ и самой энергии активации E от температуры изображённая на рис. 1.2 прямая в разных температурных диапазонах будет иметь различные углы наклона и отсекать на оси ординат различные отрезки. На рис. 1.3 приведены зависимости периода индукции вспышки от температуры для азида бария и азида свинца. Верхние прямые на рисунке отвечают более низким температурам. На угол наклона нижних прямых определяющее влияние оказывают процессы разложения ВВ при высоких температурах.

Следует учитывать, что энергия активации может зависеть от температуры ещё более сложным образом. Так, у нитроглицерина с повышением температуры энергия активации возрастает. Это же относится и к пироксилину. Очевидно, что такие эффекты связаны с изменением самого характера течения реакций разложения и, прежде всего, состава продуктов реакции с повышением температуры. Факт изменения состава продуктов реакции с изменением температурного диапазона установлен многими исследова-

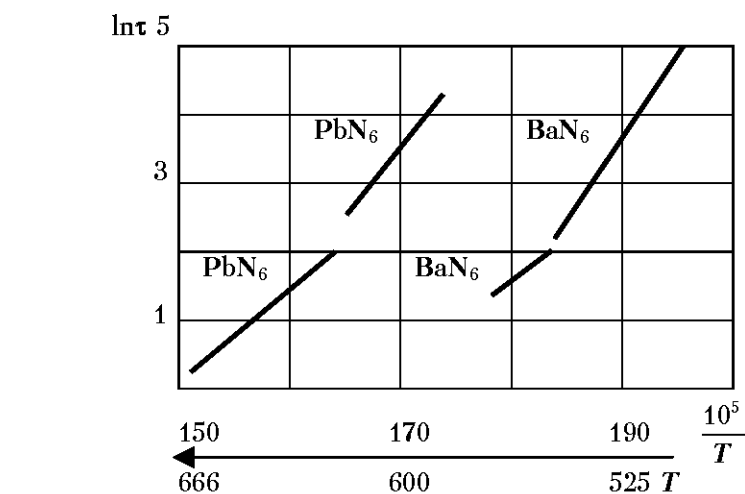


Рис. 1.3. Зависимости периода индукции вспышки от температуры



Рис. 1.4. Зависимость времени задержки от температуры

дователями. Однако результаты экспериментов не подвергались детальному анализу. По-видимому, с изменением состава газа меняется сущность самой физики процесса вспышки. И если при одном составе продуктов разложения возможен сток энергии из большого объёма ВВ и концентрация её вплоть до вспышки, то при другом составе продуктов такой процесс исключён и вспышка может происходить только при высоких температурах.

Для определения температуры вспышки конденсированных ВВ наиболее широкое применение нашли два следующих метода:

1. Определённое количество ВВ, начиная с некоторой температуры, нагревают с постоянной скоростью. При этом фиксируют температуру, при которой происходит вспышка. Метод применяют при практических испытаниях взрывчатых веществ.

2. Второй метод заключается в установлении зависимости изменения времени задержки от температуры. На основании экспериментальных данных строится зависимость, аналогичная изображённой на рис. 1.4. Этот метод позволяет более точно и пол-

но характеризовать отношение ВВ к тепловому импульсу. Для каждого ВВ, при соответствующих условиях опыта, существует некоторая температура, ниже которой вспышка вообще не происходит, как бы долго мы его не нагревали.

Минимальные температуры вспышки ВВ представляют интерес главным образом с точки зрения вопросов, связанных с техникой безопасности при хранении больших масс ВВ

Во многих случаях практического использования ВВ инициирование взрыва осуществляется весьма кратковременными тепловыми импульсами, для которых время задержки не превосходит тысячных или даже десятитысячных долей секунды. Процессы взрыва могут быть иногда также обусловлены быстрыми ($\tau \leq 100$ мкс) местными разогревами ВВ при пропускании тока конденсаторного разряда через тонкие металлические нити.

Экспериментально установленные минимальные температуры вспышки некоторых ВВ приводятся в табл. 1.2.

Для определения температуры вспышки ВВ пользуются приборами различной конструкции. Чаще всего испытания производятся в приборе, схема которого приведена на рис. 1.5. Основными деталями прибора являются: металлическая цилиндрическая баня – *а*, наполненная сплавом Вуда. Обогрев бани производится электрическим током, проходящим через обмотку из никрома. Обмотка изолирована от поверхности бани керамической изоляцией. Для уменьшения теплоотдачи и удобства работы баня укреплена в латунном футляре – *б*. Сверху баня закрывается металлической крышкой – *в* с отверстиями; через центральное отверстие проходит термометр, погружённый в сплав и защищённый от действия взрыва металлической гильзой; другие отверстия – *г* служат для опускания в баню специальных гильз с ВВ. Навеска обычно равна 0,05 г.

Определение производится по одному из методов, описанных выше. Для того чтобы судить о предельных условиях возбуждения взрыва необходимо прежде всего знать температуры терми-

Таблица 1.2

Температуры вспышки некоторых ВВ

Название ВВ	Температура вспышки, °С	Название ВВ	Температура вспышки, °С
Гремучая ртуть	175–180	Тетрил	190–200
Азид свинца	315–330	Гексоген	225–235
Азид серебра	310–320	Тэн	210–220
Стифнат свинца	270–280	Ксилол	315–330
Пироксилин	185–195	Аммотол	220
Нитроглицерин	200–205	Бездымные пороха	180–200
Тротил	300–310	Дымные пороха	290–310

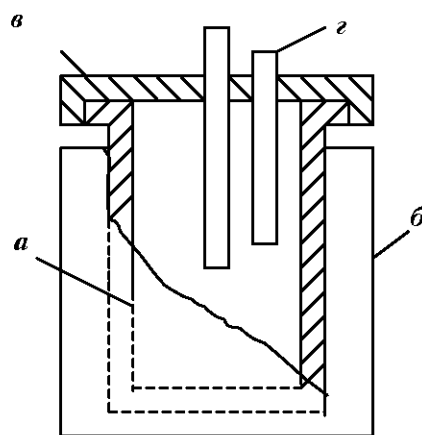


Рис. 1.5. Схема прибора для определения температуры вспышки

ческого воспламенения соответствующих ВВ при очень коротких периодах задержки, характерных для передачи теплового импульса от капсуля-воспламенителя капсулю-детонатору. В то же время экспериментально установленные температуры вспышки отвечают значительно более длительным периодам задержки.

Весьма приблизительное представление о порядке интересующих температур можно получить путём экстраполяции экспериментальных данных на очень короткие промежутки времени. При этом к принципиальным недостаткам такой экстраполяции следует отнести:

- 1) отсутствие учёта изменения самого характера химического разложения ВВ при переходе от низких температур к более высоким;
- 2) отсутствие контроля за составом продуктов разложения и их энергетическим состоянием;
- 3) исключение возможности протекания процессов концентрации энергии внутри объёма продуктов реакции при высоких температурах.

1.2.3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К УДАРУ

Сущность испытания чувствительности взрывчатых веществ к удару заключается в определении той работы удара, которая необходима для получения одних только взрывов, отказов, или определённого соотношения между ними.

Испытание чувствительности взрывчатых веществ к удару производится с помощью так называемых копров. К последним относятся устройства, в которых груз с заданной фиксированной высоты сбрасывают вдоль направляющей стойки на стальной ударник, который свободно передвигается в вертикальном направлении в гнезде. Под ударник устанавливается латунный колпачок от капсуля пистолетного патрона с запрессованной под давлением (50–100 МПа) навеской ВВ (обычно 0,02 г).

Чувствительность инициирующих ВВ к удару принято харак-

теризовать верхним и нижним пределами чувствительности, т.е. минимальной высотой H падения груза, при которой из определённого числа испытаний (обычно не менее десяти) получается 100 % взрывов, и максимальной высотой падения груза, при которой из того же числа испытаний получается 100 % отказов.

Верхний предел чувствительности H_{100} определяет условия безотказного действия капсюлей, нижний предел H_0 – условия безопасности при обращении с ними.

При испытании инициирующих веществ или изделий из них верхний и нижний пределы дополняются построением полной кривой чувствительности, общий характер которой показан на рис. 1.6. При испытании менее чувствительных бризантных взрывчатых веществ обычно пользуются вертикальным копром. Вес груза подбирается в зависимости от чувствительности ВВ. Для получения надёжных результатов при испытании ВВ на чувствительность к удару необходимо прежде всего обеспечить соблюдение идентичных условий эксперимента. Высота падения груза при испытаниях не должна превышать предела, при котором в элементах системы копра возникает остаточная деформация; в противном случае условия эксперимента станут неопределёнными.

Чувствительность бризантных ВВ к удару чаще всего принято характеризовать одним из следующих способов:

1. Определение процента взрывов, получающихся при падении груза с определённой высоты. Стандартными условиями испытания при этом считаются масса груза $P = 10$ кг и высота его падения $H = 25$ см (или $P = 2$ кг и $H = 50$ см).

2. Определение критической энергии удара ($K_{50} = PH$), соответствующей 50 % вероятности взрыва.

Для размещения взрывчатого вещества при испытаниях используется штемпельный приборчик, схема которого представлена на рис. 1.7.

Общий баланс энергии K при падении груза на незаряженный приборчик можно представить в следующем виде:

$$K = K_{\text{П1}} + K_2 \quad (1.4)$$

где $K = mgH$ – энергия, приобретённая грузом массы m при падении с высоты H к моменту удара; $K_{\text{П1}}$ – необратимые потери энергии в системе копра; K_2 – энергия упругой деформации штемпельных приборчиков и металлических элементов копра.

Энергия упругой деформации металла K_2 расходуется на отскок груза и движение его вверх по направляющим, а также на необратимые потери энергии в системе копра при движении груза вверх вдоль направляющих т.е.

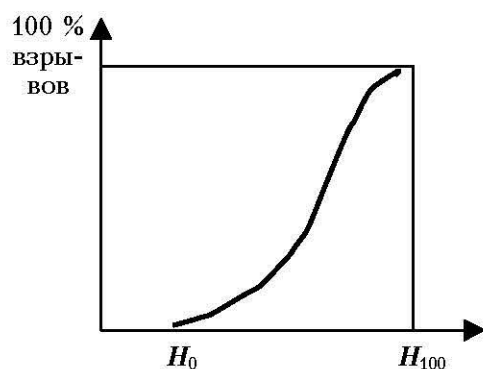
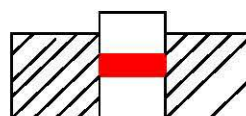


Рис. 1.6. Кривая чувствительности инициирующих веществ к удару

Рис. 1.7. Схема штемпельного приборчика



$$K_2 = mgH_0 + K_{П2}.$$

Суммарные необратимые потери энергии $K_{П} = K_{П1} + K_{П2}$.

При испытании ВВ на стандартном приборе высота отскока груза может быть достаточно большой. Так, во многих случаях отношение H_0/H может составлять в среднем величину 0,5. Таким образом, можно заключить, что при отсутствии ВВ необратимые потери энергии в системе составляют около 50 %.

При падении груза на приборчик, снаряженный ВВ, общий баланс энергии будет равен

$$K = K_1^* + K_2^* + K_3^*,$$

где K_1^* , K_2^* , K_3^* – соответственно, необратимые потери энергии в системе копра, энергия упругой деформации, энергия, поглощённая во взрывчатом веществе.

Опыт показывает, что у снаряжённых взрывчатым веществом приборчиков высота отскока груза H_0^* лишь незначительно отличается от H_0 – величины отскока при отсутствии ВВ. Этот факт говорит о том, что в самом ВВ поглощается лишь незначительная часть кинетической энергии удара. Преобладающая же доля энергии, как и в отсутствии ВВ, расходуется на отскок груза и необратимые потери в системе копра.

Таким образом, необходимо заключить, что $K_{50} = mg(H - H_0^*)$ не представляет собой ту долю энергии, которая расходуется в самом ВВ. Вследствие этого K_{50} , как количественная мера чувствительности, является величиной сугубо условной и может служить лишь для сравнительной характеристики различных ВВ при заданных условиях испытаний.

Энергия K_3^* , поглощённая в самом ВВ, не поддаётся точному определению и поэтому не может быть использована в качестве критерия чувствительности ВВ к удару.

Важным моментом протекания процессов во взрывчатом веществе при ударе является и величина упругих напряжений в нём. Эти напряжения могут быть рассчитаны при условии отсутствия пластических деформаций в системе копёр – штемпельный приборчик – ВВ. При этом максимальные напряжения и запас упругой энергии будут относиться к роликам штемпельного приборчика. Другие элементы копра из-за малых напряжений в них практически не вносят заметной лепты в общий запас упругой энергии.

Согласно теории упругости с достаточным приближением можно принять

$$K_2^* = \sigma_{\max}^2 LS/2E, \quad (1.5)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение, возникающее в металле роликов; L – высота роликов; S – площадь их поперечного сечения; E – модуль упругости системы ролики – ВВ. Величина E принимается равной модулю упругости металла роликов, так как толщина слоя ВВ (0,1 мм), участвующего в упругой деформации, составляет всего лишь 1/200 общей высоты роликов ($L = 20$ мм).

Энергия упругой деформации металла расходуется на отскок груза, т.е.

$$\sigma_{\max}^2 LS/2E = PH_0^*, \text{ откуда } \sigma_{\max} = (2EPH_0^*/LS)^{0.5}. \quad (1.6)$$

Полученное выражение может служить для подсчёта возникающих при ударе во взрывчатом веществе максимальных напряжений, так как максимальные напряжения во взрывчатом веществе и роликах должны быть равными.

При применении обычных приборчиков и стандартных условиях испытания ($P = 10$ кг, $H = 25$ см) бризантных ВВ, $\sigma_{\max}$ достигает 1500 МПа. Это значение напряжений само по себе не является определяющим при инициировании взрыва.

Из экспериментальных исследований известно, например, что большую роль при испытаниях бризантных ВВ играет форма импульса. Так, при наличии резиновой прокладки между штемпельным приборчиком и основанием копра для получения заданного процента взрывов необходимо затратить большую энергию удара. Большая энергия требуется и в том случае, когда масса падающего груза увеличивается при уменьшении высоты сбрасывания. В условиях постоянства кинетической энергии удара C характер изменения импульса в зависимости от скорости падающего груза определяется соотношением

$$I = C/v,$$

так как $C = \text{const}$ и $I = mv$.

Из этого следует, что увеличение скорости падающего груза обеспечивает более короткий, но в то же время более эффективный удар.

1.2.4. ЗАВИСИМОСТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Чувствительность одного и того же взрывчатого вещества может сильно меняться в зависимости от действия различных физических факторов. К основным факторам, оказывающим существенное влияние на чувствительность ВВ, относятся: температура, теплоёмкость и теплопроводность, структура, плотность вещества, невзрывчатые примеси.

С повышением температуры чувствительность ВВ быстро возрастает, а при температурах, приближающихся к температурам вспышки, они взрываются от самого слабого импульса. Зависимость чувствительности к удару от температуры по данным Тейлора и Уиля для гремучей ртути и тетразена представлены на рис. 1.8.

При значительном понижении температуры чувствительность ВВ к удару падает. Так, при охлаждении гремучей ртути до температуры жидкого азота она при воспламенении часто даёт отказы. Влияние сильного охлаждения на чувствительность ВВ иллюстрируется данными табл. 1.3.

H , дюймы

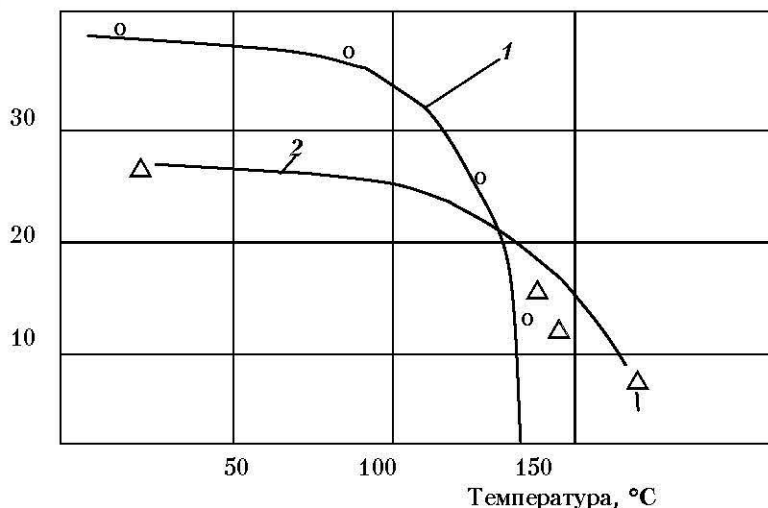


Рис. 1.8. Зависимость чувствительности к удару тетразена (1) и гремучей ртути (2) от начальной температуры:

H — высота падения груза

Таблица 1.3

Влияние начальной температуры на предельный инициирующий заряд [2]

Название ВВ	Наименьшее количество гремучей ртути, необходимое для возбуждения взрыва, г	
	$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = -110\text{ }^{\circ}\text{C}$
Гремучий студень	0,25	1,0
Пироксилин	0,25	2,0 отказы
Пикриновая кислота	0,25	2,0 отказы

Теплоёмкость и теплопроводность главным образом сказываются на чувствительности к тепловому импульсу. При увеличении теплоёмкости необходимо затратить большее количество тепла для нагревания вещества до температуры, при которой достигается его воспламенение. Теплопроводность оказывает аналогичное влияние: с её ростом оказывается всё сложнее получить высокие локальные температуры из-за быстрого рассеивания тепла по массе вещества.

При испытании чувствительности ВВ к удару влияние теплопроводности и теплоёмкости носит неоднозначный характер. С одной стороны, время образования «горячих точек» настолько мало, что теплопроводность не должна оказывать заметного влияния на процесс. С другой, – сам удар может привести к изменению теплопроводности на несколько порядков и возникновению анизотропии её. Тогда теплопроводность из второстепенных факторов перейдёт в главные.

Влияние структуры, плотности и величины кристаллов сказывается прежде всего на восприимчивости ВВ к детонации и в меньшей мере на чувствительности к удару.

Примером может служить более высокая восприимчивость к детонации прессованных взрывчатых веществ по сравнению с литыми.

Чувствительность ВВ может изменяться при введении в заряд инертных примесей. Влияние последних сказывается главным образом на чувствительности ВВ к механическим воздействиям. Различного рода примеси оказывают далеко не одинаковое влияние на чувствительность ВВ – в одних случаях чувствительность повышается, в других – понижается.

Примеси, способствующие повышению чувствительности ВВ, называются сенсibilизаторами, а примеси, которые понижают чувствительность ВВ, – флегматизаторами.

Хорошими сенсibilизаторами, как правило, являются вещества, обладающие большой твёрдостью, острыми гранями и высокой температурой плавления. К ним можно отнести мелкое стекло, песок, частицы некоторых металлов. Они способствуют

концентрации энергии удара на острых краях, являются очагами интенсивного трения, приводят к образованию в заряде многочисленных очагов локальных разогревов, способствующих возникновению в нём взрыва. Опыты Райдила и Робертсона показали, что в присутствии сенсibilизаторов резко сокращается период времени τ от момента удара до взрыва. Так, для чистого тэна $\tau = 240$ мкс, а для тэна с примесью 18 % кварца всего – 80 мкс.

Температура плавления частиц примеси для выполнения последними сенсibilизирующих функций должна быть выше критической температуры, необходимой для возбуждения данного чистого взрывчатого вещества. В соответствии с этим сенсibilизаторами по отношению к тэну и гексогену являются только примеси с температурой плавления больше 430–450 °С.

Хорошими флегматизирующими свойствами обладают такие вещества, как, например, парафин, воск, вазелин, камфара. Обволакивая поверхность кристаллов мягкой эластичной плёнкой, они способствуют более равномерному распределению напряжений в заряде ВВ и уменьшению трения между отдельными частицами. Это приводит к существенному ограничению поверхностных реакций и снижению вероятности возникновения горячих точек.

Характер влияния инертных примесей на чувствительность в значительной мере зависит от соотношения физико-механических свойств самого ВВ и этих примесей. Так, опыты Фролова и Баума показали, что тальк, будучи флегматизатором по отношению к гексогену, в то же время является активным сенсibilизатором по отношению к тротилу. В табл. 1.4 приведены данные по влиянию талька на чувствительность тротила и гексогена к удару.

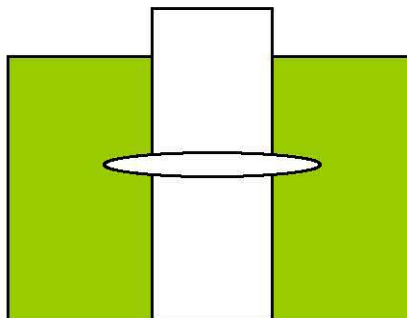
Холево указывает, что влияние инертных примесей определяется не только их физическими свойствами, но и сильно зависит от условий деформации при ударе. Это подтверждается следующими опытами, выполненными Холево.

Таблица 1.4

Влияние талька на чувствительность тротила и гексогена к удару

Содержание талька, %	% взрывов	
	тротил	гексоген
1	4	84
2,5	8	80
5,0	8	36
10,0	24	12
20	52	8
40	68	8

Рис. 1.9. Схема штемпельного приборчика Холево



Чувствительность ВВ к удару определяется в обычных приборчиках (см. рис. 1.7) и в приборчике Холево, схематично представленном на рис. 1.9. Отличие состоит в том, что в приборчике Холево заряд ВВ при ударе может сравнительно легко выдавливаться в канавку, имеющуюся в муфте, между верхним и нижним роликами, в то время как в обычных приборчиках ВВ может выдавливаться только в зазор между муфтой и роликами. Смесь гексогена и алюминиевой пудры в соотношении 1:1 при энергии удара 30 Нм в стандартных приборчиках даёт одни отказы, а в приборчиках Холево при тех же условиях 100 % взрывов. При добавлении к этой смеси 10 % парафина при той же энергии удара было получено в стандартных приборчиках 80 % взрывов, а в приборчиках Холево 40 % взрывов. Здесь парафин выступил как сенсibilизатор и как флегматизатор в зависимости от условий испытания.

По мнению Холево, сенсibilизация в присутствии парафина отмечается лишь в том случае, когда заряд без парафина слабо деформируется – не выдавливается в зазор стандартного приборчика; в присутствии парафина выдавливание ВВ в зазор между роликами и муфтой значительно облегчается. Сенсibilизирующее действие твёрдых добавок отчётливо проявляется в том случае, когда имеются благоприятные условия для быстрого течения заряда в приборчике (приборчик Холево).

Необходимо отметить, что процесс выдавливания ВВ в зазор или канавку нельзя рассматривать как единственную причину возникновения взрыва при ударе. В то же время опыты Холево имеют огромную ценность при планировании проведения работ на скважинах по закачке в них при больших градиентах давления жидких горюче-окислительных или топливно-окислительных систем. При этом главной задачей становится исключение несанкционированного взрыва или горения ГОС или ТОС в процессе закачки их в скважины.

1.2.5. ПЕРЕДАЧА ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ВЛИЯНИЕ

Явление возбуждения одним зарядом детонации другого заряда, расположенного на некотором расстоянии от первого или

отделённого от первого преградой, называется детонацией через влияние. Для взрывных устройств, спускаемых в скважину в область действия высоких давлений и температур, это явление представляет собой особую важность по следующим причинам.

Во-первых, во многих устройствах детонацию необходимо инициировать через герметичный корпус или оболочку, защищающие основной заряд ВВ от действия высокого гидростатического давления.

Во-вторых, сами средства взрывания (патроны, средства инициирования, детонирующие шнуры) имеют достаточно прочную оболочку, через которую необходимо возбуждать детонацию во взрывных устройствах. Таким образом, между инициирующим и основным зарядом может располагаться многослойная преграда. Кроме того, исследования этого вопроса служат основой для безопасных расстояний хранения ВВ и конструирования детонационных цепей.

Заряд, возбуждающий детонацию, называют активным, а заряд, в котором детонация возбуждается, – пассивным.

Передача детонации через воздух. В этом случае часть энергии от активного заряда к пассивному может быть перенесена тремя путями:

- а) ударной волной, распространяющейся в воздухе;
- б) потоком продуктов детонации;
- в) твёрдыми частицами, метаемыми взрывом.

При полной детонации активного заряда в направлении к пассивному заряду и отсутствии оболочек у того и другого заряда, перенос энергии осуществляется ударной волной и продуктами детонации.

Экспериментально установлено, что возбуждение детонации в зарядах бризантных ВВ происходит именно ударной волной при давлении на фронте $P_m \geq 20\text{--}30$ МПа. Если давление на фронте ударной волны меньше, а детонация всё-таки возбуждается, то ей предшествует период горения.

С уменьшением плотности и увеличением пористости (до определённого предела) пассивного заряда дальность передачи детонации увеличивается. Это объясняется тем, что в условиях высокой пористости превалирует процесс зажигания, (т.е. горение по поверхности зёрен с участием кислорода воздуха), при котором образуется большой объём энергетически возбуждённых частиц, способных к локальной концентрации энергии, за счёт чего процесс горения переходит во взрыв. При насыщении пассивного заряда инертным газом или введении в него легкоплавких веществ, влияние пористости на дальность передачи детонации становится незначительным.

Таблица 1.5

Влияние оболочки активного заряда на дальность передачи детонации

Характеристика оболочки активного заряда	Плотность активного заряда, г/см ³	Плотность пассивного заряда, г/см ³	R_{100} , см	R_{50} , см	R_0 , см
Бумага	1,25	1	17	19,5	22
Сталь, толщина стенки 4,5 мм	1,25	1	23	26	29
Бумага	1	1	13	14	15
Свинец, толщина стенки 6 мм	1	1	18	22	26
Оболочка отсутствует	1,25	1	17	19	21

Примечание. Здесь и далее R_{100} — предельная дальность, соответствующая 100 % возбуждения детонации пассивного заряда. R_{50} — дальность, соответствующая 50 % возбуждения детонации. R_0 — минимальная дальность, соответствующая 100 % отказов.

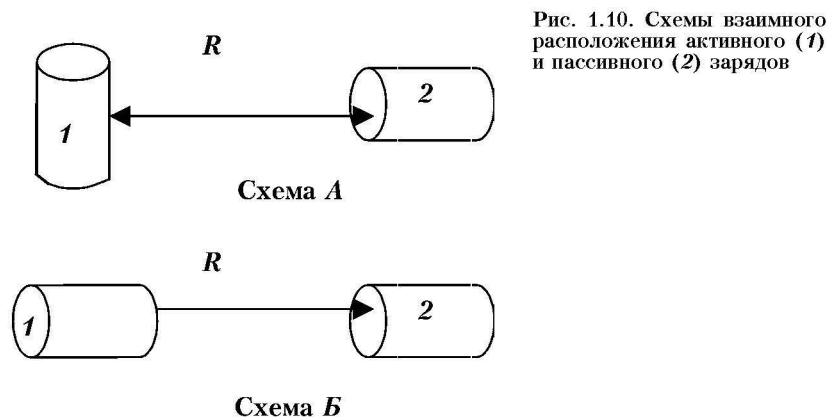
Рассмотрим опытный материал по влиянию различных факторов на дальность передачи детонации через воздух.

Плотность активного заряда оказывает значительное влияние на дальность передачи детонации. Возрастание дальности передачи детонации с возрастанием плотности активного заряда отражает простой факт увеличения скорости детонации и скорости истечения продуктов взрыва с ростом плотности взрывчатого вещества. Однако такая закономерность характерна только для малых зарядов. Для больших активных зарядов дальность передачи детонации практически не зависит от плотности.

Значительное влияние на дальность передачи детонации оказывает оболочка, в которую заключён активный заряд. Так, при использовании зарядов массой 50 г из пикриновой кислоты, заключённых в открытую с обоих концов оболочку из бумаги или стали, дальность передачи детонации возросла в 3–4 раза по сравнению со случаем передачи детонации для таких же зарядов, но без оболочки. В табл. 1.5 приведены результаты влияния оболочек из различных материалов на дальность передачи детонации.

Влияние боковой оболочки активного заряда объясняется увеличением активной части заряда за счёт уменьшения или полного исключения волн разрежения от боковой поверхности заряда.

Дальность передачи детонации значительно возрастёт в том случае, когда заряды расположены по одной оси и направления инициирования активного и пассивного зарядов совпадают. На рис. 1.10 приведены схемы различного взаимного расположения зарядов. Эксперименты проводились на зарядах из плавленной пикриновой кислоты весом 4 кг. При испытании по схеме Б,



распространение детонации совпадает с осью активного заряда и начальная скорость истечения продуктов детонации значительно выше, чем в остальных направлениях. В табл. 1.6 приведены результаты влияния взаимного расположения активного и пассивного зарядов на дальность передачи детонации.

При ограничении разлёта продуктов детонации активного заряда дальность передачи детонации существенно возрастает. Эксперименты по влиянию ограничений разлёта продуктов детонации проводились с использованием картонных и стальных трубок с внутренним диаметром, равным диаметру зарядов из пикриновой кислоты массой 50 г каждый. Заряды располагались по схеме Б, трубки закрывали только зазор между зарядами.

В табл. 1.7 приведены результаты определения дальности передачи детонации при ограничении разлёта продуктов детонации активного заряда (схема Б).

Плотность пассивного заряда оказывает сильное влияние на дальность передачи детонации. По опытам Бюрло, дальность передачи линейно убывает с увеличением плотности пассивного заряда. Для мелинитовых активных зарядов весом 50 г эта зависимость изображена на рис. 1.11.

Таблица 1.6

Влияние расположения пассивного и активного зарядов на дальность передачи детонации

Взаимное расположение зарядов	R_{100} , см	R_{50} , см	R_0 , см	Плотность заряда г/см ³	
				активного	пассивного
По схеме А	15	20	25	1,36	1,6
По схеме Б	75	85	95	1,35	1,6

Таблица 1.7

Передача детонации при ограничении разлёта продуктов детонации активного заряда

Способ ограничения разлёта продуктов активного заряда	Плотность заряда, г/см ³		R ₅₀ , см
	активный	пассивный	
Цилиндрическая стальная труба внутренним диаметром 29 мм (соответствует диаметру заряда) с толщиной стенки 5 мм	1,25	1,0	125
Картонная трубка такого же размера, с толщиной стенки 1 мм	1,25	1,0	59
Среда между зарядами не канализирована	1,25	1,0	19

Увлажнение пассивного заряда заметно снижает его восприимчивость к детонации и, следовательно, уменьшает дальность возбуждения детонации в нём. В табл. 1.8 приведены результаты испытания мелинитовых увлажнённых пассивных зарядов плотностью 1 г/см³ на восприимчивость их к детонации через влияние. Активный заряд с плотностью 1,25 г/см³ имел массу 50 г.

Информация о передаче детонации через плотные инертные среды представляется особо важной для взрывных работ в скважинах. Плотная среда между зарядами полностью исключает передачу детонации продуктами взрыва и осколками оболочки активного заряда. Возбуждение детонации в пассивном заряде осуществляется ударной волной, распространяющейся в инертной

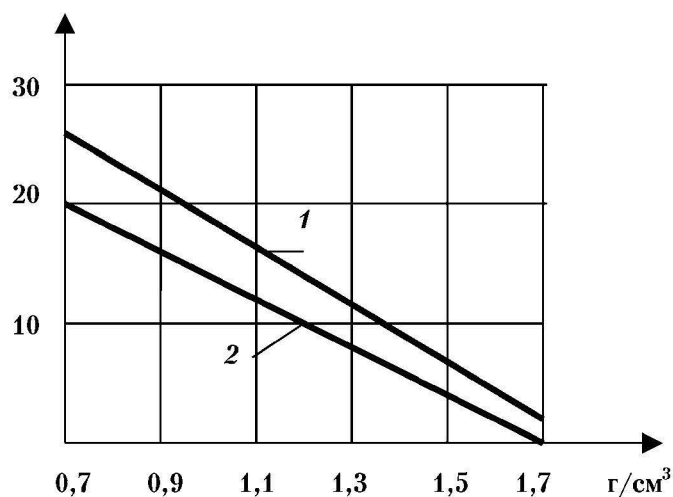


Рис. 1.11. Зависимость дальности передачи детонации от плотности пассивного заряда при плотности активного 1 – 1,5 г/см³, 2 – 1 г/см³

Таблица 1.8

Влияние влажности пассивного заряда на дальность передачи детонации

Влажность пассивного заряда, %	R_{100} , см	R_{50} , см	R_0 , см
0,15	17	19,5	22
3,05	6	7,5	9
4,50	5	6,5	8
6,75	4	5	6
12,0	2	2,5	3
16,3	0	0,5	1

среде. По мере распространения в инертной среде ударная волна затухает и её воздействие на пассивный заряд будет определяться значением пикового давления и импульса в момент подхода к пассивному заряду. Если волна еще обладает достаточным давлением на фронте и импульсом, то она в состоянии вызвать детонацию в пассивном заряде. В тех случаях, когда ударная волна вырождается в акустическую, её распространение в пассивном заряде будет таким же, как в обычной инертной среде.

Дальность передачи детонации через плотные инертные среды связана с коэффициентом сжимаемости конкретной среды, её вязкостью и плотностью. Бюро, используя мелинитовые заряды массой 50 г, диаметром 28 мм и плотностью $1,25 \text{ г/см}^3$ (активный заряд), установил, что дальность передачи детонации по отношению к пассивному мелинитовому заряду плотностью 1 г/см^3 характеризуется данными, приведёнными, в табл. 1.9.

При передаче детонации через сталь, детонация в пассивном заряде развивается с задержкой (с периодом индукции). Чем больше затухание ударной волны в передающей плотной среде, тем больше задержка. Для тротильных зарядов, спрессованных из мелких зёрен, предельное время задержки составляет 2,5 мкс. Это говорит о том, что небольшое увеличение толщины стальной пластины за пределами критической толщины ослабляет настолько ударную волну, что она не в состоянии инициировать

Таблица 1.9

Передача детонации через плотные среды

Промежуточная среда	R_{100} , см	R_{50} , см	R_0 , см
Вода	3	4	5
Глина	2	2,5	3
Песок	1	1,5	2
Сталь	1	1,5	2
Ель (передача параллельно волокнам)	3	4	5
Ель (передача перпендикулярно волокнам)	3	3,5	4

детонацию в пассивном заряде. Время задержки τ_3 (период индукции) входит в качестве составляющей в общий интервал времени между подходом ударной волны к стальной пластине и началом детонации в пассивном заряде. Поэтому для определения τ_3 из общего интервала времени нужно вычесть время прохождения ударной волны через стальную пластину. Общий интервал времени определяют методом скоростной фотографии. Время прохождения ударной волны через стальную пластину находят, принимая скорость ударной волны в стали равной скорости звука:

$$\tau = h/v,$$

где τ – время прохождения ударной волны через стальную пластину толщиной h ; v – скорость звука в стали (5300 м/с).

Передача детонации для металлов и сплавов, плотность которых меньше, чем плотность стали, происходит через более толстые слои. Так, например, дальность передачи детонации через алюминий превышает 20 мм.

Активные заряды при исследовании передачи детонации через сталь и алюминий готовились из флегматизированного гексогена плотностью 1,60 г/см³ (скорость детонации 8000 м/с). Вес активного заряда – 35,5 г. Пассивные заряды готовились из тротила плотностью 1,30–1,60 г/см³. В табл. 1.10 приведены данные передачи детонации через сталь.

Увеличение задержки τ_3 при подходе к предельной толщине передающей среды характерно не только для металлов, но и для воды. При встрече подводной ударной волны с пассивным зарядом, плотность которого больше плотности воды, в последнем возникает преломлённая ударная волна. Если параметры её достаточны для возбуждения интенсивной химической реакции, то ударная волна переходит в волну детонационную. В тех случаях, когда параметры набегающей волны меньше критических, ударная волна постепенно затухает переходя в акустическую.

Таблица 1.10

Передача детонации через сталь

Плотность пассивного заряда, г/см ³	Толщина передающей стальной пластины, мм	Время задержки τ_3 , мкс	Плотность пассивного заряда, г/см ³	Толщина передающей стальной пластины, мм	Время задержки τ_3 , мкс
1,30	12	2,1	1,50	8	1
1,30	14	3,3	1,50	10	1,2
1,30	16	отказ	1,50	12	1,4
1,50	12	1,4	1,50	14	1,7
1,50	16	отказ	1,60	12	1,4
1,50	14	2,0	1,60	16	отказ

Таблица 1.11

Критические параметры ударных волн в воде

Параметры ударных волн	Пассивный заряд		
	Флегматизированный гексоген	Тротил, $\rho = 1,30 \text{ г/см}^3$	Тэн $\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$
Давление на фронте волны, МПа	29000	22000	18000
Скорость волны, м/с	3300	2960	2800
Скорость воды за фронтом УВ, м/с	880	735	640
Скачок температуры на фронте УВ °С	100	80	65

В табл. 1.11 приведены критические параметры ударных волн в воде, обеспечивающих возбуждение детонации пассивных зарядов.

1.2.6. ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

С бурением глубоких и сверхглубоких скважин для поиска и разведки новых месторождений углеводородов на территориях РФ связана основная перспектива прироста запасов. В этой связи целесообразно оценить реальные возможности взрывных устройств, которые могут быть эффективно использованы при высоких температурах и давлениях в скважинах.

Сопоставление свойств различных по своему строению классов ВВ, проведенное рядом авторов, привело к следующим выводам.

Нитроэфиры имеют наибольшую мощность (теплоту взрыва, скорость детонации) и наименьшую термостабильность (до 100 °С); нитроамины (гексоген, октоген) по мощности не уступают нитроэфирам, но обладают большей термостабильностью (190 – 200 °С).

Взрывчатые вещества типа неорганических солей (азиды, перхлораты) и солей, содержащих органический анион (пикраты, стифнаты), обладают наименьшей мощностью, но, предположительно, наибольшей термостабильностью.

Ароматические нитросоединения считаются наиболее перспективными в отношении оптимального сочетания мощности и термостабильности.

Для мономолекулярных реакций, когда только один вид молекул претерпевает превращение и стехиометрический коэффициент в уравнении реакции равен единице, т.е. для реакций вида $AB \rightarrow A + B$ закон действия масс при скорости реакции k позволяет записать

$$\frac{dm}{dt} = k(m - \Delta m). \quad (1.7)$$

Разделив левую и правую части уравнения на m получим

$$\frac{d\eta}{dt} = k(1 - \eta), \quad (1.8)$$

где $\eta = \frac{\Delta m}{m}$ – степень распада (отношение количества разложившегося вещества к его исходному количеству);

$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$, k_0 – константа скорости реакции.

Проведём теоретический анализ и оценим максимальную температуру, при которой распавшееся количество вещества не превысит 2 % от начального при следующих выдержках: 6 часов и двое суток. Сроки выдержки при высоких температурах продиктованы использованием взрывных устройств, спускаемых в скважину на геофизическом кабеле и на НКТ.

Разделяя переменные и интегрируя в пределах $0-\eta$ и $0-t$ из (1.8) получим

$$\int_0^\eta \frac{d\eta}{1-\eta} = k \int_0^t dt \text{ или } -\ln(1-\eta) = kt. \quad (1.9)$$

Из (1.9) получим связь между k и задаваемыми из практики ведения работ временем пребывания взрывного устройства в скважине t и величиной допустимой степени распада η

$$k = -\frac{1}{t} \ln(1-\eta). \quad (1.10)$$

Принимаем $t = 6 \text{ ч} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}$, $\eta = 0,02$. Тогда $k_6 = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, $t = 48 \text{ ч} = 1,76 \cdot 10^5 \text{ с}$, $\eta = 0,02$. Тогда $k_{48} = 1,14 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. При подстановке этих значений в выражение (1.10) для скорости реакции получим

$$10^{-6} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_6}\right) \text{ и } 1,14 \cdot 10^{-7} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{48}}\right). \quad (1.11)$$

Окончательно для максимальной температуры применения данного ВВ в изотермических условиях из (1.11), после логарифмирования, получим

Таблица 1.12

Кинетические характеристики термораспада некоторых ВВ
и расчётные значения максимальных температур

№ п/п	Взрывчатое вещество	Температура плавления, °С	Энергия активации, кДж/моль	$\lg k_0, \text{с}^{-1}$	Макси- мальная $T, ^\circ\text{C}$
1	Тротил	80	144	10,2	209
2	Тринитробензол	122,5	179	10,9	283
3	ГНДС	234	178	12	261
4	Термол	380	200	11,7	320
5	НТФА	346	187	11,5	285

$$T_6 = \frac{E}{2,3R(\lg k_0 + 6)},$$

$$T_{48} = \frac{E}{2,3R(\lg k_0 + 7)}. \quad (1.12)$$

Проведём расчёт максимальной температуры применения ВВ со следующими характеристиками: энергия активации $E = 200$ кДж/моль, $\lg k_0$ (логарифм предэкспонента равен 13 с^{-1}), универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж·(К)⁻¹·кмоль⁻¹.

После подстановки в формулу указанных значений получим $T_6 = 550$ К или $T = 277$ °С и $T_{48} = 523$ К или 250 °С.

Следует учесть, что предэкспонент вычисляются по частоте валентных колебаний конкретного ВВ и его логарифм $\lg k_0$ варьирует в диапазоне от 6,8 до 19 с^{-1} .

В табл. 1.12 приведены кинетические параметры реальных ВВ, определённые в изотермических условиях экспериментальным путём, а также максимальные расчётные температуры.

Выполненные расчёты показывают, что предельные температуры применения взрывных устройств падают с ростом времени нахождения последних в скважинах. Так, увеличение времени нахождения заряда ВВ в скважине с 6-и часов до 2-х суток снизило предельную температуру применения на 27 °С.

1.3. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

1.3.1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Ударные волны представляют большой интерес при изучении механического действия взрыва в различных средах.

К тому же и в распространении детонационных волн по взрывчатому веществу ударные волны играют исключительно важную роль.

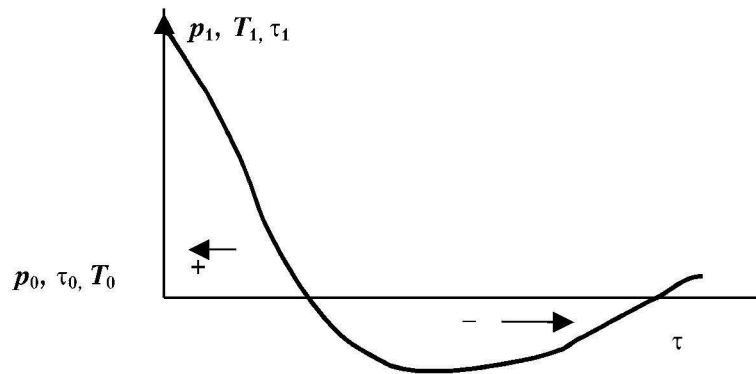


Рис. 1.12. Профиль идеальной ударной волны

Ударная волна — это распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью область сжатия среды с резким скачком величин её давления, плотности и температуры. Сравнительно узкая зона, в которой происходят эти изменения параметров среды, называется фронтом волны.

На рис. 1.12 показан профиль идеальной ударной волны. Стрелкой указано направление её распространения. Параметры среды на фронте УВ мгновенно изменяются от p_0, ρ_0, T_0 до p_1, ρ_1, T_1 . В течение времени $\tau_{сж}$ величины параметров постепенно уменьшаются и достигают своих первоначальных значений p_0, ρ_0, T_0 в точке пересечения кривой давления с осью времени. Далее среда продолжает расширяться и в ней возникает разрежение. Фазы сжатия и разрежения отмечены + и — соответственно. Фронт ударной волны распространяется со скоростью D , превышающей скорость звука в данной среде. В связи с тем, что фронт волны движется со сверхзвуковой скоростью, а её хвостовая часть — со скоростью, близкой к скорости звука, волна по мере распространения имеет тенденцию к растяжению. Среда в фазе сжатия, за фронтом УВ, как будет показано далее, движется в направлении распространения УВ со скоростью u , которая значительно ниже скорости D . В зоне разрежения направление движения среды противоположно направлению распространения ударной волны.

В элементарной теории ударная волна рассматривается как прерывный скачок давления, плотности и температуры.

В действительности же благодаря влиянию теплопроводности и вязкости (внутреннего трения) градиенты параметров состояния не становятся бесконечными и профиль реальной ударной волны приобретает вид, показанный на рис. 1.13, где слой, огра-

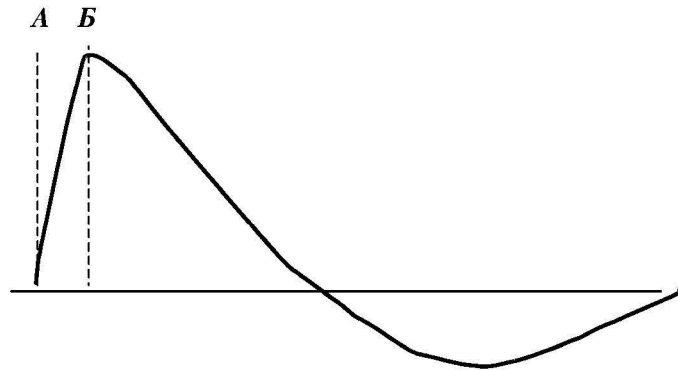


Рис. 1.13. Профиль реальный ударной волны

ниченный плоскостями А и Б представляет собой узкую переходную область.

Ударные волны распространяются практически в любых средах, они способны отражаться от жёстких преград, преломляться и отражаться от границы двух сред с различными акустическими сопротивлениями. Затухание УВ по мере распространения её от места формирования определяется целой совокупностью условий.

1.3.2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Простая схема для вывода уравнений гидродинамической теории ударной волны представлена на рис. 1.14.

Рассмотрим цилиндрическую трубу с площадью внутреннего сечения S и заполненную газом. По газу слева направо распространяется ударная волна со скоростью D относительно неподвижных стенок трубы. Фронт волны совпадает с сечением AB .

Невозмущённое состояние среды справа от сечения AB характеризуется следующими параметрами: ρ_1, p_1, u_1 . За фронтом волны среда мгновенно приобретёт параметры: ρ_2, p_2, u_2 . Скорости u_2 ,

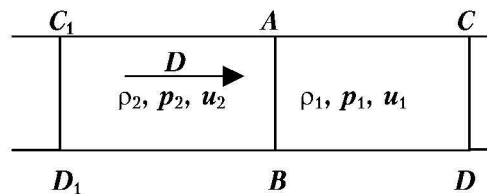


Рис. 1.14. Схема для вывода гидродинамической теории плоской ударной волны

u_1 направлены направо. Относительно системы координат, движущейся со скоростью u_1 , скорость фронта УВ равна $D - u_1$, а скорость потока среды за фронтом будет соответствовать $u_2 - u_1$.

Для того чтобы граница между возмущённым и невозмущённым состоянием среды оставалась неподвижной, необходимо рассмотреть систему координат, которая движется с постоянной скоростью D , то есть она привязана к скачку параметров среды. В такой системе координат невозмущённая среда будет двигаться справа налево со скоростью $-D + u_1$, а возмущённая среда – справа налево со скоростью $-D + u_2$.

Через промежуток времени τ масса газа в невозмущённой среде, прошедшая через границу AB , будет равна $(-D + u_1)\tau S\rho_1$. Эта же масса за фронтом УВ в возмущённой среде может быть выражена как $(-D + u_2)\tau S\rho_2$. Из закона сохранения массы следует

$$\begin{aligned} (-D + u_1)\tau S\rho_1 &= (-D + u_2)\tau S\rho_2 \text{ или} \\ (-D + u_1)\rho_1 &= (-D + u_2)\rho_2. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Для получения связи между разностью давлений в возмущённой и невозмущённой зонах и скоростями движения газа в этих зонах применим второй закон Ньютона

$$F\tau = m(v_2 - v_1), \quad (1.14)$$

где F – сила; τ – время действия силы; m – масса невозмущённого газа, подверженная действию силы.

Для рассматриваемого случая сила направлена справа налево и поэтому в выбранной системе координат

$$F = -(p_2 - p_1)S, \quad (1.15)$$

а масса в этой же системе координат $m = (-D + u_1)\tau S\rho_1$ или с учётом того, что

$$\begin{aligned} (v_2 - v_1) &= [(-D + u_2) - (-D + u_1)] - \\ &- (p_2 - p_1)S\tau = -(D - u_1)\tau S\rho_1 [(-D + u_2) - (-D + u_1)]. \end{aligned}$$

После упрощения получим следующее соотношение

$$(p_2 - p_1) = \rho_1 (D - u_1)(u_2 - u_1). \quad (1.16)$$

При $p_1 = 0$ и $u_1 = 0$ получаем фундаментальное соотношение для скачка давления на фронте волны

$$p_2 = \rho_1 D u_2.$$

Теперь получим соотношение между изменением энергии и

изменением плотности или удельного объёма при переходе системы из невозмущённого в возмущённое состояние. Для этого запишем уравнение сохранения энергии. Обозначим внутреннюю энергию единицы массы среды E . Кинетическую энергию единицы массы $-u^2/2$.

При перемещении разрыва затрачивается работа, равная

$$p_2 S u_2 \tau - p_1 S u_1 \tau.$$

Масса среды, участвующая в движении равна

$$M = (D - u_1) S \tau \rho_1.$$

Отнеся работу к полной массе среды и проведя сокращение числителя и знаменателя на $S\tau$, получим величину затраченной работы на единицу массы среды

$$(p_2 u_2 - p_1 u_1) / (D - u_1) \rho_1. \quad (1.17)$$

Работа сил давления затрачивается на увеличение кинетической энергии единицы массы среды и её внутренней энергии, т.е.

$$(p_2 u_2 - p_1 u_1) / (D - u_1) \rho_1 = (E_2 - E_1) + (u_2^2 / 2 - u_1^2 / 2). \quad (1.18)$$

Заменяя в (1.13) плотность на удельный объём $\rho = 1/v$, получим

$$(D - u_1) / v_1 = (D - u_2) / v_2.$$

Умножив обе части уравнения на $v_1 v_2$, получим следующий вид уравнения

$$(D - u_1) v_2 = (D - u_2) v_1 \quad \text{или}$$

$$D = (u_1 v_2 - u_2 v_1) / (v_2 - v_1).$$

Вычтем из левой и правой части u_1 и после преобразования будем иметь

$$D - u_1 = v_1 (u_2 - u_1) / v_1 - v_2 \quad \text{или}$$

$$(D - u_1) / v_1 = (u_2 - u_1) (v_1 - v_2). \quad (1.19)$$

С другой стороны, из (1.16) после замены плотности на удельный объём получим

$$(D - u_1) / v_1 = (p_2 - p_1) / (u_2 - u_1). \quad (1.20)$$

Сравнивая (1.19) и (1.20) получим

$$(p_2 - p_1)/(u_2 - u_1) = (u_2 - u_1)/(v_1 - v_2) \text{ или}$$

$$(u_2 - u_1)^2 = (p_2 - p_1)(v_1 - v_2).$$

Тогда

$$u_2 - u_1 = [(p_2 - p_1)(v_1 - v_2)]^{0.5}. \quad (1.21)$$

Из (1.19) следует

$$(u_2 - u_1) = (D - u_1)(v_1 - v_2)/v_1. \quad (1.22)$$

Приравнивая правые части уравнений (1.21) и (1.22) получаем выражение для определения скорости ударной волны

$$D - u_1 = v_1 [(p_2 - p_1)/(v_1 - v_2)]^{0.5}. \quad (1.23)$$

Используем уравнения (1.19) и (1.23) для преобразования уравнения баланса энергии.

Из уравнения баланса энергии изменение внутренней энергии единицы массы среды будет соответствовать (см. 1.18)

$$E_2 - E_1 = (p_2 u_2 - p_1 u_1)/(D - u_1) \rho_1 - (u_2^2/2 - u_1^2/2) \quad (1.24)$$

$(D - u_1) \rho_1$ заменим в соответствии с (1.20) на $(p_2 - p_1)/(u_2 - u_1)$ и получим

$$E_2 - E_1 = (p_2 u_2 - p_1 u_1)(u_2 - u_1)/(p_2 - p_1) - (u_2^2/2 - u_1^2/2).$$

Последнее уравнение преобразуем к виду

$$E_2 - E_1 = 0,5(u_2 - u_1)[2(p_2 u_2 - p_1 u_1)/(p_2 - p_1) - (u_2 - u_1)]. \quad (1.25)$$

Выражение в квадратных скобках после элементарных преобразований примет следующий вид

$$(p_2 + p_1)(u_2 - u_1)/(p_2 - p_1).$$

Подставим в (1.25) и получим

$$E_2 - E_1 = 0,5(u_2 - u_1)^2(p_2 + p_1)/(p_2 - p_1)$$

или окончательно

$$E_2 - E_1 = 0,5(p_2 + p_1)(v_1 - v_2). \quad (1.26)$$

Это и есть уравнение Гюгонио.

Для идеального газа и в общем случае среды, подчиняющейся политропическому закону $pV^k = \text{const}$, имеем $E = pv/(k - 1)$, где $k = Cp/Cv$ — отношение теплоёмкостей при постоянном давлении и постоянном объёме.

$$E_1 = p_1 v_1 / (k_1 - 1) \text{ и } E_2 = p_2 v_2 / (k_2 - 1). \quad (1.27)$$

Выведем уравнение ударной адиабаты. Для этого в уравнение Гюгонио (1.26) подставим значения внутренней энергии из (1.27)

$$[p_2 v_2 / (k_2 - 1) - p_1 v_1 / (k_1 - 1)] = 0,5(p_2 + p_1)(v_1 - v_2). \quad (1.28)$$

Для не очень сильных ударных волн можно принять с небольшой погрешностью $k_1 = k_2 = k$.

Тогда (1.27) можно записать в виде

$$p_2 v_2 / (k - 1) - p_1 v_1 / (k - 1) = 0,5(p_2 + p_1)(v_1 - v_2).$$

Проведя элементарные преобразования получим

$$p_2 / p_1 = [(k + 1)\rho_2 - (k - 1)\rho_1] / [(k + 1)\rho_1 - (k - 1)\rho_2] \text{ и} \quad (1.29)$$

$$\rho_2 / \rho_1 = v_1 / v_2 = [(k + 1)p_2 + (k - 1)p_1] / [(k + 1)p_1 + (k - 1)p_2]. \quad (1.30)$$

Уравнения (1.29) и (1.30) носят название ударной адиабаты или адиабаты Гюгонио.

Эта адиабата, отражая закон сохранения энергии, является аналогом обычной адиабаты и справедлива для ударных волн, распространяющихся в политропных средах.

На рис. 1.15 представлены адиабаты Пуассона (1) и Гюгонио (2).

Как следует из рисунка, адиабата Гюгонио имеет более крутой подъём по оси ординат.

Представим (1.30) в виде

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{[(k + 1)p_2 + (k - 1)p_1]}{[(k + 1)p_1 + (k - 1)p_2]}.$$

При неограниченном возрастании скачка давления ($p_2/p_1 \rightarrow \infty$) отношение плотностей газа после и до скачка стремится к конечному пределу, равному $(k + 1)/(k - 1)$. Этот результат является следствием необратимости процесса адиабатного сжатия газа ударной волной, сопровождающегося диссипацией энергии и возрастанием энтропии.

Выведенные нами соотношения для ударных волн могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= [(p_2 - p_1) \cdot (v_1 - v_2)]^{0,5}; \\ D - u_1 &= v_1 [(p_2 - p_1) / (v_1 - v_2)]^{0,5}; \\ E_2 - E_1 &= 0,5(p_2 + p_1) \cdot (v_1 - v_2); \\ p &= f(\rho, E). \end{aligned} \quad (1.31)$$

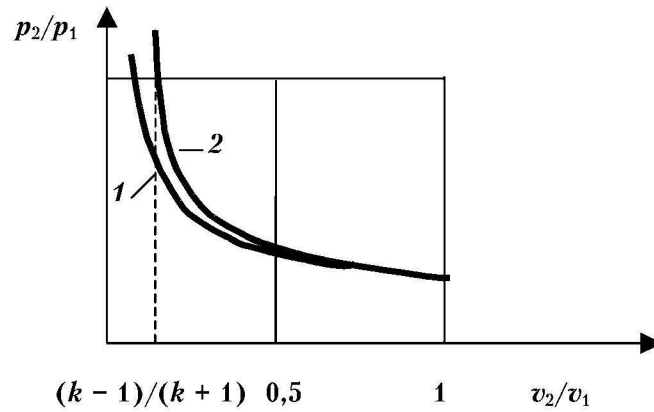


Рис. 1.15. Адиабаты Пуассона (1) и Гюгонио (2)

В этой системе 4-х уравнений имеется 5 основных неизвестных:

$$p_2, u_2, v_2, D, E_2.$$

Задаваясь одним каким-либо параметром УВ, имеется возможность найти все остальные.

1.3.3. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

На рис. 1.16 приведена ударная адиабата вещества, начальное состояние которого $p_1 V_1$. При ударном сжатии состояние этого вещества скачком изменилось до $p_2 V_2$. Уравнение прямой 2, связывающее давление, удельные объёмы и скорость детонации, в соответствии с выведенным из закона сохранения количества движения уравнением, имеет вид

$$D^2 = V_1^2 (p_2 - p_1) / (V_1 - V_2).$$

Чем круче прямая 2, тем больше скорость детонации. Преобразуем представленное уравнение к виду

$$p_2 = p_1 + \frac{D^2 (V_1 - V_2)}{V_1^2}. \quad (1.32)$$

Это уравнение описывает прямую Михельсона, которая является касательной в точке M к адиабате продуктов взрыва (кри-

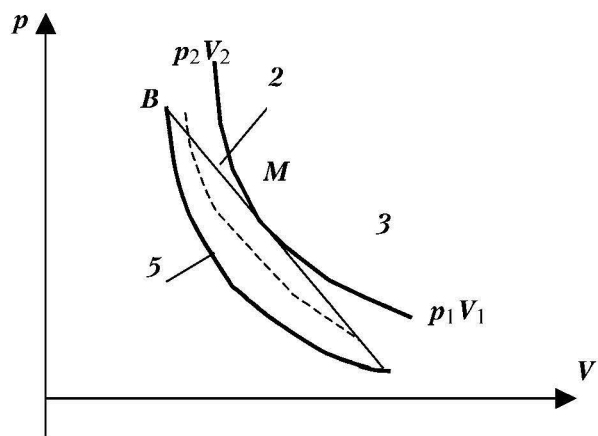


Рис. 1.16. Ударная адиабата вещества (5). Прямая 2, описываемая уравнением (1.32), она же прямая Михельсона. 3 – ударная адиабата продуктов взрыва. Точка M – точка Жуге

вая 3). Точка M называется точкой Жуге. В этой точке завершается реакция в детонационной волне и завершается выделение тепла в ходе этой реакции.

Участок BM соответствует промежуточным адиабатам, характерным для незавершившихся реакций. Давление в точке Жуге

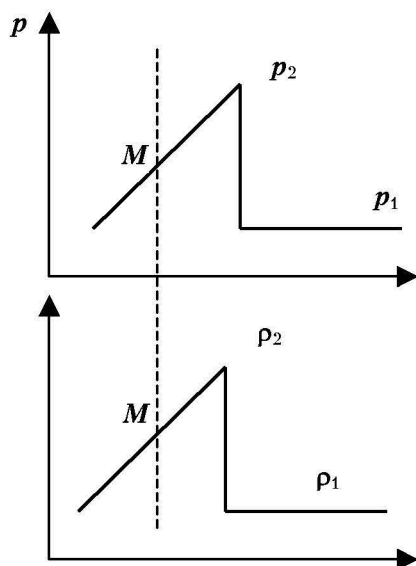


Рис. 1.17. Распределение давления p и плотности ρ в детонационной волне

будет приблизительно в 2 раза меньше давления на фронте детонационной волны, поскольку продукты детонации успевают расшириться. Участок от момента ударного сжатия (точка B) до завершения реакции называется химическим пиком.

На рис. 1.17 показано распределение давления и плотности в детонационной волне, в том числе в точке Жуге (M).

Адиабата продуктов взрыва смещена в результате выделения тепла при химической реакции. Точка M лежит на адиабате Гюгонио для конечных продуктов детонации и является особой точкой, в которой энтропия постоянна, а скорость детонации равна сумме скоростей движения продуктов взрыва — u и местной скорости звука в продуктах взрыва — c , $D = u + c$.

1.3.4. ОТРАЖЕНИЕ ОТ АБСОЛЮТНО ЖЁСТКОЙ СТЕНКИ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН. АКУСТИЧЕСКИЙ ПАРАДОКС

Задачи распространения слабых ударных волн в средах решаются в предположении постоянства энтропии. Такой подход к постановке задачи называется методом акустического приближения. Одним из главных допущений этого метода является констатация постоянства скорости распространения возмущений. Рассмотрим случай отражения слабой ударной волны от абсолютно жёсткой стенки. В определённый момент времени плоская ударная волна, распространяющаяся со скоростью D , падает на жёсткую стенку в точке O . При этом фронт волны составляет с жёсткой стенкой угол α . За фронтом волны среда приобретает скорость v . Нормальная составляющая этой скорости к жёсткой стенке равна $v \cos \alpha$. На самой жёсткой стенке нормальная составляющая скорости должна быть равна нулю. Это может реализоваться только в том случае, когда в точке O возникнет ещё один фронт волны такой интенсивности и направленный таким образом, что он вызовет движение среды за фронтом с такой же величиной нормальной составляющей скорости, но направленной строго противоположно $v \cos \alpha$. Применительно к изображённой на рис. 1.18 схеме будет выполняться равенство $v \cos \alpha = v^* \cos \alpha^*$.

В случае малых возмущений как прямая, так и отражённая волна будут распространяться с одинаковой скоростью D , равной скорости звука. Тогда скорость перемещения точки O вдоль луча OA должна быть равна $D/\sin \alpha$, а вдоль луча OB — $D/\sin \alpha^*$ или $D/\sin \alpha = D/\sin \alpha^*$.

Из этого равенства следует известный закон акустического отражения: $\alpha = \alpha^*$. В свою очередь из этого равенства следует равенство массовых скоростей $v = v^*$. А поскольку давление на фронте ударной волны равно $p = \rho Dv$, то в силу равенства v и v^* давление на жёсткой стенке независимо от угла падения прямой

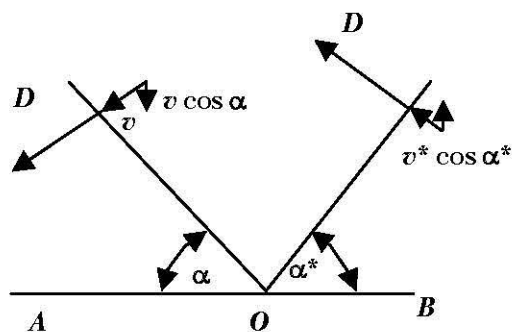


Рис. 1.18. Схема отражения волны от абсолютно жёсткой стенки

волны будет равно $2\rho Dv$ или удвоенному давлению на фронте падающей ударной волны. В этом и состоит так называемый акустический парадокс. При значении угла α , равном 90° отражение волны не происходит, волна скользит вдоль стенки и давление на стенке равно $p = \rho Dv$.

1.3.5. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Если акустическая волна отражается не от абсолютно жёсткой стенки, а от границы раздела двух сжимаемых сред, то необходимо рассматривать не только отражённую волну, но и преломлённую. Последняя распространяется вглубь второй среды, граничащей с первой и образующей границу. На рис. 1.19 представлена схема отражения и преломления прямой ударной волны. Скорость перемещения точки O по поверхности раздела двух сред будет, как и в предыдущем случае, соответствовать следующему соотношению

$$D/\sin\alpha = D/\sin\alpha^* = D^{**}/\sin\alpha^{**}, \quad (1.33)$$

где α^* – угол отражённой волны; α^{**} – угол преломлённой волны; D^{**} – скорость звука в среде, в которой распространяется преломлённая волна. Здесь также сохраняется равенство углов падения и отражения, то есть $\alpha = \alpha^*$. В то же время из (1.33) следует закон Снеллиуса для направления преломлённой волны:

$$D/D^{**} = \sin\alpha/\sin\alpha^{**}. \quad (1.34)$$

Этот закон регламентирует направление преломлённой волны при известных значениях направления падающей на границу двух сред волны и соотношения скоростей звука в первой и второй средах.

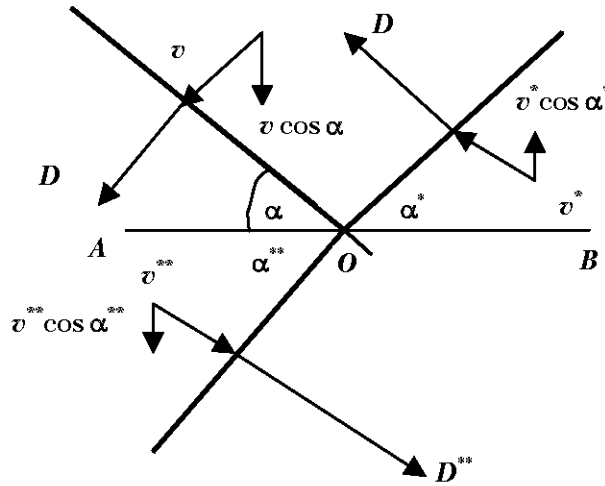


Рис. 1.19. Схема преломления и отражения ударной волны

На поверхности раздела должно выполняться условие непрерывности давления и массовой скорости за фронтом ударной волны:

$$p + p^* = p^{**}, \quad (1.35)$$

$$v \cos \alpha - v^* \cos \alpha^* = v^{**} \cos \alpha^{**}. \quad (1.36)$$

Для величин давлений на фронте волн можно записать известные выражения

$$p = \rho D v; \quad p^* = \rho D v^*; \quad (1.37)$$

$$p^{**} = \rho^{**} D^{**} v^{**}.$$

Выражая скорости из (1.37) и подставляя их в (1.36) получим

$$p/\rho D - p^*/\rho D = p^{**} \cos \alpha^{**} / \rho^{**} D^{**} \cos \alpha.$$

или

$$p - p^* = \frac{p^{**} \rho D \cos \alpha^{**}}{\rho^{**} D^{**} \cos \alpha}.$$

Исходя из условия

$$p^{**} = p + p^*,$$

получим

$$\frac{p^{**}}{p} = \frac{2\rho^{**}D^{**}\cos\alpha}{\rho^{**}D^{**}\cos\alpha + \rho D\cos\alpha^{**}}, \quad (1.38)$$

$$\frac{p^*}{p} = \frac{\rho^{**}D^{**}\cos\alpha - \rho D\cos\alpha^{**}}{\rho^{**}D^{**}\cos\alpha + \rho D\cos\alpha^{**}}. \quad (1.39)$$

При падении волны по нормали к поверхности раздела двух сред формулы (1.38) и (1.39) принимают простой вид

$$\frac{p^{**}}{p} = \frac{2\rho^{**}D^{**}}{\rho^{**}D^{**} + \rho D}, \quad (1.40)$$

$$\frac{p^*}{p} = \frac{\rho^{**}D^{**} - \rho D}{\rho^{**}D^{**} + \rho D}. \quad (1.41)$$

Соотношения 1.40 и 1.41 позволяют сделать ряд важных выводов:

1. При отражении ударной волны, распространяющейся в воде, от среды, акустическое сопротивление которой меньше акустического сопротивления воды, возникает волна разрежения ($p^*/p < 0$). Давление на фронте преломлённой волны при этом меньше чем давление на фронте прямой. Результирующее давление на границе раздела также меньше, чем давление на фронте прямой волны.

2. При отражении той же ударной волны от среды, акустическое сопротивление которой больше акустического сопротивления воды, отражённая волна будет волной сжатия и давление на фронте преломлённой волны будет больше, чем давление на фронте прямой.

1.3.6. ПРЕДЕЛЬНЫЙ И КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТРЫ ВВ

Основным условием устойчивости детонационного процесса в конденсированных ВВ является как можно более полная передача выделяющейся энергии химической реакции на фронт детонации. Как уже отмечалось, выделяющаяся энергия передаётся на фронт детонации из продуктов детонации до определённого падения давления в них. Кроме того, не любые образующиеся продукты детонации обладают способностью передавать выделяющуюся энергию на фронт детонации. Следовательно, комплекс условий, в которых находится данное взрывчатое вещество, способен определять саму возможность протекания устойчивой детонации. Для зарядов ВВ удлиненной формы, не имеющих до-

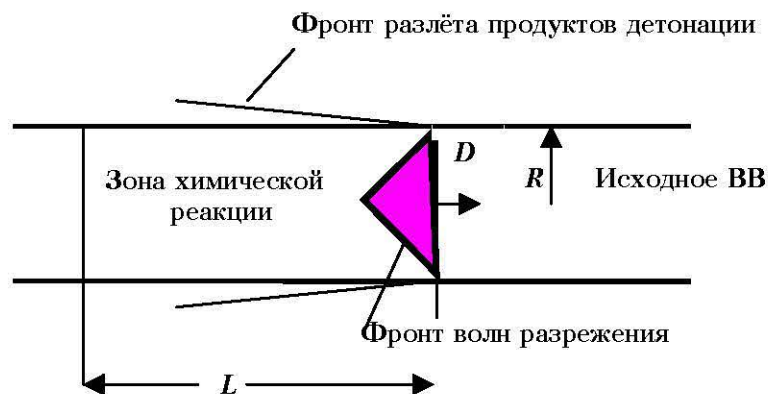


Рис. 1.20. Схема ситуации в цилиндрическом открытом заряде ВВ при детонации. Стрелкой указано направление детонации, R – радиус заряда ВВ, L – протяжённость зоны химической реакции.

статочной прочной оболочки, существуют понятия предельного и критического диаметра. Распространение детонации в таких зарядах сопровождается разлётом продуктов детонации с боковой поверхности и возникновением волн разрежения, которые проникают в зону химического превращения. Волны разрежения не только ускоряют снижение давления в продуктах детонации, но и лишают их специфических свойств, ответственных за передачу выделяющейся энергии на фронт детонации.

Фактически очень трудно установить, до какого предельного расширения продуктов детонации выделившаяся энергия будет передаваться на фронт детонации. В первом приближении оценку можно сделать, предполагая что продукты детонации полностью сохраняют свои свойства в объёме конуса, образованного фронтом детонации и боковой поверхностью, сформированной волнами разрежения, достигшими оси заряда ВВ. На рис. 1.20 приведена схема ситуации возникающей в цилиндрическом открытом заряде ВВ при детонации.

Время протекания химической реакции τ_1 и время прохождения волной разрежения расстояния от поверхности заряда до его оси τ_2 могут быть определены как

$$\tau_1 = \frac{L}{D} \text{ и } \tau_2 = \frac{R}{C},$$

где L – ширина зоны превращения; R – радиус цилиндрического заряда ВВ; D – скорость детонации; C – скорость волны разрежения, равная скорости звука в продуктах детонации.

Если $\tau_1 > \tau_2$, то ускоренное расширение продуктов детонации начнётся раньше, чем химическая реакция полностью завершится. Это приведёт к тому, что только малая часть выделившейся энергии пойдёт на поддержание фронта детонации. Следствием этого может быть снижение скорости детонации или полное затухание её. Именно такая ситуация изображена на рисунке.

Минимальный или предельный диаметр заряда, при котором ещё сохраняется скорость детонации такой же, как и в заряде большого диаметра, может быть получен для заряда без оболочки из условия $\tau_1 = \tau_2$ или $\frac{L}{D} = \frac{R}{C}$. Из теории детонации следует

$C = \frac{D}{2}$. Поэтому $L = 2R$ или предельный диаметр $d_{пр} = L$.

На рис. 1.21 представлена схема детонации открытого цилиндрического заряда, диаметр которого равен предельному.

Центральная зона продуктов детонации, в которую ещё не проникли волны разрежения, обеспечивает энергией центральную зону профиля детонации и поэтому она будет иметь скорость D . Остальные элементы волны, расположенные ближе к боковой поверхности заряда и частично уже охваченные волнами разрежения, будут иметь более низкую скорость. Это приведёт к искривлению профиля фронта детонационной волны, как это показано на рис. 1.21.

По мере уменьшения диаметра заряда ниже величины $d_{пр}$ будет уменьшаться как сам конус, так и объём продуктов детонации, заключённый в нём. Это приведёт к уменьшению скорости детонации, пока при некотором критическом диаметре $d_{кр}$ она не достигнет определённого минимального значения $D_{мин}$. Это значение является пределом устойчивой детонации в данном ВВ.

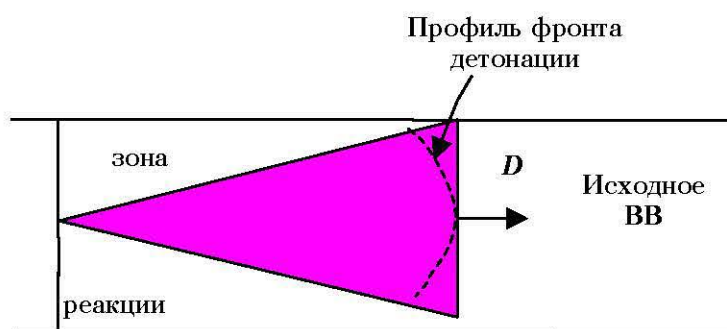


Рис. 1.21. Схема детонации открытого цилиндрического заряда, диаметр которого равен предельному

Чем больше скорость детонации данного взрывчатого вещества и, следовательно, меньше зона химической реакции, тем должны быть меньше предельный и критический диаметры заряда. Помещение заряда ВВ в прочную оболочку также способствует уменьшению означенных диаметров. Однако даже для практически недеформируемых оболочек существует критический диаметр, при котором детонация не будет распространяться в самых мощных ВВ. Так, попытки взорвать жидкие ВВ после закачки их в поровые каналы породы, сжатой горным давлением, оказались безуспешными. В этом случае приходится иметь дело с диаметрами поровых каналов, не превышающими десятых долей миллиметра, и высокой извилистостью.

1.4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для углублённого понимания взрывных процессов требуется регистрировать реальную скорость детонации конкретного взрывчатого вещества, фиксировать скорость распространяющихся в окружающих средах ударных волн, измерять давление и импульс ударных волн, контролировать динамику процесса формирования кумулятивных струй и т.п.

Методика регистрации скоростей детонации и ударных волн в настоящее время разработана на достаточно высоком уровне. Все используемые для этих целей приборы можно подразделить на три группы. К первой группе относятся хронографы и осциллографы, служащие для измерения коротких промежутков времени. Они с большой точностью регистрируют промежуток времени, в течение которого исследуемый процесс проходит через две или большее число точек, фиксированных на известном расстоянии друг от друга. При этом определяется средняя скорость процесса (детонации или ударной волны).

Ко второй группе принадлежат оптические приборы. Регистрация быстротекущих процессов этими приборами основана на фотографической фиксации световых эффектов от самого процесса. В тех случаях, когда собственное свечение отсутствует или оно не представляет интереса, фотографируются изменения светового потока от внешнего дополнительного источника света, пронизывающего окружающую заряд среду.

Оптические методы позволяют определять не только среднюю скорость процесса, но и мгновенную. При достаточно мощной подсветке можно контролировать распространение ударных волн в воздухе и прозрачных жидкостях, базируясь на том факте, что

в ударной волне коэффициент преломления жидкости претерпевает значительные изменения. При установке в фоторегистратор многорядных растров можно осуществлять покадровую регистрацию взрывных процессов.

Третья группа представлена рентгеноимпульсными установками, позволяющими исследовать процессы пробивания прочных мишеней, в том числе металлических, кумулятивными струями или высокоскоростными снарядами. Мощное рентгеновское излучение способно просветить массивный цилиндр диаметром в полтора-два десятка сантиметров и зафиксировать на фотоплёнке текущее состояние пробиваемого канала. Несколько рентгеновских трубок, срабатывающих через заданные промежутки времени, дают возможность изучать динамику пробития.

1.4.1. ХРОНОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ

Метод Дотриша. Этот метод несмотря на его простоту является незаменимым при определении скорости детонации в снаряженном боеприпасе. Измерение основано на сравнении определяемой скорости детонации с известной и стабильной скоростью детонации в детонирующем шнуре. Детонирующий шнур в этом случае играет роль хронографа. Для реализации метода необходимо следующее оборудование:

- свинцовая пластина толщиной 1 см и длиной не менее 15 см;
- детонирующий шнур с известной скоростью детонации длиной порядка 1 метра;
- детонатор или взрывной патрон и собственно само снаряженное устройство или изделие из взрывчатого вещества.

Если взрывчатое вещество представляет собой жидкость, то понадобится ещё трубка диаметром более 1 см и длиной более 20 см. Перед заполнением трубки жидким ВВ в стенке трубки просверливают отверстия по одной образующей на расстоянии не менее 15 см друг от друга. В эти отверстия вставляют концы отрезка детонирующего шнура, герметизируют зазоры между шнуром и поверхностью отверстия в трубке. Закрепляют трубку в вертикальном положении, заливают взрывчатое вещество. Среднюю часть отрезка шнура закрепляют на свинцовой пластине и на ней ставят метку, точно совпадающую с серединой отрезка детонирующего шнура. На схеме рис. 1.22 середине отрезка шнура соответствует точка P_1 . При инициировании взрыва детонационная волна будет распространяться в двух направлениях: от точки A по шнуру к свинцовой пластине и от точки A через исследуемый заряд и детонирующий шнур к свинцовой пластине.

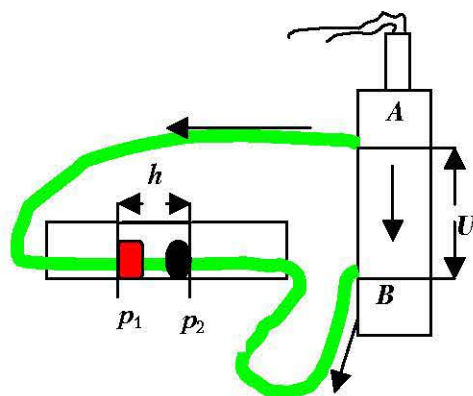


Рис. 1.22. Схема определения скорости детонации по методу Дотриша для жидких ВВ

Так как детонационная волна, распространяющаяся от точки А сразу по детонирующему шнуру, достигнет свинцовой пластины быстрее по сравнению с детонационной волной, распространяющейся сначала по исследуемому взрывчатому веществу и только потом по детонирующему шнуру, то место встречи волн сместится вправо в точку P_2 . Это место встречи будет отмечено на свинцовой пластине значительной остаточной деформацией, вследствие сложения давлений на фронте встречных детонационных волн.

Выполненное таким образом исследование даёт возможность определить скорость детонации в жидком или твёрдом ВВ, размещённом в трубке или корпусе АВ.

При известной скорости детонации шнура $D_{ш}$ время прохождения фронта детонации по пути AP_1P_2 до места встречи волн равно

$$T_1 = \frac{L}{2D_{ш}} + \frac{h}{D_{ш}}, \quad (1.42)$$

где L – длина шнура; h – расстояние между метками на свинцовой пластине.

Если скорость детонации испытуемого заряда равна D , то время прохождения детонации по пути ABP_2 равно

$$T_2 = \frac{U}{D} + \frac{L}{2D_{ш}} - \frac{h}{D_{ш}}, \quad (1.43)$$

где U – расстояние между точками подсоединения шнура к испытуемому ВВ.

Поскольку $T_1 = T_2$, имеем

$$\frac{h}{D_{\text{ш}}} = \frac{U}{D} - \frac{h}{D_{\text{ш}}}, \text{ откуда } D = \frac{UD_{\text{ш}}}{2h}. \quad (1.44)$$

Точность этого метода зависит, конечно, от постоянства скорости детонации как шнура, так и испытуемого ВВ. Кроме того, большую ошибку может внести даже малая погрешность при измерении величин h и U .

Максимальная относительная ошибка определения скорости детонации по методу Дотриша определяется обычным образом

$$d \ln D = d \ln U + d \ln D_{\text{ш}} + d \ln h. \quad (1.45)$$

Дифференцируя, получим

$$\frac{dD}{D} = \left(\frac{dU}{U} + \frac{dD_{\text{ш}}}{D_{\text{ш}}} + \frac{dh}{h} \right). \quad (1.46)$$

Скорость детонации детонирующего шнура определяется с точностью 2 %. Расстояние U измеряется с точностью до 0,5 %. Расстояние h между двумя метками на свинцовой пластине, из-за размытости метки p_2 можно определить только с точностью до 2 %.

Следовательно, максимальное значение относительной ошибки при определении скорости детонации этим методом равно

$$\frac{dD}{D} = \pm (2 + 0,5 + 2) \% = 4,5 \%. \quad (1.47)$$

1.4.2. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Формирование кривой путь–время, дифференцированием которой получают скорость протекания процессов, осуществляется движением фотоплёнки или развёрткой свечения вращающимся зеркалом.

В узкоплёночном фоторегистраторе плёнка движется с большой скоростью, что позволяет фотографировать процесс со скоростью нескольких тысяч кадров в секунду. В тех случаях, когда быстропротекающий процесс синхронизируют со съёмкой, можно получить и более высокие скорости регистрации процесса, предварительно разогнав перемотку плёнки до больших скоростей. В таких случаях достигают скорости до 10 тысяч кадров в секунду. Дальнейшее увеличение скорости перемотки плёнки становится проблематичным из-за ограниченной прочности плёнки.

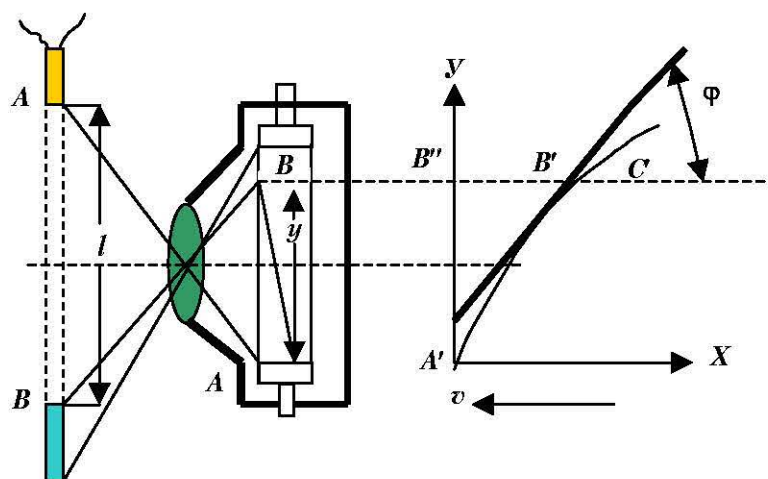


Рис. 1.23. Барабанный фоторегистратор

Большую скорость развёрстки можно получить на барабанном фоторегистраторе. Схема барабанного фоторегистратора и принцип образования кривой путь – время показаны на рис. 1.23. Основными частями фоторегистратора являются барабан с двигателем, объектив и плёнка, которая крепится на наружной поверхности барабана. Скорость вращения барабана регистрируется различными способами. Среди них: электронный, основные элементы которого – магнит на валу барабана и неподвижная катушка. Движущийся магнит проходя мимо катушки наводит в ней эдс. Электрический импульс поступает в электронное считывающее устройство.

Кривая путь – время образуется следующим образом. Допустим детонационная волна прошла к данному моменту времени участок AB . Для упрощения рассуждений предположим, что фронт детонации представляет собой светящуюся точку. При неподвижном барабане светящаяся точка экспонирует на плёнке прямую $A'B''$, параллельную образующей барабана. Если плёнка будет двигаться со скоростью v в направлении, перпендикулярном фронту детонации, то на плёнке экспонируется некоторая кривая $A'B'C'$. В случае постоянства скорости детонации, т.е. мгновенной стабилизации её без разгонного участка, и постоянства скорости вращения барабана, кривая $A'B'C'$ представит собой прямую линию. Кривая $A'B'C'$ (или прямая) и представляет собой в определённом масштабе запись путь – время для детонации или взрыва заряда. Фронт детонации представляет собой не

светящуюся точку, но несколько размытую зону с послесвечением продуктов детонации. Поэтому для уменьшения такого эффекта необходимо уменьшить ширину светящегося при детонации пятна. Этого добиваются путём ограничения пятна с помощью щели, параллельной оси заряда ВВ. Наиболее рациональное размещение щели – внутри фоторегистратора перед барабаном, параллельно образующей последнего.

Скорость детонации в каждом сечении заряда на расстоянии l от детонатора или начала заряда (точка A) равна

$$D = \frac{dl}{dt}.$$

Проекция на плёнку сработавшей части заряда ВВ будет равна $A'B''$ или согласно рис. 1.23

$$Y = \beta l \quad dl = d\left(\frac{Y}{\beta}\right).$$

где β – коэффициент увеличения прибора (как правило $\beta < 1$).

Перемещение плёнки за счёт вращения барабана с постоянной скоростью будет равно

$$X = v t, \text{ откуда } dt = d\left(\frac{x}{v}\right).$$

Подставляя значения dl и dt в выражение для D и учитывая, что β и v постоянные величины, получим

$$D = \frac{v}{\beta} \frac{y}{x} = \frac{v}{\beta} \operatorname{tg} \varphi \quad \text{и} \quad v = 2\pi r n, \text{ или } v = \omega r, \quad (1.48)$$

где φ – угол наклона касательной к кривой путь – время; r – радиус барабана; n – число оборотов барабана в единицу времени; ω – угловая скорость.

К недостаткам фоторегистраторов с движущейся фотоплёнкой следует отнести недостаточную для регистрации скорости детонации, линейную скорость плёнки и очень малый коэффициент увеличения β . Для большинства барабанных развёрсток коэффициент увеличения

$$\beta = 0,05-0,25,$$

и поэтому процесс, идущий по заряду на участке 100 мм, фиксируется на плёнке в виде экспонированного участка протяжённостью всего 5–25 мм.

Что касается максимально допустимой линейной скорости плёнки, то при скоростях, превышающих 100 м/с, начинает деформироваться эмульсионный слой под действием центробежной силы.

Максимальная относительная ошибка определения скорости процесса равна

$$\frac{dD}{D} = \left(\frac{d\beta}{\beta} + \frac{dr}{r} + \frac{d\omega}{\omega} + 2 \frac{d\varphi}{\sin 2\varphi} \right). \quad (1.49)$$

На точность определения скорости детонации наибольшее влияние оказывает ошибка при определении угла φ .

Минимальная ошибка измерения скорости процесса будет при выполнении условия

$$\frac{D\beta}{v} = 1, \text{ то есть при значении угла } \varphi = 45^\circ.$$

Выполнить это условие практически не реально. Действительно, при $D = 7000$ м/с и $v = 100$ м/с условие выполняется, если $\beta = \frac{1}{70}$, что неприемлемо из-за необходимости при испытаниях использовать очень длинные заряды (более 2 м).

Этот анализ позволят сделать заключение о том, что барабанные развёртки можно применять только для сравнительно медленных процессов, например горения.

Приемлемые значения $\beta = \frac{1}{2} - \frac{1}{4}$ и $\varphi = 45^\circ$ выполняются при $v \approx 1000$ м/с.

Такая развёртка может быть получена на фоторегистраторах с вращающимся зеркалом, посредством которого изображение светящегося объекта проецируется на неподвижную фотоплёнку. Основными блоками таких фоторегистраторов являются оптическая система, блок синхронизации, высокоскоростной затвор и система развёртки.

Оптическая система (рис. 1.24) состоит из двух линз с общей фокальной плоскостью. Такая система при использовании светосильных и длиннофокусных объективов в качестве линз позволяет получить большой радиус развёртки (т.е. расстояния от зеркала до фотоплёнки) и достаточно освещённое изображение на плёнке. Кроме того, сам заряд ВВ может быть расположен достаточно далеко от прибора. Использование такой оптической системы имеет ещё одно преимущество, состоящее в том, что между дорогостоящей оптикой и зарядом ВВ может быть установлено бронестекло (что и делается всегда), защищающее прибор от осколков и ударных волн.

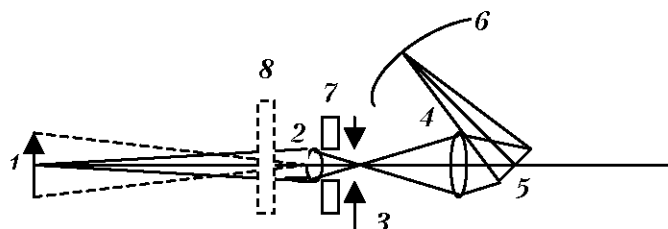


Рис. 1.24. Схема прибора с зеркальной развёрткой, защитой от осколков и УВ:

1 – заряд ВВ; 2, 4 – объективы; 3 – щель; 5 – одностороннее зеркало с зачерненной обратной стороной; 6 – фотоплёнка; 7 – скоростной синхронизированный затвор; 8 – бронестекло

Щель, помещённая в общей фокальной плоскости объективов, служит для ограничения ширины изображения. Зеркало имеет поверхностный отражающий слой и изготавливается из металла с тем, чтобы исключить прогиб его при очень высоких скоростях вращения.

Зеркало закреплено на оси электродвигателя, скорость вращения которого может регулироваться в широком диапазоне. Узел синхронизации обеспечивает совмещение начала взрыва с определённым положением зеркала относительно фотоплёнки, открытием и закрытием затвора. Роль последнего состоит в исключении повторного экспонирования плёнки. Подрыв заряда ВВ производится в тот момент, когда проецируемое на плёнку изображение находится в самом начале плёнки. Команда на открытие затвора подаётся раньше. Затвор начинает закрываться после поворота зеркала на 60° .

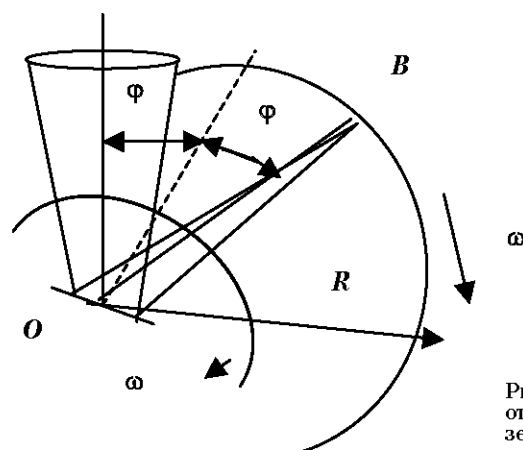


Рис. 1.25. Отражённый луч ОВ от плоского вращающегося зеркала

Линейная скорость развёртки v определяется следующим образом (рис. 1.25).

$$\text{Угловая скорость вращения зеркала } \omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Угловая скорость вращения отражённого луча (OB)
 $\omega_1 = \frac{2d\varphi}{dt} = 2\omega$. Линейная скорость отражённого луча $v = 2\omega R$,
 где R – радиус развёртки. Формула для скорости, аналогичная полученной для барабанной развёртки, переписывается следующим образом:

$$D = \frac{4\pi R n}{\beta} \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.50)$$

где φ – угол наклона касательной к кривой путь – время; $\frac{4\pi R}{\beta}$ – постоянная прибора. Обозначая её через C , получим $D = C n \operatorname{tg} \varphi$.

Если радиус развёртки $R = 0,2$ м, то при скорости вращения зеркала $n = 30000$ об/мин $= 500$ об/с, $v = 1256$ м/с. Для того чтобы $\operatorname{tg} \varphi = 1$, при регистрации скоростей порядка 7000 м/с, необходимо чтобы выполнялось условие $\beta \leq 0,2$. Такому условию соответствует длина заряда 150 мм.

Если перед фотоплёнкой устанавливается 2- или 4-рядный растр, то при достаточной подсветке будет получена покадровая съёмка процесса. Конструкция растра состоит из дугового каркаса, на котором укреплены линзы, диаметр которых составляет $0,5$ или $0,25$ ширины эмульсионного слоя фотоплёнки. Линзы дополнительно уменьшают проецируемое на плёнку изображение в 2–4 раза. В растре линза выполняет роль как объектива, так и затвора. Последний эффект связан с высокоточным изготовлением растра и способностью любой из растровых линз пропускать через себя изображение только в случае совпадения оптической оси линзы с оптической плоскостью вращающегося зеркала. Оптическая ось каждой линзы сдвинута относительно соседней на малый угол. Поэтому в любой момент времени только одна линза проецирует изображение на фотоплёнку. На рис. 1.26 показана последовательность проецирования изображения на плёнку через 2-рядный растр.

При покадровой съёмке быстропротекающего процесса применять для подсветки можно только очень интенсивные источники. И это даже несмотря на использование специальных фотоплёнок очень высокой чувствительности. Автор настоящей монографии применял для подсветки достаточно мощный взрыв, с помощью которого в трубе диаметром 40 см и длиной 1 м создавалась ударная волна. Распространяющаяся в воздухозапол-

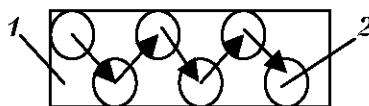


Рис. 1.26. Последовательность проецирования изображения через 2-рядный растр на фотоплёнку:
1 – фотоплёнка, 2 – линза

ненной трубе ударная волна светится очень интенсивно, что и обеспечивает нормальную освещённость быстротекущего процесса (срабатывание кумулятивного заряда в заполненном водой аквариуме).

1.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ИМПУЛЬСА УДАРНЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ВОЗДУХЕ ИЛИ ЖИДКОСТЯХ

Приборы для измерения импульсов УВ должны иметь периоды собственных колебаний на порядок и более, превосходящий время действия ударной волны. В противном случае приборы будут измерять лишь неопределённую часть импульса. Приборы для измерения давлений, наоборот, должны иметь период колебаний значительно меньший, чем время действия избыточного давления.

Надёжные количественные данные о максимальном давлении сильной ударной волны получают на основании результатов измерения скоростей ударных волн, которые измеряют с большой точностью. Давление на фронте ударной волны при этом определяется по формуле

$$p_m = p_a + \frac{2}{k+1} \rho_a D_{уд}^2 \left(1 - \frac{C_a^2}{D_{уд}^2} \right), \quad (1.51)$$

где p_a – атмосферное давление; $k = \frac{c_p}{c_o}$; $D_{уд}$ – скорость ударной волны; C_a – скорость звука в воздухе; ρ_a – плотность воздуха.

Для измерения давления на фронте ударных волн наилучшим методом является использование пьезодатчиков с записью пьезотоков на скоростные регистраторы. Такой метод обеспечивает регистрацию давлений с высокой точностью в очень широком диапазоне от единиц до тысяч МПа. К недостаткам метода можно отнести разрушение пьезодатчиков на стадии спада давления, что не позволяет осуществлять запись импульса давления при больших давлениях на фронте УВ.

Измерение очень больших давлений на фронте УВ с оценкой импульсов давления может быть успешно осуществлено с помо-

пью метода Гопкинсона. Суть этого метода состоит в следующем. Ударная волна, падающая на торец стального стержня, вызовет в нём распространение продольной волны сжатия с очень малым затуханием и скоростью, равной скорости звука в стали. Достигнув конца стержня, ударная волна отразится от границы металл – воздух и, в соответствии с известной закономерностью, будет распространяться по стержню в противоположном направлении как волна разрежения, создавая в металле напряжения растяжения.

Проведём некоторые уточнения механизма возникновения давлений сжатия и растяжения при распространении в стальном стержне ударной волны и наличии свободного конца стержня. Если волна имеет прямоугольный профиль и большую временную длину по сравнению с временем пробега в стержне звуковой волны, то в любом сечении стержня давление сжатия будет равно давлению растяжения и ни о каких откольных эффектах не может быть и речи. Если ударная волна имеет экспоненциальный профиль, то в любом сечении будет действовать то давление, которое образуется от сложения сжимающего давления в хвостовой части волны и давления разрежения в отражённой волне.

Рассмотрим распространение в стержне плоской волны экспоненциального профиля:

$$p = p_{\max} e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (1.52)$$

где $p_{\max}$ – давление на фронте УВ; t – время, отсчитанное от фронта волны; θ – постоянная взрыва, соответствующая интервалу времени в секундах, через который давление в ударной волне уменьшится в e раз.

Применим схему зеркального отображения источников и стоков для волны сжатия и волны разрежения. Для давления в разрезе, отстоящем на расстоянии l от свободного торца стержня, получим (рис. 1.27)

$$-p_{\max} + p_{\max} e^{-\frac{t}{\theta}} = p_{\max} \left(e^{-\frac{t}{\theta}} - 1 \right), \quad (1.53)$$

где $t = \frac{2l}{a_0}$, a_0 – скорость звука в металле.

Окончательно получим для давления в разрезе

$$p = p_{\max} \left(e^{-\frac{2l}{a_0 \theta}} - 1 \right). \quad (1.54)$$

Сила F , действующая на отрезок стержня сечением S равна

$$F = p_{\max} \left(e^{\frac{2l}{a_0 \theta}} - 1 \right) S. \quad (1.55)$$

Эта сила, действующая в течение времени $\frac{2l}{a_0}$, придаёт отрезку стержня массой m количество движения mv :

$$mv = p_{\max} \left(e^{\frac{2l}{a_0 \theta}} - 1 \right) S \frac{2l}{a_0} \text{ или } \rho l s v = p_{\max} \left(e^{\frac{2l}{a_0 \theta}} - 1 \right) S \frac{2l}{a_0}. \quad (1.56)$$

Обозначим $\left(e^{\frac{2l}{a_0 \theta}} - 1 \right) = \chi$, где χ — доля $p_{\max}$, соответствующая давлению откола в разрезе. Тогда для начальной скорости отлета отрезка получим

$$v = \frac{2 p_{\max} \chi}{\rho a_0} \text{ м/с.} \quad (1.57)$$

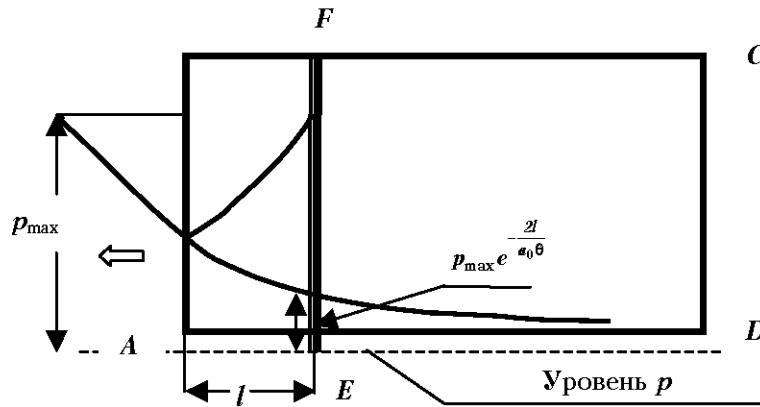


Рис. 1.27. Схема распространяющихся в стержне ABCD волн сжатия и разрежения в момент достижения волной разрежения разреза EF

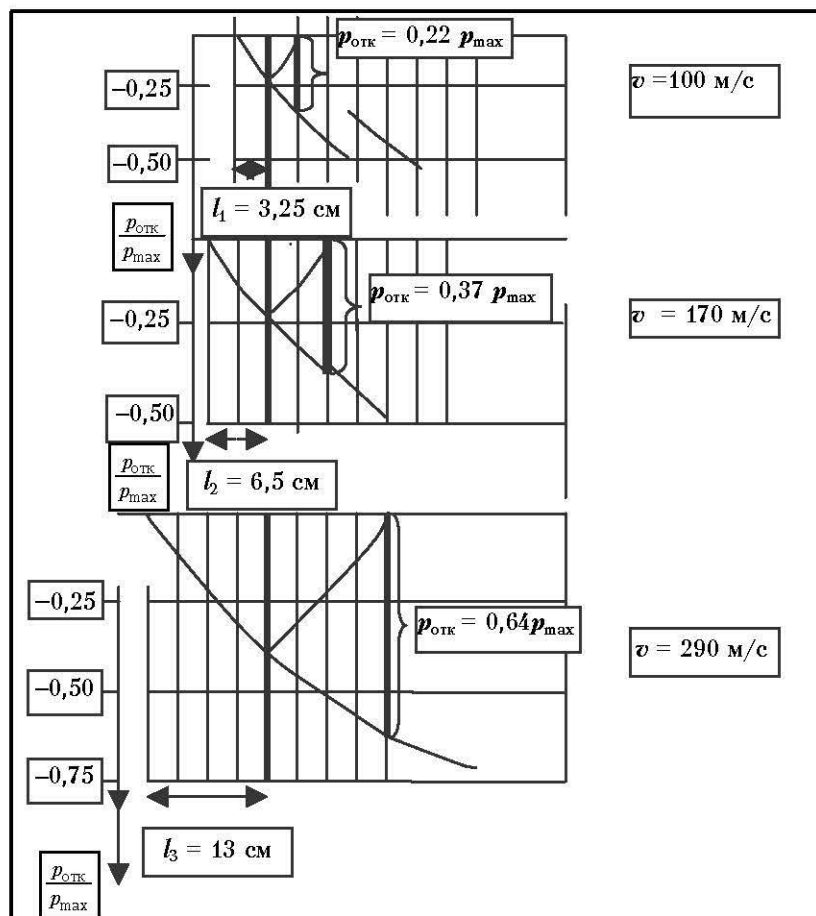


Рис. 1.28. Схема взаимодействия ударной волны с волной разрежения, в результате которого возникает откольное давление $p_{\text{отк}}$ для отрезков стального стержня разной длины, при $p_{\max} = 10^{10} \text{ Па}$, сечении $S = 10^{-4} \text{ м}^2$. Отрезок стержня притёрт к основному стержню

Рассмотрим реальные ситуации при которых можно получить экспериментальные данные для расчёта величин $p_{\max}$ и θ .

На отрезок стержня длиной l , имеющий «нулевую» прочность связи с основным телом стержня, действует растягивающее давление $p_{\text{отк}}$, составляющее часть давления $-p_{\max}$. Отрезок стержня отлетает при достижении разреза волной разрежения, независимо от её интенсивных характеристик. Однако скорость v , которую приобретёт отрезок, полностью определяется совокупностью $p_{\text{отк}}$,

массой отрезка, его площадью поперечного сечения и временем действия на отрезок силы F . На рис. 1.28 представлены схемы взаимодействия ударной волны с волной разрежения для отрезков стального стержня разной длины и, соответственно, массы, а также величины начальных скоростей отрезков для гипотетической ситуации при давлении на фронте УВ в 10^{10} Па и постоянной $\theta = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

Из представленных материалов следует вывод о том, что путём измерения начальной скорости отлёта отрезков стержня разной длины для одной и той же УВ можно составить систему уравнений и, решив её, определить давление на фронте УВ, постоянную θ и импульс УВ. Чем больше пар уравнений будет составлено для полученных из экспериментов величин скоростей при соответствующих длинах отрезков стержня, тем точнее будут определены $p_{\max}$, θ и величина импульса для данной ударной волны. Приведённые расчёты показывают также необходимость регулирования длины отрезков в строго определённом диапазоне, так как при очень коротких отрезках возрастает ошибка как в определении начальной скорости, так и определении θ .

2

ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА ОКРУЖАЮЩИЕ СРЕДЫ

2.1. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИЛИ ФУГАСНОСТЬ ВВ

2.1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВВ

Работоспособность ВВ и связанный с ней разрушительный эффект взрыва зависит от потенциальной энергии ВВ, удельного объёма газообразных продуктов взрыва, характеристик окружающей среды, гидростатического давления и температуры.

Работа продуктов взрыва может быть определена теоретически, исходя из предположения об изэнтропическом законе их расширения. Для этого случая можно оценить работу как

$$A = -dE = -Cv dT,$$

но

$$Cv = \frac{nR}{k-1},$$

и тогда получим

$$A = \frac{nRT_n}{k-1} \left(1 - \frac{T_k}{T_n} \right). \quad (2.1)$$

Отнеся работу к 1 кг ВВ и учитывая, что $PV^k = \text{const}$, $TV^{k-1} = \text{const}$ и $T^k P^{1-k} = \text{const}$, получим

$$A = \frac{\Phi}{k-1} \left(1 - \frac{T_k}{T_n} \right) = \frac{\Phi}{k-1} \left[1 - \left(\frac{V_n}{V_k} \right)^{k-1} \right] = \frac{\Phi}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (2.2)$$

где T_n , V_n и P_n – температура, удельный объём и давление газообразных продуктов, соответственно, в момент взрыва, а T_k , V_k и P_k – значения тех же параметров в процессе расширения продуктов взрыва.

Величина $\Phi = nRT_n$ называется «силой ВВ», где n – количество молей газообразных продуктов, образующихся при взрыве

1 кг ВВ. Величина Φ имеет размерность энергии. При неограниченном расширении продуктов взрыва в атмосфере $T_k = T_0$, $V_k = V_0$, $P_k = P_0$.

Максимальная работа будет равна потенциальной энергии ВВ или

$$A_{\max} = IQ_v, \quad (2.3)$$

где I – механический эквивалент теплоты.

Формула (2.3) действительна только в том случае, когда продукты взрыва полностью представлены газовой фазой. Если продукты представлены смесью газообразной и жидкой фаз, то максимальная работа $A_{\max} < IQ_v$, так как возникает проблема с учётом теплообмена между фазами. Этого можно избежать, если проводить взрыв в плотных средах в замкнутом объёме. При таких условиях между продуктами, находящимися в различных фазовых состояниях, успевает произойти теплообмен, что практически обеспечивает полный переход потенциальной энергии заряда ВВ в механическую работу.

2.1.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФУГАСНОСТИ

Для практической оценки работоспособности ВВ в лабораторных условиях обычно используют так называемую пробу на увеличение полости в свинцовой бомбе. Она заключается в следующем. Навеску в 10 г ВВ взрывают с помощью капсюля-детонатора в цилиндрическом канале массивной свинцовой бомбы (рис. 2.1, а), изготовленной из рафинированного свинца. При взрыве канал бомбы расширяется (рис. 2.1, б) и увеличение его объёма служит характеристикой работоспособности ВВ. Бомба имеет следующие геометрические размеры: диаметр и высота бомбы – 20 см; диаметр канала бомбы – 2,5 см; глубина канала – 12,5 см; объём 61–62 см³.

При анализе результатов испытаний необходимо учитывать следующие моменты: с ростом деформаций бомбы всё больше и больше нарушается пропорциональность между работоспособностью ВВ и расширением полости; увеличение объёма полости зависит от температуры бомбы.

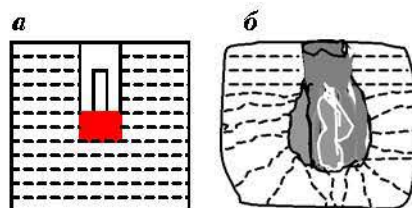


Рис. 2.1. Свинцовая бомба

Таблица 2.1

№ п/п	Название ВВ	Расширение свинцовой бомбы, мл
1	Тротил	285
2	Пикриновая кислота	330
3	Тетрил	340
4	Гексоген	480
5	Тэн	500
6	Аммотол 80/20	360
7	Динамит	520

В табл. 2.1 приведены результаты испытаний нескольких ВВ на расширение канала при взрыве.

2.2. БРИЗАНТНОСТЬ ВВ

2.2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БРИЗАНТНОСТИ

Бризантность – способность взрывчатых веществ к местному разрушительному действию, которое является результатом резкого удара процесса детонации по окружающей ВВ среде. Бризантное действие ВВ проявляется лишь на близких расстояниях от места взрыва. С удалением от места взрыва механические эффекты резко снижаются вследствие крутого падения давления.

Сильно сжатые продукты детонации расширяются по закону $PV^k = \text{const}$, где $k = 3$, а $V \approx R^3$. Поэтому давление в продуктах взрыва уменьшается обратно пропорционально R^9 . Для бризантности определяющими факторами является скорость детонации и детонационное давление. Так, работоспособность аммотола 80/20 выше работоспособности тротила (см. табл. 2.1), но бризантность тротила значительно превосходит бризантность аммотола. Причиной тому является более высокая скорость детонации у тротила. Варьирование плотности заряда ВВ в малой степени сказывается на его работоспособности, но в то же время сильно влияет на бризантность заряда ВВ. Это объясняется значительным влиянием плотности заряда ВВ на скорость детонации и пиковое давление.

Давление на фронте детонационной волны определяется как

$$p_m = \rho_1 Du. \quad (2.4)$$

Рюденберг учёл вклад в полное давление на преграде набегающих на неё продуктов детонации и предложил характеризовать бризантность суммарной величиной, названной им импульсивной силой

$$p_{\text{имп}} = p_{\text{м}} + \rho_1 u^2, \quad (2.5)$$

где ρu^2 – количество движения продуктов детонации в зоне детонационной волны.

Для сильной детонационной волны

$$p_{\text{м}} = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \text{ и } \rho_1 u^2 = \frac{\rho_0 D^2}{k(k+1)} = \frac{p_{\text{м}}}{k}, \quad (2.6)$$

откуда $p_{\text{имп}} = \frac{k+1}{k} p_{\text{м}}$.

При $k = 3$ $p_{\text{имп}} = \frac{4}{3} p_{\text{м}}$.

Конечно, выражение, предложенное Рюденбергом, не может претендовать на абсолютную точность, поскольку фактическое давление, испытываемое стенкой в месте встречи с детонационной волной, определяется условиями отражения детонационной волны. Однако теоретический расчёт отражения осложнён рядом факторов. Среди них: необходимость знать активную часть заряда, невозможность на практике реализовать строго одномерное движение продуктов детонации и т.п.

2.2.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БРИЗАНТНОСТИ

Бризантность определяется по сравнительным испытаниям пашек ВВ одинаковой массы на обжатие свинцовых цилиндров и медных крешеров.

Проба на обжатие свинцовых цилиндров предложена Гессом в 1876 г. и её суть состоит в следующем (см. рис. 2.2). На массивной стальной плите A устанавливается цилиндр из рафинированного свинца b высотой $H = 60$ мм и диаметром $d = 40$ мм. Поверх цилиндра кладётся стальная пластина z диаметром 41,5 мм и толщиной 10 мм, на которую устанавливается заряд ВВ (k) массой 50 г и диаметром 40 мм с гнездом под капсюль-детонатор ЭД-8. При взрыве заряда свинцовый цилиндр обжимается и приобретает грибовидную форму рис. 2.3.

Мерой бризантности служит уменьшение высоты цилиндра

$$\Delta H = H_0 - H,$$

где H – высота свинцового цилиндра после взрыва. При взрыве зарядов тротила с плотностью $\rho \geq 1,3$ г/см³ и других высокобризантных ВВ свинцовый цилиндр разрушается. Во избежание таких последствий используют стальную пластину толщиной 20 мм или уменьшают массу подрываемого заряда до 25 г.

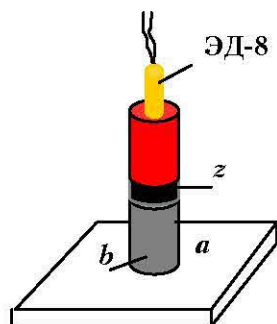


Рис. 2.2. Проба на обжатие свинцового цилиндра



Рис. 2.3. Обжатый свинцовый цилиндр

В табл. 2.2 приведены результаты пробы на обжатие свинцовых цилиндров в стандартном оформлении для зарядов с плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$.

Таблица 2.2

Обжатие свинцовых цилиндров

№ п/п	Название ВВ	ΔH , мм
1	Тротил	18,8
2	Пикриновая кислота	19,2
3	Аммотол 80/20	14,8
4	Динафталит	13,7

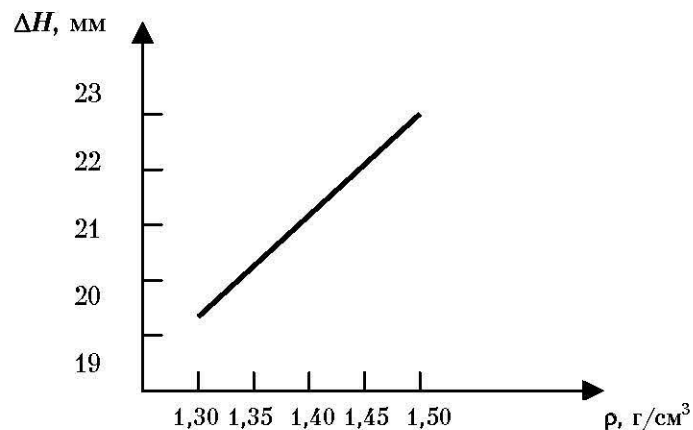


Рис. 2.4. Зависимость обжатия свинцовых цилиндров от плотности заряда (тротил)

С увеличением плотности зарядов (при той же массе) обжатие свинцовых столбиков линейно возрастает. Так для флегматизированного гексогена с увеличением его плотности от 1,2 до 1,5 г/см³ оно увеличилось с 17,2 до 21,2 мм (стальная прокладка толщиной 30 мм). Зависимость обжатия от плотности заряда для тротила показана на рис. 2.4.

2.3. КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ

2.3.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБ ЭФФЕКТЕ

Кумулятивный эффект есть существенное повышение местного действия взрыва. Этот эффект получается при использовании зарядов, имеющих на одном из концов выемку. Если такой заряд подорвать со стороны, противоположной выемке, то бризантный эффект в направлении оси выемки окажется значительно большим, чем при действии обычных зарядов. Экспериментально было установлено, что если поверхность кумулятивной выемки покрыть тонкой металлической облицовкой, то броневой эффект кумулятивного заряда во много раз увеличивается.

Сравним действие на стальную плиту трёх цилиндрических зарядов одинаковых размеров, один из которых не имеет выемки, второй имеет коническую выемку, а у третьего коническая выемка покрыта тонкой металлической облицовкой. Все заряды имеют непосредственный контакт основания цилиндра или конической выемки с плитой.

При инициировании взрыва со стороны свободного торца пашки, не имеющей выемки, после прохождения детонационной волны по ВВ на контакте с плитой возникнет огромное давление вследствие отражения детонационной волны и уплотняющегося потока продуктов детонации. Согласно Рюденбергу, это давление равно

$$p = \rho_1 u D + \rho_2 u^2, \quad (2.7)$$

где $\rho_2 u^2$ — количество движения продуктов детонации в зоне детонационной волны. Это давление намного превосходит предел прочности стали. Однако импульс от взрыва передаётся плите в основном за очень короткий промежуток времени τ . Этот промежуток времени соответствует времени пробега по заряду волны разрежения. При длине заряда ВВ, равной L , и скорости волны разрежения $D/2$

Таблица 2.3

Действие зарядов ВВ на стальную массивную пластину

Характеристика заряда ВВ	Преграда	Характер деформации
Сплошной цилиндрический, высотой 180 мм, диаметром 65 мм	Стальная плита толщиной 200 мм	Вмятина
То же, с конической выемкой без облицовки	То же	Кратер глубиной 22 мм
То же, выемка имеет стальную облицовку толщиной 2 мм	То же	Сквозная пробоина

$$\tau = 2L/D. \quad (2.8)$$

В случае $D = 8000$ м/с и $L = 20$ см; $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$ с. В результате на плите появится вмятина.

Более значительные локальные деформации плиты возникнут при подрыве зарядов с кумулятивной выемкой как без облицовки, так и при наличии облицовки. В табл. 2.3 приведены результаты действия зарядов ВВ на стальную массивную плиту.

Гидродинамическая теория кумуляции была разработана в 1945 г. Лаврентьевым и независимо от него Тейлором и Райхельбергером. Эта теория позволила значительно продвинуться в понимании процесса и создать основы для проектирования новых кумулятивных зарядов повышенной пробивной способности. Однако до настоящего времени многие вопросы кумуляции остаются не решёнными. Прежде всего, это касается взаимодействия в газовых струях между частицами продуктов взрыва и в металлических кумулятивных струях между частицами металла, образующегося из облицовки. При возникновении специфического взаимодействия между частицами, кумулятивная струя должна рассматриваться с квантовомеханических позиций.

Необходимость детального знакомства с теорией кумуляции диктуется широким использованием её во многих устройствах, применяемых при строительстве и заканчивании нефтяных и газовых скважин.

Действие цилиндрического заряда с кумулятивной необлицованной выемкой.

Взрыв обычных зарядов, не имеющих выемки, сопровождается распространением в окружающей среде ударных волн и расширением продуктов взрыва. При этом давление, скорость и плотность газообразных продуктов резко снижаются. Наоборот, при встречном движении продуктов взрыва или ударных волн возникают зоны, в которых параметры среды возрастают. Так, при наличии выемки у заряда вдоль оси этой выемки при взрыве

возникает область (струя), в которой параметры газообразных продуктов взрыва значительно возрастают. Максимальное уплотнение, определяемое как отношение диаметра выемки к диаметру струи, для зарядов без облицовки может достигать 4–5.

При непосредственной близости этой выемки к преграде в последней возникает область повышенных деформаций.

2.3.2. ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ И ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ

При истечении через поверхность кумулятивной выемки продукты детонации будут отклоняться от первоначальной траектории так, что максимум действия будет иметь направление, почти перпендикулярное к этой поверхности. Происходит своеобразное преломление направления движения продуктов взрыва и возникающего перед ними фронта ударной волны. В результате такого движения элементарных струй будет образован поток продуктов детонации, сходящийся вдоль оси кумулятивной выемки и обладающий повышенной плотностью и скоростью по сравнению с продуктами детонации, разлетающимися в других направлениях. Процесс формирования кумулятивной струи схематически показан на рис. 2.5.

Отдельные элементарные струи будут двигаться перпендикулярно поверхности выемки только в непосредственной близости к поверхности выемки. В дальнейшем элементарные струи будут соударяться и образовывать единую струю. В этой струе продукты детонации по мере удаления от поверхности выемки будут всё больше и больше уплотняться, пока их плотность не достигнет максимального значения. Расстояние между основанием заряда и сечением струи, в котором достигнута максимальная плотность продуктов детонации, названо кумулятивным фокусом.

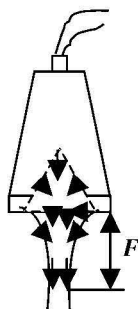


Рис. 2.5. Формирование кумулятивной струи.
 F – фокусное расстояние

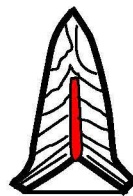


Рис. 2.6. Пест

Фокусное расстояние при заданном профиле выемки изменяется в зависимости от скорости детонации ВВ заряда. Чем меньше скорость детонации, тем больше фокусное расстояние. Это является одной из причин существенного падения кумулятивного эффекта при подрыве зарядов ВВ из малобризантных ВВ.

В теории кумуляции вводится понятие «активная часть кумулятивного заряда»; фактически это та часть заряда ВВ, которая непосредственно идёт на формирование кумулятивной струи.

Действие цилиндрического заряда с кумулятивной выемкой, облицованной металлом.

Многие исследователи видят различие между газовой струёй и струёй из металла прежде всего в значительно большем уплотнении струи при использовании металлических облицовок. Существен также и инерционный фактор, который определяет большее пробитие мишени металлической струёй несмотря на тот факт, что общая начальная энергия струи кумулятивного заряда с облицованной выемкой не больше, а даже меньше энергии газовой струи заряда без облицовки, за счёт того, что часть энергии взрыва затрачивается на сжатие облицовки.

В этом плане физические основы образования и последующего движения струи после подрыва заряда ВВ с облицованной выемкой состоят в следующем.

На первой стадии по Ф.А. Бауму, К.П. Станюковичу и Б.И. Шехтеру и ряду других авторов происходит скоростное обжатие облицовки. В зависимости от характеристики ВВ скорость обжатия стального конуса с толщиной стенки 1–2 мм варьирует в диапазоне 1000–2500 м/с. Такая высокая скорость обжатия превращает металлическую облицовку в компактное образование – пест (рис. 2.6), давая начало зарождению и последующему развитию струи.

Здесь нужно сказать, что после завершения обжатия песта металл внутри него не переходит в расплав, но в то же время состояние металла в определённой внутренней области песта претерпевает фазовый переход. Практически все исследователи не обращали внимание на тот важнейший факт, что струя формируется именно из материала, который уже не является твёрдым телом, но и не перешёл в расплав. Именно такое состояние материала определяет многие особые свойства кумулятивной струи. Прежде всего, в кумулятивной струе, как в квантовомеханической системе за счёт нахождения частиц металла в возбуждённом состоянии, энергия со всей струи передаётся в её головную часть, при полном отсутствии рассеивания энергии в радиальном направлении. Это предопределяет высокую пробивную способность при сравнительно малой массе струи. По данным Ф.А. Баума,

К.П. Станюковича и Б.И. Шехтера, струя образуется исключительно за счёт течения металла, (но не расплава) прилегающего к внутренней поверхности облицовки; масса металла, переходящего в кумулятивную струю, не превышает 11 % от массы облицовки.

Для нормального процесса обжата облицовки, по мнению тех же исследователей, необходима высокая пластичность её материала. В процессе деформирования облицовки не должно происходить хрупкого разрушения её, так как в противном случае в значительной степени уменьшится коэффициент перехода металла в струю и соответственно снизится пробивная способность кумулятивного заряда. При оценке пластичности материала облицовки нужно иметь в виду, что физико-механические свойства материалов при высокоскоростных деформациях могут в корне отличаться от их свойств при обычных, принятых в практике испытаний материалов, скоростях деформации.

Пест и струя на начальных стадиях составляют единое целое, хотя и движутся с различными скоростями. Скорость песта составляет 500–1000 м/с. Скорость струи варьирует по её длине. Головная часть может достигать скорости 10 км/с, в то время как скорость хвостовой части близка к скорости песта. В табл. 2.4 приведены зависимости скорости головной части кумулятивной струи от некоторых факторов.

Устойчивость кумулятивной струи.

На основе обширных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что частичное или полное искажение кумулятивной струи происходит по следующим причинам.

1. Попадания в кумулятивную выемку жидкости.
2. Расположение преграды ближе фокусного расстояния.

Таблица 2.4

Зависимость скорости головной части кумулятивной струи при стальной облицовке толщиной 1 мм от некоторых факторов

Размеры заряда		Форма выемки	Параметры выемки		Скорость головной части струи, м/с
Диаметр, мм	Высота, мм		Диаметр основания, мм	Угол раствора конуса, град	
30	70	Полусфера	28	–	3000
30	70	Конус	27,2	60	6500
30	70	Конус	27,2	35	7300
30	70	Конус	27,2	27	7400
30	70	Гипербола	27,2	–	9500

3. Ассиметрии подходящего к поверхности облицовки кумулятивной выемки фронта детонационной волны.

4. Недостаточного качества применяемой кумулятивной облицовки.

5. Частичного разложения заряда под действием высокой температуры до момента срабатывания его в скважине.

Заполнение жидкостью кумулятивной выемки делает невозможным сам кумулятивный эффект. При близком расположении преграды к основанию заряда струя не сможет окончательно сформироваться.

Ассиметрия фронта детонационной волны приведёт к смещению оси струи относительно геометрической оси заряда.

Кумулятивная облицовка не должна иметь даже малейшей разностенности и обладать особыми свойствами, обеспечивающими максимальный переход материала в струю.

Частичное разложение кумулятивного заряда ВВ при действии высоких температур снижает запас энергии, участвующий в формировании струи.

На рис. 2.7 приведена схема ситуации после растяжения кумулятивной струи, находящейся в свободном полёте, до максимального значения L_c . При дальнейшем растяжении струя будет фрагментироваться.

Деформацию кумулятивной струи при возможных асимметриях взрывного импульса и облицовки детально исследовал Крейн. Он показал, что даже при незначительной асимметрии кумулятивной облицовки или взрывного импульса происходит сдвиг центра формирования струи относительно оси заряда ВВ. В связи с этим, а также вследствие изменения во времени начальных скоростей и направлений элементов струи происходит её искривление.

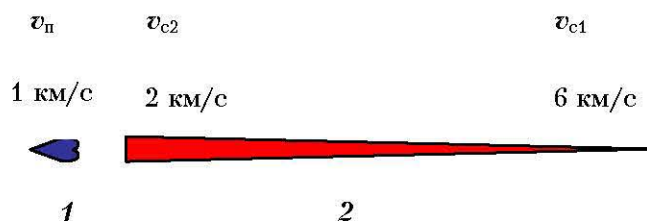


Рис. 2.7. Схема положения песта и струи в момент её максимального растяжения. $v_{\text{п}}$, $v_{\text{с2}}$ - скорости песта и хвостовой части струи; $v_{\text{с1}}$ - скорость головной части струи:

1 - пест, 2 - кумулятивная струя

2.3.3. ПРОНИКАНИЕ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ В ОДНОРОДНУЮ ПРЕГРАДУ

Основы теории пробивания преград кумулятивной струёй впервые были разработаны Лаврентьевым. В основе его теории лежит предположение о том, что при соударении струи с преградой развиваются высокие давления, при которых можно пренебречь прочностным сопротивлением преграды и рассматривать материал преграды как несжимаемую жидкость.

Представляя проникающую струю и преграду как два потока идеальной несжимаемой жидкости и используя уравнение Бернулли и третий закон Ньютона в системе координат, связанной с движущейся точкой контакта струи и преграды, можно записать

$$\frac{\rho_c v_b^2}{2} = \frac{\rho_c (v_c - u)^2}{2} = \frac{\rho_n u^2}{2}, \quad (2.9)$$

где v_c – скорость струи; u – скорость углубления канала; $v_b = v_c - u$ – скорость встречи струи с преградой; ρ_c , ρ_n – плотности материала струи и преграды соответственно. Приращение длины канала за время dt

$$dL_k = u dt. \quad (2.10)$$

Расход струи за время dt

$$dL_c = (v_c - u) dt. \quad (2.11)$$

Из формул (2.10) и (2.11) получим

$$dL_k = dL_c \frac{u}{v_c - u}. \quad (2.12)$$

Но используя зависимость (2.9), получим связь между скоростями и плотностями

$$\frac{u}{v_c - u} = \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{0.5}. \quad (2.13)$$

Откуда получим

$$dL_k = dL_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{0.5}. \quad (2.14)$$

Для струй, практически не растягивающихся, полная длина канала будет равна

$$L_{\kappa} = L_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{0,5}. \quad (2.15)$$

Естественно было предположить, что принятая Лаврентьевым схема справедлива при определённых допущениях. Во-первых, давление при соударении струи с преградой должно превышать определённую величину. Во-вторых, прочностные характеристики материала преграды известны и не зависят от скорости деформирования и условий нахождения преграды.

Несмотря на простоту и понятность гидродинамической модели проникания кумулятивной струи в преграду, эта модель не отражает истинное содержание процесса.

Как уже отмечалось выше, кумулятивная струя представляет собой систему частиц, не относящуюся ни к твёрдому металлу, ни к расплаву. В такой ситуации и нахождении частиц материала струи в энергетически возбуждённом состоянии в ней может реализоваться особое взаимодействие между отдельными частицами. Такое взаимодействие переводит струю в квантовомеханическую систему, обладающую рядом специфических свойств. Во-первых, взаимодействие между частицами струи обеспечивает её сплошность. Во-вторых, энергия головной части струи, расходуемая на локальное разрушение преграды, мгновенно восстанавливается за счёт переноса энергии со всего объёма струи в головную часть. В-третьих, расход энергии в направлении боковой поверхности активной части струи отсутствует. В-четвёртых, эффект «намазывания» материала струи на боковую поверхность пробитого канала имеет место только в хвостовых элементах струи, потерявших энергию в результате передачи её в головную часть струи. Таким образом, облицовка кумулятивной выемки из пассивного элемента кумуляции превращается не только в активный, но и в значительной мере в элемент, определяющий пробивную способность кумулятивного заряда.

Следует отметить, что далеко не из любого металла или сплава, используемого для облицовки, может быть получена длительно существующая квантовомеханическая кумулятивная струя. Поэтому в настоящее время подбору состава материала облицовки уделяется огромное внимание.

2.4. ГОРЕНИЕ ПОРОХОВ

Необходимость рассмотрения закономерностей горения порохов связана с широким применением их во взрывных пакерах, пороховых генераторах давления (ПГД-БК) и других системах и устройствах.

2.4.1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ПОРОХОВ

Для метательных ВВ-порохов горение является типичным взрывчатым превращением. Как при низких, так и при высоких давлениях вплоть до 500–600 МПа горение осуществляется параллельными концентрическими слоями, что и определяет устойчивость процесса.

В горении порохов различают следующие три фазы:

- 1) зажжение или местное возбуждение самораспространяющейся реакции;
- 2) воспламенение или распространение возбуждённого процесса по поверхности вещества;
- 3) собственно горение или распространение реакции в глубь вещества.

Деление процесса на три стадии является чисто условным, но имеет смысл по причине различия скоростей указанных фаз.

Зажжение есть начальная стадия воспламенения, как правило, под влиянием местного нагрева.

Скорость воспламенения порохов зависит от природы пороха, состояния его поверхности, окружающей среды и давления. По способности к воспламенению дымные пороха стоят на первом месте.

Скорость воспламенения при прочих равных условиях возрастает с увеличением удельной поверхности пороха.

С возрастанием давления скорость воспламенения увеличивается. Это объясняется тем, что при повышении давления затрудняется удаление горячих газообразных продуктов горения от поверхности пороха.

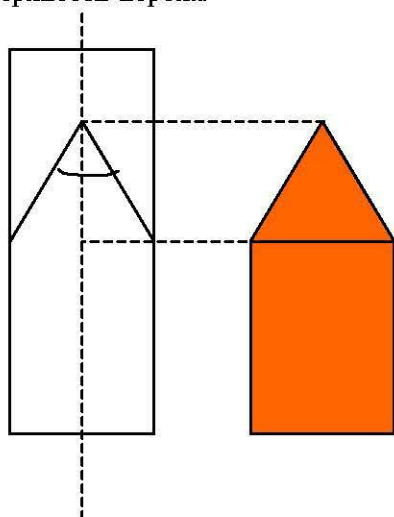


Рис. 2.8. Образование конуса вследствие различия в скоростях воспламенения и горения

Скорость воспламенения нитроцеллюлозных порохов на открытом воздухе, по данным Левковича и Арша, колеблется в пределах 20–40 см/с. При горении порохов на воздухе скорость распространения по поверхности вещества (воспламенения) значительно больше скорости горения. Если вертикально подвешенный пороховой стержень зажечь в верхнем конце, то через некоторое время поверхность горения стержня, вследствие различия в скоростях воспламенения и горения, примет форму правильного конуса (рис. 2.8). Соотношение между этими скоростями может быть определено по углу α у вершины конуса:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{u_1}{u_2 - u_1}, \quad (2.16)$$

где u_1 – скорость горения; u_2 – скорость воспламенения.

При горении порохового стержня в атмосфере инертного газа обе эти скорости равны и вместо конуса образуется неглубокий кратер.

Из этих опытов следует, что большая скорость воспламенения на открытом воздухе связана с догоранием продуктов реакции за счёт кислорода воздуха.

Скорость горения зависит, при прочих равных условиях, от калорийности пороха, начальной температуры пороховых элементов и внешнего давления или давления в продуктах горения, если процесс протекает в замкнутом пространстве.

С увеличением калорийности пороха скорость горения его возрастает. Так например, скорость горения пироксилиновых порохов возрастает с увеличением содержания в них азота.

Влияние плотности и температуры. Плотность зёрен очень сильно влияет на скорость. При увеличении плотности зёрен всего на 15–17 % скорость горения пороха уменьшается в 10–20 раз. Такое сильное влияние объясняется ростом препятствий проникновению горячих продуктов горения в глубь зёрен.

С увеличением начальной температуры пороха скорость горения его увеличивается. Так, отношение скоростей горения для нитроглицеринового пороха при 100 °С и 0 °С составляет 2,9.

Влияние давления. Чувствительность к давлению различных порохов не одинакова. Если дымные пороха при атмосферном давлении горят в 10 раз быстрее, чем пироксилиновые ружейные пороха, то при больших давлениях наблюдается обратная картина: скорость горения пироксилиновых порохов значительно больше, чем дымных.

Для описания зависимости скорости горения от давления существует много различных формул, но каждая из них отражает зависимость только в ограниченном диапазоне давлений и ни

одна из них не в состоянии описать зависимость $u(p)$ в широком диапазоне давлений. Препятствием к такому обобщению является зависимость самого механизма горения и теплового эффекта реакции от давления. Так, эксперименты показали, что тепловой эффект при сгорании нитроглицеринового пороха при давлениях меньших 4 МПа составляет всего лишь около 53 % теплоты сгорания пороха при $p \geq 7$ МПа.

Зависимость $u = f(p)$, согласно Вьелю, соответствует уравнению

$$u = AP^v, \quad (2.17)$$

где A и v зависят от природы пороха и величины давления.

Для дымных порохов v меняется с возрастанием давления, как это показано ниже:

P/p_0	0,4	1,0	2,0	3,0	500
v	1,00	0,63	0,49	0,40	0,33

Для нитроцеллюлозных порохов может быть принята более простая зависимость для скорости горения:

$$u = Ap. \quad (2.18)$$

Эта формула является частным случаем формулы (2.17), при условии $v = 1$.

Однако формула (2.18) работает лишь при достаточно высоких давлениях ($p \geq 100$ МПа). Для более низких давлений ($p \leq 25$ МПа) $v = 0,7$, что говорит о том, что и для нитроцеллюлозных порохов значение v не остаётся постоянным.

По Андрееву, зависимость скорости горения для нитроцеллюлозных порохов в достаточно широком интервале давлений может быть описана при помощи двухчленной формулы

$$u = a + bp^v, \quad (2.19)$$

где v принимает различные значения для разных порохов, но вообще близко к единице.

Коэффициент A в формулах (2.17) и (2.18) фактически равен 0,7–1,0 мм/с при давлении 0,1 МПа. Следовательно, при 10 МПа скорость горения достигнет величины 100 мм/с.

2.4.2. ПРОНИКАНИЕ ПУЛЬ В ПРЕГРАДУ

Баллистические характеристики пороха.

1) Сила пороха F – работа, которую могут совершить образующиеся газообразные продукты при полном сгорании 1 кг пороха без участия кислорода воздуха.

Размерность силы пороха – Дж/кг.

2) Коволом α – объём газообразных продуктов горения, образующихся при сгорании в заданных условиях 1 кг пороха.

3) Удельная поверхность пороха – отношение общей поверхности зёрен заряда к его видимому объёму. Размерность – $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Кроме баллистических характеристик пороха на величину и характер нарастания давления влияет плотность заряжания Δ . Плотность заряжания представляет собой отношение массы порохового заряда к тому объёму, в котором происходит горение этого заряда.

Размерность плотности заряжания – $\text{кг}/\text{м}^3$.

При высокой плотности заряжания $\Delta \geq 800$, характерной для пулевых перфораторов, пакеров, стреляющих грунтоносов и других устройств, используемых в глубоких скважинах, давление в камере сгорания может достигать 2000 МПа.

Проникание пуль в преграду.

Пулевые перфораторы последнего поколения обеспечили высокую эффективность вторичного вскрытия в глубоких нефтяных скважинах. Скорость пули на выходе из ствола (дульная скорость) достигает сотен метров. С учётом большой массы пули в глубоких нефтяных скважинах гарантированно обеспечивается пробитие 1–2 обсадных колонн, цементного камня и формирование в породе канала с сеткой трещин.

Глубина проникновения пули в полубесконечную преграду может быть определена путём совместного решения следующих уравнений:

$$F = -m \frac{dv}{dt} \text{ и } L_v = \int_v^{v_n} v dt, \quad (2.20)$$

где F – сила давления пули на преграду при скорости последней v ; m – масса пули; L_v – длина канала при текущей скорости v пули; v_n – скорость входа пули в преграду.

Сила давления F сложным образом зависит от характеристик преграды. Лучшие результаты даёт полуэмпирическая закономерность, связывающая силы сопротивления сплошной полубесконечной преграды и силу давления F пули на преграду при скорости последней v :

$$F = s (a + bv^2), \quad (2.21)$$

$$F = skv, \quad (2.22)$$

где s – площадь поперечного сечения пули; a – собственное прочностное сопротивление преграды, т.е. сопротивление разрушению или уплотнению материала преграды; bv^2 – инерционное

сопротивление среды, обусловленное, помимо прочего, плотностью среды и формой головной части пули; k – коэффициент, зависящий от всего комплекса характеристик преграды и формы головной части пули.

Из (2.20) и (2.21) получаем уравнение движения пули в преграде

$$-m \frac{dv}{dt} = s(a + bv^2). \quad (2.23)$$

После умножения левой и правой части уравнения на dL получим

$$\begin{aligned} -m \frac{dv}{dt} dL &= s(a + bv^2) dL, \\ -m v dv &= s(a + bv^2) dL. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Тогда дифференциал длины канала равен

$$dL = -\frac{m}{s} \frac{v dv}{a + bv^2}. \quad (2.25)$$

Для получения длины канала при снижении скорости от v_c до v необходимо проинтегрировать dL в пределах от 0 до L_v , а правую часть уравнения – от v_c до v :

$$L_v = \frac{m}{2bs} \ln \frac{a + bv_c^2}{a + bv^2}. \quad (2.26)$$

Полная длина канала соответствует остановке пули, т.е. $v = 0$. При этом условии из (2.26) получаем

$$L_{\text{кп}} = \frac{m}{2bs} \ln \frac{a + bv_c^2}{a} = \frac{m}{2bs} \ln \left(1 + \frac{b}{a} v_c^2 \right). \quad (2.27)$$

Физический смысл и содержание параметров a и bv^2 следующие: $a = H_n(v)$ мгновенное динамическое прочностное сопротивление преграды внедрению пули, зависящее от её скорости; bv^2 – гидродинамическое инерционное сопротивление преграды, равное $\lambda \rho_n v^2$, где λ – коэффициент головной части пули; ρ_n – плотность материала преграды. Заменяя a и bv^2 в (2.27) на указанные значения, получим

$$L_{\text{кп}} = \frac{m}{2\lambda s \rho_n} \ln \left(1 + \frac{\lambda \rho_n}{H_n(v)} v_c^2 \right). \quad (2.28)$$

Определим значения λ и H_n , предварительно заменив m на произведение объёма пули на плотность её материала $l_c \rho_c$.

Коэффициент λ для пуль с коническим заострением может быть определен с использованием формулы Ньютона:

$$\lambda = \sin^2 \alpha,$$

где α – половина угла заострения.

$H_n \approx cHB$ (c – коэффициент, учитывающий рост динамического прочностного сопротивления преграды с ростом скорости пули – v_c ; HB – динамическая твёрдость материала преграды по Бринеллю для металла). При скоростях пули $v_c \approx 100$ м/с коэффициент c равен 1,5.

Формула (2.28) для полной длины канала в металлической преграде с плотностью ρ_{mn} , после подстановки в неё значений λ , H_n и c , приобретёт следующий вид:

$$L_{кп} = \frac{l_c \rho_c}{2\rho_{mn} \sin^2 \alpha} \ln \left(1 + \frac{\rho_{mn} \sin^2 \alpha}{cHB} v_c^2 \right). \quad (2.29)$$

Для пород формула будет иметь аналогичный вид, но плотность преграды должна соответствовать плотности породы:

$$L_{кп} = \frac{l_c \rho_c}{2\rho_n \sin^2 \alpha} \ln \left(1 + \frac{\rho_n \sin^2 \alpha}{P_{ш}} v_c^2 \right), \quad (2.30)$$

где $P_{ш}$ – твёрдость породы по штампу; k – коэффициент, учитывающий изменение динамического прочностного сопротивления породы при изменении скорости пули на входе в породу; его значение может быть получено опытным путём для определённых групп прочности пород.

2.5. ВЗРЫВ В ВОДЕ НА БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЕ

При подводном взрыве заряда сферической формы в безграничной жидкости, когда отсутствуют отражённые волны, давление на фронте подводной ударной волны определяется соотношением

$$P_m = A \left(\frac{G^{1/3}}{r} \right)^{1,13}, \quad (2.31)$$

где A – постоянный коэффициент, равный для тротила 53,3 МПа при плотности заряда 1600 кг/м³; G – масса заряда; r – расстояние от центра заряда.

Для других ВВ коэффициент A_i может быть вычислен в соответствии с принципом энергетического подобия $A_i = \gamma_i A$.

$$\gamma_i = \left(\frac{Q_i}{Q_T} \right)^{\frac{1,13}{3}} = \left(\frac{Q_i}{Q_T} \right)^{0,376}, \quad (2.32)$$

где Q_i – удельная энергия данного взрывчатого вещества, ккал/кг; Q_T – удельная энергия тротила, 1000 ккал/кг или $4,18 \cdot 10^3$ Дж/кг.

Если ввести безразмерное расстояние (расстояние от центра заряда до данной точки, выраженное в радиусах заряда)

$$\bar{r} = \frac{r}{r_{\text{зар}}}, \quad \text{то для тротилового заряда с плотностью } 1600 \text{ кг/м}^3$$

формулу (2.31) можно записать в виде

$$P_m = \frac{1470}{(\bar{r})^{1,13}} \gamma_i \text{ МПа}. \quad (2.33)$$

Изменение давления во времени характеризуется в среднем диапазоне расстояний $60 \leq \bar{r} \leq 120$ соотношением

$$p(t, r) = P_m \frac{1}{\left[\alpha \left(\frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} - \frac{r}{r_{\text{зар}}} \right) + 1 \right]^2} \sigma_0 \left(\frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} - \frac{r}{r_{\text{зар}}} \right) \text{ МПа}, \quad (2.34)$$

где α – постоянный коэффициент, равный для тротила 0,27; σ_0 – единичная разрывная функция нулевого порядка, указывающая на тот факт, что при подходе к данной точке давление скачком возрастает:

$$\sigma_0 \left(\frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} - \frac{r}{r_{\text{зар}}} \right) = \begin{cases} 0 & \text{при } \frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} < \frac{r}{r_{\text{зар}}} \\ 1 & \text{при } \frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} \geq \frac{r}{r_{\text{зар}}} \end{cases}. \quad (2.35)$$

Величина импульса положительной фазы давления в функции времени.

$$I(t, r) = P_m \frac{r_{\text{зар}}}{a_0 \alpha} \left\{ 1 - \frac{1}{\alpha \left(\frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} - \frac{r}{r_{\text{зар}}} \right) + 1} \right\} \sigma_0 \left(\frac{ta_0}{r_{\text{зар}}} - \frac{r}{r_{\text{зар}}} \right) \text{ МПа} \cdot \text{с}. \quad (2.36)$$

Для оценки изменения давления в ударной волне часто пользуются экспоненциальной зависимостью

$$P = P_m e^{-\frac{1}{\theta} \left(t - \frac{r}{a_0} \right)} \sigma_0 \left(t - \frac{r}{a_0} \right) \text{ МПа.} \quad (2.37)$$

В формуле (2.37) t обозначает время, за которое фронт ударной волны прошёл расстояние равное или превышающее r , а время r/a_0 соответствует времени прохождения фронтом УВ расстояния r . В этой формуле σ_0 , как и в формуле (3.35), соответствует единичной разрывной функции нулевого порядка. Таким образом, формула (2.37) позволяет определить изменение давления в функции времени, отсчитанного от момента взрыва в точке, находящейся на расстоянии r от центра заряда ВВ.

Показатель снижения давления в e раз $-\theta$ в УВ с экспоненциальным профилем вычисляется с помощью соотношения

$$\theta = 1,4 \frac{r_{\text{зар}}}{a_0} [\bar{r}]^{0,24} \text{ (с).} \quad (2.38)$$

С увеличением расстояния УВ от эпицентра взрыва θ возрастает.

Порядок расчёта давления в ударной волне в функции расстояния и времени следующий:

1. Задаёмся массой заряда ВВ с учётом его удельной энергии.
2. Задаёмся расстоянием r , на котором будем определять P_m и изменение давления во времени.
3. Определяем $r_{\text{зар}}$ при плотности заряда ВВ в 1600 кг/м^3 и безразмерном расстоянии от центра заряда до точки наблюдения

$$\bar{r} = \frac{r}{r_{\text{зар}}}.$$

4. Определяем P_m по формуле (9.3).

5. Определяем r/a_0 .

6. Определяем θ по формуле (9.11).

7. Задаваясь возрастающими значениями $t - \frac{r}{a_0} \geq 0$, получаем

давление в ударной волне в функции времени при фиксированном расстоянии.

Для определения импульса давления в точке, находящейся от центра взрыва на расстоянии r используем формулу (2.37)

$$I = \int_0^t p dt = P_m \theta \left[1 - e^{-\frac{1}{\theta} \left(t - \frac{r}{a_0} \right)} \right] \sigma_0 \left(t - \frac{r}{a_0} \right). \quad (2.39)$$

2.6. РАЗРУШИТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

Для размещения складов взрывчатых веществ и взрывных устройств необходимо оценивать безопасные расстояния до ближайших строений и сооружений. Оценка должна производиться как по действию воздушной ударной волны, так и по сейсмозрывному воздействию. Если воздействие воздушной ударной волны можно снизить за счёт обваловки складов или заглубления их, то противостоять сейсмозрывному воздействию представляет собой более сложную и не всегда разрешимую задачу.

Взрыв всегда сопровождается ударом продуктов детонации по контактирующей с зарядом среде и образованием в последней ударной волны. В зависимости от природы среды начальное давление на фронте волны может превышать давление детонационной волны или составлять всего лишь несколько единиц тысяч атмосфер, то есть составлять всего лишь десятую долю детонационного давления. При взрыве заглублённых зарядов ВВ значительная часть энергии взрыва расходуется на деформацию, разрушение и уплотнение породы.

Объём V_{∞} занимаемый предельно расширившимися продуктами взрыва, пропорционален массе $m_{\text{вв}}$ и зависит от свойств среды. В начальной стадии расширения (при $p_k \leq p \leq p_n$) текущее давление p падает по закону

$$p \approx V^{-k} \approx r^{-3k},$$

где $p_n = 10^4$ МПа начальное давление в продуктах взрыва, а $p_k = 100$ МПа.

Далее давление снижается по закону

$$p \approx V^{-k_1} \approx r^{-3k_1}$$

вплоть до давления p_z , которое зависит от свойств окружающей среды. В этих формулах $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель изэнтропы.

Для большинства бризантных ВВ

$$k = 3 \quad k_1 = 1,4 \quad p_n = 10^4 \text{ МПа} \quad p_k = 10^2 \text{ МПа}.$$

В том случае, когда расширение продуктов взрыва происходит в воздухе или в воде, затраты энергии на деформацию среды и её разрушение отсутствуют $p_z = p_a$, где p_a – противодавление среды. В частном случае при взрыве в воздухе и нормальном ат-

мосферном давлении объём продуктов ВВ от начального давления $p_n = 10^4$ МПа до $p_k = 100$ МПа увеличится в 4,57 раза, и ещё в 138 раз при падении давления от 100 МПа до атмосферного. Итого объём продуктов взрыва при падении в них давления от начального до атмосферного увеличится в 630 раз.

То есть

$$V_\infty = ZV_0,$$

где V_0 – начальный объём (фактически объём конденсированного ВВ) продуктов взрыва; $Z = 630$.

Значительно меньший объём предельно расширившиеся продукты взрыва займут при протекании процесса в твёрдой среде. Величина p_Z в этом случае варьирует в широком диапазоне от 0,1 МПа до 100 и более МПа.

Для скальных пород высокой прочности при камуфлетном взрыве объём каверны V_∞ составляет

$$V_\infty \approx 50V_0.$$

Объём зоны разрушения V_R породы или другой твёрдой среды значительно превышает объём предельно расширившихся продуктов взрыва, но он всегда пропорционален V_∞ , т.е.

$$\frac{V_R}{V_\infty} = \alpha = \text{const.}$$

Для различных горных пород $3 \leq \alpha \leq 10$. В объём зоны разрушения входит и объём каверны.

В зависимости от местоположения эпицентра взрыва и мощности заряда (под землёй, над землёй) разрушительные эффекты могут быть связаны с ударными волнами, распространяющимися в воздухе, и (или) с сейсмовзрывными волнами, распространяющимися в грунтах и породах.

2.6.1. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА В ВОЗДУХЕ

При взрыве в воздухе больших зарядов ВВ радиус зоны разрушений наземных сооружений может быть оценен по эмпирической формуле

$$R_{\text{раз}} = kc^n,$$

где $k = 0,5$ для кирпичных кладок, $k = 0,25$ для бетонных стен и перекрытий. Масса заряда c измеряется в килограммах. Показатель n в зависимости от формы, оболочки и пр. варьирует в диапазоне от 1/3 до 2/3 (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Периоды собственных колебаний элементов конструкций
и разрушающие нагрузки

Конструкция	Кирпичные стены		Железобетонная стена 0,25 м	Перекрытия по деревянным балкам	Лёгкие перегородки	Застекления
	2 кирпича	1,5 кирпича				
T , с	0,01	0,015	0,015	0,3	0,07	0,04–0,02
Статическая нагрузка, МПа	0,025	0,015	0,3	0,010–0,016	0,005	0,005–0,010
Импульсивная нагрузка, кН·с/м ²	2,2	1,9	–	–	–	–

Для зарядов массой 1–2 тонны показатель $n = 1/2$. При этом радиус зоны разрушения составит 30–35 приведённых радиусов заряда.

Разрушение объектов при взрыве в воздухе может происходить как под действием импульса (импульсивное действие), так и под действием возникающего избыточного давления (условное статическое действие). Фактически речь идёт о соотношении времени действия фазы сжатия УВ τ и периода релаксации преграды. Для упругих систем период релаксации преграды соответствует периоду собственных колебаний системы T .

Импульсивное действие имеет место при соотношении

$$\frac{\tau}{T} \leq 0,25.$$

Статический характер действия УВ соответствует соотношению $\frac{\tau}{T} \geq 10$.

Для экспериментального определения давления в ударной волне и импульса применяют различные приборы.

Приборы для измерения импульсов должны иметь периоды собственных колебаний на порядок и более превосходящие время действия ударной волны. В противном случае приборы будут измерять лишь неопределённую часть импульса.

Приборы для измерения давлений, наоборот, должны иметь период колебаний значительно меньший, чем время действия избыточного давления.

2.6.2. ДЕЙСТВИЕ ПОДЗЕМНОГО ВЗРЫВА

Горные породы и грунты способны выдерживать большие напряжения сжатия. Однако при сравнительно небольших сдвиговых или растягивающих нагрузках в породах наблюдаются

разрывы сплошности с образованием микро- или макротрещин.

Взрыв на выброс. Если подземный взрыв осуществляется на сравнительно малой глубине, то волны напряжения сжатия достигая дневной поверхности отражаются от неё и в глубь породы распространяются волны напряжения растяжения. То есть возникает волновая картина, аналогичная отражению подводной ударной волны от границы вода – воздух. Волны напряжения растяжения имеют амплитуду того же порядка, что и амплитуды прямых волн напряжения сжатия. Вследствие этого обширная зона над подземным взрывом становится зоной разрушения. При недостаточном заглублении заряда ВВ происходит выброс грунта с образованием воронки. Схема образующейся воронки представлена на рис. 2.9.

Отношение радиуса воронки R_v к её глубине W называется показателем Горна или показателем действия взрыва.

$$n = \frac{R_v}{W}. \quad (2.40)$$

Воронка с $n = 1$ называется воронкой нормального выброса. Соответственно при $n > 1$ и $n < 1$ воронка соответствует усиленному или ослабленному выбросу. Расчёты, как правило, выполняются для воронки нормального выброса. Объём такой воронки V равен

$$V = \frac{\pi}{3} R_v^2 W = k W^3. \quad (2.41)$$

Массу заряда для получения воронки нормального выброса и заданного объёма рассчитывают по формуле

$$G = K_v W^3, \quad (2.42)$$

где K_v – коэффициент численно равный массе заряда (в тротиловом эквиваленте), необходимого для выброса 1 м^3 данной породы, с учётом её прочностных характеристик. Для некоторых пород в табл. 2.6 представлены значения K_v , полученные экспериментальным путём.

Для тротила в безразмерных координатах и воронок усиленного или ослабленного выброса применяется формула Борескова, которая может быть записана в виде

$$G = K_v W^3 f(n), \quad (2.43)$$

где $f(n) = 0,4 + 0,6n^3$.

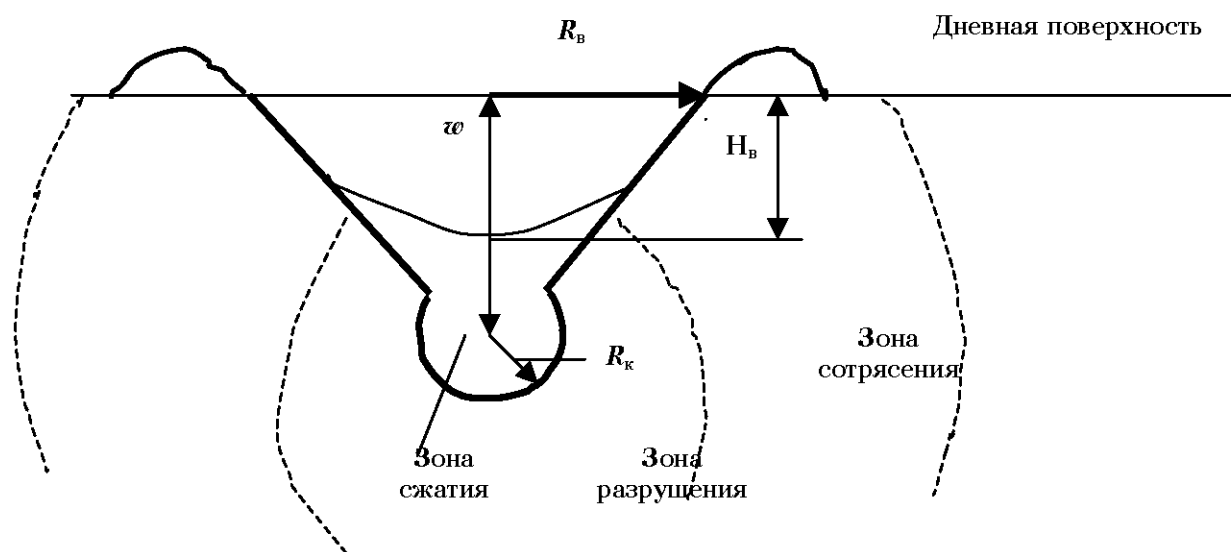


Рис. 2.9. Схема воронки, образующейся при заложении заряда на глубине W

Таблица 2.6

Порода, грунт	K_v , кг/м ³
Песок, грунт с растительностью	0,95
Глина, гравий	1,1
Известняк, песчаник	1,5
Доломит, мрамор	1,6
Гранит крупнозернистый	1,7–1,8
Базальт	2,2

Следует учитывать, что при взрыве на выброс видимая глубина воронки H_v за счёт обратного падения в неё разрушенного грунта оказывается значительно меньшей и может быть определена по формуле

$$H_v = \frac{2R_v - W}{3}, \quad (2.44)$$

где H_v – видимая глубина воронки (см. рис. 2.9); W – глубина заложения заряда.

Сейсмозрывное воздействие. В средней и дальней зонах подземного взрыва ($10 \leq \bar{R} \leq 1000$) проявляются особенности распространения волны сжатия в породах. Теперь волна максимальных напряжений сжатия перемещается со скоростью меньшей скорости звука. Это, в свою очередь, является причиной деформации эпюры волны в фазе сжатия. Фронт волны разрушается, сменяясь постепенным нарастанием напряжений в породе. Область наибольших напряжений отстаёт от начала вступления волны нагрузки. Однако и в этом диапазоне расстояний пользуются термином «фронт волны», понимая под этим огибающую поверхность начальных возмущений волны сжатия. Скорость распространения такого фронта равна скорости распространения продольной волны a в породе:

$$a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (2.45)$$

где λ и μ – упругие постоянные Ламе; ρ – плотность.

В дальней зоне $100 \leq \bar{R} \leq 1000$ основной практический интерес представляют скорости движения грунта у поверхности. Максимальное значение их рассчитывается по формуле М.А. Садовского

$$v_{\max} = \frac{4,08}{\sqrt[3]{f(n)}} \frac{\gamma^{\frac{1}{2}}}{\bar{R}^{\frac{3}{2}}} \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.46)$$

где $f(n)$ – функция показателя Горна; γ – удельная масса ВВ, кг/см³; $\bar{R}$ – приведённое расстояние.

Показатель Горна n может быть определён из зависимости

$$\bar{R}_n = 1,2\bar{W} \left[\frac{6,75 \cdot 10^3}{m\bar{W}^3} - 0,4 \right]^{\frac{1}{3}},$$

$$n = \frac{\bar{R}_n}{\bar{W}} = 1,2 \left[\frac{6,75 \cdot 10^3}{m\bar{W}^3} - 0,4 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (2.47)$$

Комплексная функция показателя Горна аппроксимируется при различных значениях n следующими зависимостями

$$\sqrt[3]{f(n)} = \begin{cases} 1,7 & \text{при } n \geq 2 \\ 0,4 + 0,6n^3 & \text{при } 2 \geq n \geq 1 \\ 1 & \text{при } n < 1 \end{cases}. \quad (2.48)$$

Множитель m в формуле (2.47) согласно Г.И. Покровскому может быть выражен через категорию прочности породы N

$$m = 0,80 + 0,085N,$$

где N – категория прочности породы, которая варьирует в диапазоне от 1 до 16.

Для тротила с плотностью 1600 кг/м³ формула Садовского принимает вид

$$v_{\max} = \frac{163}{\sqrt[3]{f(n)}\bar{R}^{1,5}} \text{ (м/с)}.$$

Согласно данным США величина ускорения частиц грунта у свободной поверхности может быть рассчитана по формуле

$$Ag = 6,3 \frac{Fk}{\rho R_{0з}} \left[\frac{38,4 \cdot 10^4}{\bar{R}^4} + \frac{0,17 \cdot 10^2}{\bar{R}^2} + \frac{0,31}{\bar{R}} \right], \quad (2.49)$$

где Ag – ускорение, отнесённое к ускорению силы тяжести; $R_{0з}$ – радиус заряда, м; ρ – плотность грунта, кг/м³.

Значения F и k приведены в табл. 2.7 и 2.8.

Последовательность оценки воздействия сейсмовзрывной волны.

Дано:

Расстояние от центра взрыва до исследуемой точки.

Масса заряда и его тротиловый эквивалент.

Характеристика грунта $N(1-16)$.

Глубина заложения заряда W .

Таблица 2.7

Вид грунта	$k_{\text{средний}},$ Па	$a_{\text{min}},$ м/с	$a_{\text{max}},$ м/с	$\rho,$ кг/м ³
Лёсс	600	140	600	1600–1800
Илистая глина	3600	130	900	1700–1900
Ненасыщенная глина	10500	800	1700	1820
Насыщенная глина	70000	1700	2500	2000–2300

Таблица 2.8

Глубина заложения заряда $\bar{W}$	0	3	6	9	12	15
F	0,20	0,46	0,67	0,86	0,96	1

1. Определяем радиус сферического эквивалентного заряда.
2. Определяем приведённое расстояние от центра взрыва до исследуемой точки.
3. Определяем приведенную глубину заложения заряда $\bar{W}$.
4. Для оценки максимальной скорости движения поверхности грунта используем формулу Садовского.
Для этого: определяем показатель Горна из формулы Борескова, подставляя в неё $m = 0,80 + 0,085N$ и W .
5. При полученных значениях показателя Горна определяем комплексную функцию Горна $\sqrt[3]{f(n)}$.
6. Определяем максимальную скорость.
Находим величину перегрузки Ag , определяя F и k из табл. 2.7 и 2.8.
При перегрузке $Ag \leq 0,1$, то есть ускорении грунта выше $0,1g$ (ускорения свободного падения) в стенах зданий и сооружений могут образовываться трещины.

3

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФЕС ПОРОД, ВЫЗВАННЫЕ БУРЕНИЕМ СКВАЖИНЫ, ВТОРИЧНЫМ ВСКРЫТИЕМ СТРЕЛЯЮЩИМИ ПЕРФОРАТОРАМИ

Нефтегазовые пласты относятся к неравновесным системам, которые в стабильном или в одном из метастабильных состояний могут пребывать достаточно долго и переходить из метастабильного состояния в стабильное спонтанно или вынужденно под действием внешнего воздействия. В процессе перехода между метастабильными уровнями или метастабильным и стабильным отмечается миграция пластового флюида от скважины или к скважине.

Наиболее интенсивное воздействие на пласт имеет место при бурении скважины и именно при бурении наиболее вероятен переход между метастабильными уровнями или метастабильным и стабильным. При этом характер последующей фильтрации изменится в огромных объёмах пласта, поскольку весь пласт или большие блоки его характеризуются постоянством термодинамического потенциала до начала разработки месторождения.

Вторичное вскрытие пласта с использованием стреляющих перфораторов не ограничивается формированием перфорационных каналов, пересекающих стенку обсадной трубы, затрубный цементный камень и входящих в пласт на ту или иную глубину. Высокоскоростная струя или пуля, порождающие в породе волны напряжения, могут способствовать переходу между метастабильным и стабильным уровнем или в обратном направлении и качественно изменять последующую фильтрацию флюида, по крайней мере, в локальной зоне вокруг скважины

Кроме того, порода в окрестности скважины переходит в новое напряжённо-деформированное состояние, результатом которого является дилатансия породы или наоборот, – уплотнение.

3.1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФЕС ПЛАСТА ПРИ ВСКРЫТИИ БУРЕНИЕМ

3.1.1 ПЕРЕХОД ПОРОДЫ В НОВОЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

В нетронутом массиве породы на глубине H на площадку с нормальным вектором, параллельным вертикальной оси Z , действует эффективное давление, равное разности горного и пластового давлений

$$p_z = \rho_{\text{п}} gH - p_{\text{пл}}, \quad (3.1)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – усреднённая плотность породы; H – глубина; g – ускорение свободного падения; $p_{\text{пл}}$ – пластовое давление на глубине H .

Боковые давления на площадках, перпендикулярных осям X и Y , в общем случае могут быть не одинаковыми. При равенстве давления в породе напряжению, можно говорить о том, что на глубине H действует комплекс напряжений: σ_z , σ_x и σ_y . Для изотропной среды можно допустить $\sigma_x = \sigma_y$ и $\sigma_z = p_z$. Понятно, что σ_x и σ_y будут составлять только какую-то часть σ_z (рис. 3.1).

Для оценки боковых напряжений рассмотрим некоторые положения теории упругости. При растяжении цилиндрического твёрдого тела силой F по схеме, представленной на рис. 3.2, его длина и диаметр претерпят изменения. Относительные деформации длины и диаметра цилиндра обозначим $\varepsilon_{\text{п}}$ и $\varepsilon_{\text{л}}$, соответственно.

Относительные деформации, выраженные через геометрические размеры цилиндра равны:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ и } \varepsilon_{\text{л}} = \frac{\Delta d}{d_0}.$$

ΔL – суммарное удлинение.

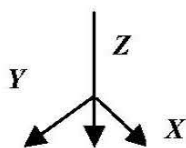


Рис. 3.1. Оси координат в породе

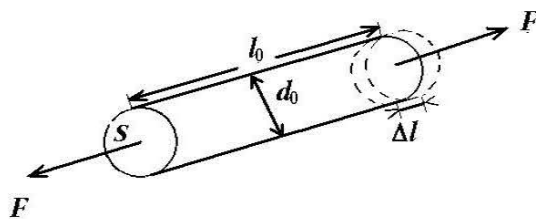


Рис. 3.2. Схема действующей нагрузки

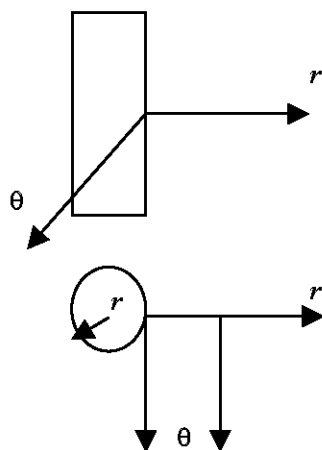


Рис. 3.3. Цилиндрические координаты:
 r – радиальная; θ – тангенциальная

Поперечное сечение цилиндра – S . Тогда действующее напряжение в твёрдом теле будет равно $\sigma = F/S$.

Отношение относительного уменьшения диаметра цилиндра

$\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta d}{d}$ к относительному удлинению цилиндра $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta L}{L}$ называется

коэффициентом Пуассона:

$$\nu = \frac{\Delta d}{d} : \frac{\Delta L}{L}. \quad (3.2)$$

Естественно, боковые напряжения должны выражаться через коэффициент Пуассона.

Для упрощения решения будем считать породу изотропной средой. Тогда в пределах упругих деформаций можно ввести понятие коэффициента бокового распора:

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu}. \quad (3.3)$$

Напряжения $\sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z$. Таким образом, боковые напряжения в нетронутом массиве выражаются через коэффициент бокового распора и напряжение, создаваемое горным давлением.

Бурение скважины сопровождается переходом пород в окрестности ствола в новое напряжённо-деформированное состояние. Теперь приведённые соотношения действительны только в достаточно удалённых от скважины зонах. Для скважины необходимо ввести цилиндрические координаты.

Координата r может вращаться относительно оси скважины, вследствие допущения об изотропности породы.

Координата θ , являясь скользящей, может перемещаться вдоль координаты r , оставаясь перпендикулярной r (рис. 3.3).

Достаточно простые решения могут быть получены для случая отсутствия фильтрации и постоянства скачка давления на стенке скважины, равному разности забойного и пластового давления в скважине на глубине залегания пласта. Решение будет распространяться для области

$$r_c \leq r \leq \infty.$$

$$\sigma_r = \lambda \sigma_z \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2} \right) + a \quad \sigma_\theta = \lambda \sigma_z \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2} \right) - a, \quad (3.4)$$

где $a = \Delta p_p \frac{r_c^2}{r^2}$, $\Delta p_p = p_{\text{заб}} - p_{\text{п}}$ – репрессия, равная разности забойного и пластового давлений (рис. 3.4).

Следует отметить, что для нетронутого массива σ_r и σ_θ при условии $r \rightarrow \infty$, должны быть равны $\lambda \sigma_z$.

Действительно, проверка равенств (3.4) показывает:

при $r = r_c$ $\sigma_r = a$; при $r = \infty$ $\sigma_r = \lambda \sigma_z$;

при $r = r_c$ $\sigma_\theta = 2\lambda \sigma_z - a$; при $r = \infty$ $\sigma_\theta = \lambda \sigma_z$.

Из теории упругости следует закономерность, состоящая в следующем: при действии в среде 2-х главных взаимно перпендикулярных напряжений возникает сдвиговое напряжение τ , которое равно

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r)$$

или

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\lambda \sigma_z \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2} \right) - \lambda \sigma_z \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2} \right) - 2a \right] = \lambda \sigma_z \frac{r_c^2}{r^2} - \Delta p_p \frac{r_c^2}{r^2}. \quad (3.5)$$

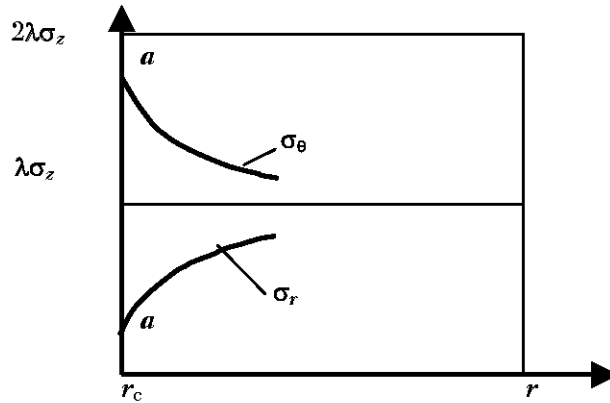


Рис. 3.4. Изменение тангенциальных и радиальных напряжений в породе σ_r , σ_θ

Обозначим известное сдвиговое напряжение τ^* , получим

$$\tau^* = \frac{r_c^2}{r^2}(\lambda\sigma_z - \Delta p_p). \quad (3.6)$$

Для размера зоны дилатансии в пласте из (3.6) получим

$$r^* = r_c \left(\frac{\sigma_z \lambda - \Delta p_p}{\tau^*} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.7)$$

Основная проблема состоит в определении значения предела прочности породы-коллектора на сдвиг τ^* для конкретного пласта в условиях залегания.

Для описания объемных деформаций пористых сред в условиях пластического течения используется следующее реологическое уравнение

$$d\theta = d\theta_{\text{ш}} - d\theta_D = \beta(p)d_p - \lambda(\dot{\epsilon}_r^{0.5})d\tau, \quad (3.8)$$

где $\theta_{\text{ш}}$ – объемная деформация, обусловленная действием шаровой части тензора напряжений; θ_D – дилатантная составляющая объемной деформации среды; $\dot{\epsilon}_r$ – второй инвариант девиатора тензора скоростей деформаций; λ – скорость дилатансии. Вычитаемое в правой части выражения представляет собой дилатантную составляющую деформации в функции от сдвигового напряжения. Переходя к теории конечных деформаций, величину θ_D можно представить в виде

$$\theta_D = \lambda(\dot{\epsilon}_r^{0.5})\Delta\tau = \Phi \cdot \Delta\sigma_p^{0.5}, \quad (3.9)$$

где Φ – некоторая функция; σ_p – второй инвариант девиатора тензора напряжений.

3.1.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДИЛАТАНСИИ

Переход породы в окрестности скважины в новое напряженно-деформированное состояние может сопровождаться следующими эффектами: уменьшением ее объема за счет сокращения порового пространства; дилатансией (увеличением объема породы) за счёт развития в кристаллах или матрицах породы дефектов (дислокаций и др.) и соответственно обретения поверхностью минералов нового физического состояния.

Для разведки и разработки месторождений углеводородов важно установить основные закономерности уплотнения и дилатансии пород в зависимости от их состава, характера насыщения и исходных фильтрационно-емкостных свойств.

В стендовых условиях склонность пород к уплотнению и дилатансии на образцах, отобранных в скважинах, может быть исследована только на качественном уровне. Поэтому была принята система достаточно простого нагружения цилиндрических образцов, обеспечивающая в то же время необходимые условия для возникновения в породе сдвиговых напряжений.

Для условий нагружения цилиндрического образца породы по оси и боковой поверхности

$$\sigma_p = 0,33(\sigma_1 - \sigma_3)^2, \quad (3.10)$$

$$\sigma_p^{0,5} = 0,577(\sigma_1 - \sigma_3) = 1,15 \cdot 0,5(\sigma_1 - \sigma_3).$$

Введя обозначение $K_D = 1,15\Phi$, получим $\theta_D = K_D \Delta\tau$, где K_D – коэффициент дилатансии, определяемый экспериментально.

Для экспериментальных исследований деформации горных пород с одновременным контролем их ФЕС была разработана и создана установка, в которой к образцу породы могли прикладываться высокие нагрузки, формирующие в нем сложное напряженное состояние. Одновременно установка позволяла с высокой точностью определять изменение порового объема образца породы.

Для этих целей использовался микропресс. Гидравлическая система обеспечивала боковое обжатие цилиндрического керна до 150 МПа и осевое сжатие до 250 МПа. Давление в поровом объеме образца создавалось независимо от действующих нагрузок на его торцы и боковую поверхность. В ходе экспериментов было установлено, что при равенстве бокового и осевого давлений, действующих на образец и достигающих значения 170 МПа, происходит только уплотнение породы независимо от ее исходных свойств. Дилатансия породы отмечалась только при неравномерном статическом нагружении, когда отношение бокового давления к осевому не превышало 0,25. Диапазон неравномерности нагружения в экспериментах варьировал от нуля (боковой обжим образца отсутствовал) до единицы (давления, действующие на боковую поверхность образца и его торцы были одинаковыми).

На основе анализа результатов проведенных исследований наиболее четкая зависимость для однотипных песчаников и алевролитов одного месторождения установлена между величиной дилатансионного разуплотнения и содержанием глинистого цементирующего вещества.

Измерение коэффициента проницаемости на образцах осадочных пород по азоту или жидкости проводилось путем измерения расхода флюида вдоль оси керна при постоянстве давлений на

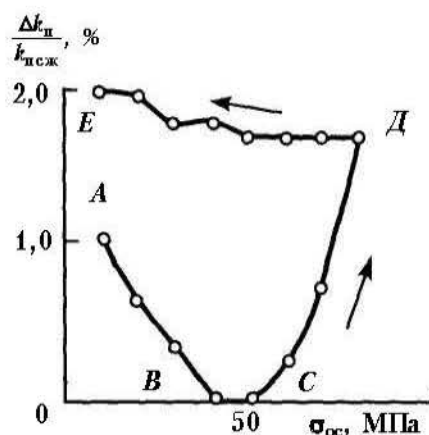


Рис. 3.5. Изменение коэффициента пористости в области уплотнения и дилатансии при неравномерном всестороннем сжатии

входе и выходе из образца. При определении изменения проницаемости породы по газу деформации подвергались сухие образцы пород. Проницаемость по жидкости определялась при насыщении породы 5-процентным водным раствором NaCl и деформации образцов до достижения максимального значения дилатансии именно при таком состоянии насыщения. При этом промежуточные замеры проницаемости осуществлялись по водному раствору NaCl, и только на конечной стадии проницаемость определялась по керосину.

На рис. 3.5 приведена типичная зависимость изменения пористости в области уплотнения и дилатансии породы при неравномерном всестороннем сжатии. При достижении критического напряжения в точке C происходит спонтанное увеличение порового объема.

Полимиктовый песчаник мелкозернистый, однородный насыщенный раствором NaCl 10 г/л; $k_{п0} = 14,8\%$ при $p_t = 10$ МПа, $p_n = 6$ МПа – внутрипоровое давление;

$k_{псж}$ – значение пористости при максимальном уплотнении породы (в точке B);

$\sigma_{ос}$ – напряжения, действующие по оси зерна;

AB – область уплотнения породы;

CD – область дилатансии породы;

DE – область разгрузки породы.

Одновременно с увеличением пористости, абсолютное значение которой составляет доли или единицы процента, происходит возрастание проницаемости в 10–1000 раз, что и отражено на рис. 3.6.

Снижение осевого давления не сопровождается увеличением проницаемости. Более того, временная полная разгрузка от гидроробжима и последующее восстановление нагрузки, соответствующей области дилатансии, не приводит к восстановлению аномально высокой проницаемости.

На основе обобщения результатов стендовых исследований

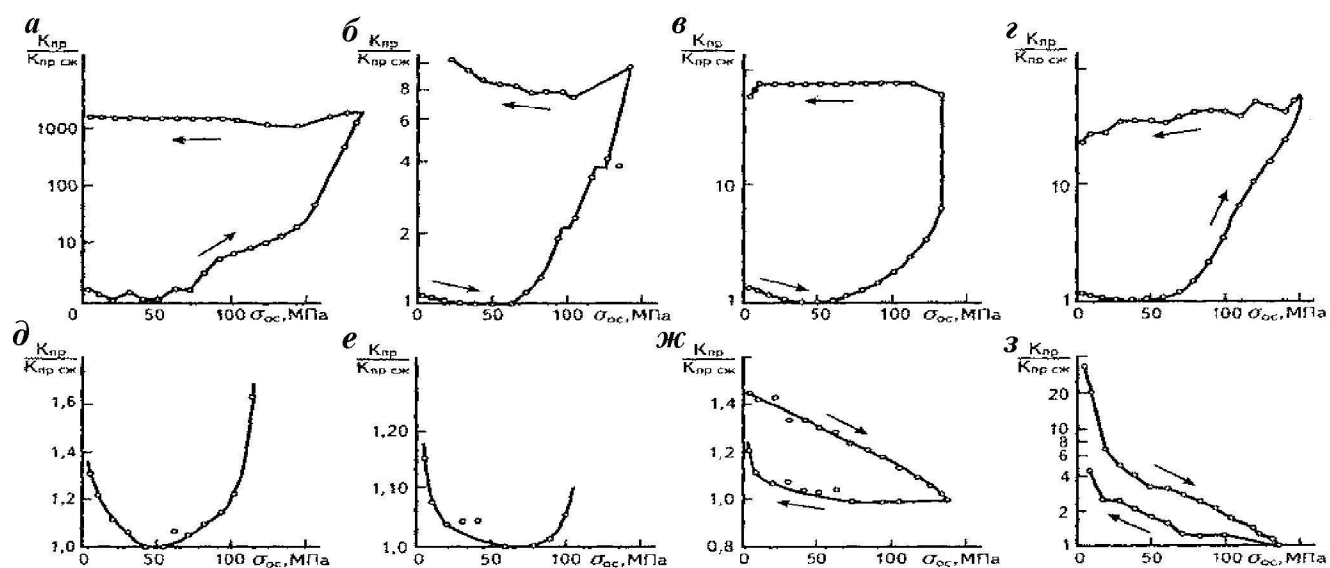


Рис. 3.6. Изменение коэффициента проницаемости породы по воздуху в области дилатансии и компрессионного уплотнения при боковом давлении 10 МПа:
a – песчанник карбонатный, $k_n = 9,7\%$; *б* – то же, $k_n = 13,0\%$; *в* – песчанник с кремнистым цементом, $k_n = 11,3\%$; *з* – то же, $k_n = 5,8$;
д – кварцевый песчанник, $k_n = 12,2\%$; *е* – аркозовый песчанник, $k_n = 14,3\%$; *ж* – полимиктовый песчанник с глинистым цементом, $k_n = 18,0\%$; *з* – песчанник с карбонатным цементом, $k_n = 14,6\%$

выполнена классификация пород неокомских и юрских отложений по их склонности к дилатансии. Наиболее высокая склонность к дилатансии отмечается у сильно уплотненных алевролитов и аргиллитов. Для уплотнённых глин и других плотных пород наличие дилатансии не установлено, но вероятность такого эффекта достаточно велика, учитывая упрощённую нагрузку на образцы, узкий спектр состава насыщающего флюида и т.п.

В табл. 3.1 дана классификация некоторых пород-коллекторов по склонности их к дилатансии.

Учитывая тот факт, что порода не претерпевает разрушения и проходное сечение поровых каналов изменяется незначительно, можно предполагать, что увеличение или уменьшение фильтрационного потока через керн при дилатансии связано с обретением поверхностью минералов нового физического состояния, которое поддерживается горным давлением или, применительно к нашим опытам, гидрообжимом. Следовательно, дилатансия, сопровождающаяся значительным увеличением или снижением проницаемости, не связана с простым механическим переуст-

Таблица 3.1

Классификация пород-коллекторов неокомских и юрских отложений по их склонности к дилатансии

Группа пород	Способность к дилатансии	Горные породы	k_n , %	$\frac{k_{nd}}{k_{псж}}$, %	$\frac{k_{prd}}{k_{пр}}$	Класс коллектора	
						По Ханину А.А.	ВНИПИ-взрыв.
I	Недилатирующие.	Несцементированные пески, илы	20–35	–	–	I	I
II	Слабая	Слабо уплотн. песчан. алевролит породы	18–25	0	1–1,2	II–III	I
III	Умеренная	Уплотн. песчан. алевролит породы, поров. гл. цементом	13,5–18	≤ 5	1,2–2	III–IV	II
IV	Средняя	Уплотн. песчано-алеврит породы, порово-базальн. цемент	9–13,5	5–10	2–5	IV–V	II
V	Высокая	Сильно уплотн. алевролиты и аргилл.	5–9	10–20	$5 \cdot 10^N$	V–VI	III

Примечание: n – кратность увеличения проницаемости породы после дилатансии; Δk_{nd} – максимальное изменение пористости породы за счет дилатансии; k_{prd} – максимальная проницаемость породы за счет дилатансии; k_n , $k_{пр}$ – исходные значения пористости и проницаемости породы.

ройством порового пространства, но является следствием перехода системы порода – насыщающий флюид в метастабильное состояние.

Зона существенных преобразований фильтрационно-емкостных свойств породы в результате перехода последней в новое, напряжённо-деформированное состояние будет простирается вглубь пласта на глубину, зависящую от соотношения сжимающих напряжений и предела прочности на сдвиг τ^* в конкретной породе при комплексе пластовых условий.

Предел прочности на сдвиг не только пород, но даже искусственно выращенных монокристаллов зависит от очень многих факторов и варьирует в очень широком диапазоне. Так, для монокристаллов он может составлять всего лишь тысячную долю предела прочности на сжатие. Поэтому зона преобразования ФЕС может простирается на многие метры от стенки скважины.

Выводы

1. Теоретический анализ изменения напряжённо-деформированного состояния пласта в результате бурения скважины показал возможность уплотнения или дилатансии породы-коллектора.

2. Экспериментально в условиях стенда на качественном уровне установлена склонность юрских и неокотских отложений к дилатансии или уплотнению. Несмотря на малые изменения абсолютных значений пористости при дилатансии кратность увеличения проницаемости может достигать 100–1000 раз.

3. Дилатансия, сопровождающаяся значительным увеличением или снижением проницаемости, не связана с простым механическим переустройством порового пространства, но является следствием перехода системы порода – насыщающий флюид в метастабильное состояние, которое сохраняется благодаря действию горного давления (в стенде – гидрообжима).

4. При временной разгрузке керна от гидрообжима аномально высокая проницаемость, достигнутая при статической дилатансии, не сохраняется.

5. Вследствие неопределённых преобразований керна в процессе выбуривания и разгрузки его от горного давления, стендовые исследования не позволяют оценить проницаемость, которая возникнет в результате дилатансии породы в пластовых условиях.

3.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОДЫ-КОЛЛЕКТОРА, ВЫЗВАННОЕ АДСОРБЦИЕЙ ФЛЮИДОВ

3.2.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АДСОРБЦИИ

В цепи различных процессов в пласте и на его границах важнейшим звеном является адсорбция флюидов. Следует различать два типа адсорбции: физическую и химическую. Различие между физической и химической адсорбцией состоит в различии тех сил, которые удерживают адсорбированную молекулу на поверхности твёрдого тела. Силы электростатического происхождения, такие как силы Ван-дер-Ваальса, силы электростатической поляризации, силы электрического изображения ответственны за физическую адсорбцию. Если действующие силы – химической природы (силы обменного типа), то такая адсорбция называется химической. В этом случае адсорбция представляет собой химическое соединение молекулы флюида с твёрдым телом. Энергия связи адсорбированной молекулы с поверхностью твёрдого тела в случае физической адсорбции составляет 0,01 эв и только в редких случаях может достигать 0,1 эв. Считая энергию связи ε при физической адсорбции равной 0,05 эв, из соотношения

$$\varepsilon = kT, \quad (3.11)$$

где k – постоянная Больцмана, получим предельную температуру, выше которой тепловые колебания разрушат адсорбцию. Такая предельная температура соответствует 70–80 °С.

При химической адсорбции энергия связи может достигать 1 эв. Конечно дело не только в разнице величин энергии связи, но и в принципиальном различии подходов к рассмотрению взаимодействия адсорбированных молекул с твёрдой поверхностью и между собой. В случае физической адсорбции адсорбируемая молекула и решётка адсорбента могут рассматриваться как две независимые системы. Это же относится и к взаимодействию между адсорбированными молекулами. При химической адсорбции адсорбированная молекула и решётка образуют единую квантовомеханическую систему и должны рассматриваться как одно целое. Для вопросов гидродинамической связи скважины с пластом огромный интерес представляет хемосорбция, так как обменное взаимодействие между хемосорбированными молекулами пластового флюида может оказаться определяющим в возможности самой фильтрации.

Как правило, химическая адсорбция является активированной адсорбцией. То есть она требует некоторой предварительной затраты энергии, которая потом с избытком возвращается после акта адсорбции.

В начале процесса адсорбции, до тех пор пока можно пренебрегать десорбцией, для скорости адсорбции имеем

$$\frac{dN}{dt} = N^* s \alpha \chi p, \quad (3.12)$$

где N – число адсорбированных молекул данного сорта; N^* – общее число адсорбционных центров на единице поверхности; p – давление во флюиде или поровое давление; s – эффективная площадь адсорбированной молекулы,

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi M k T}}. \quad (3.13)$$

Здесь M – масса адсорбированной молекулы; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана. При активированной адсорбции полагают

$$\chi \approx e^{-\frac{E}{kT}}. \quad (3.14)$$

Множителем χ обеспечивается быстрое возрастание скорости адсорбции с температурой. Этому же способствует снижение энергии активации с ростом температуры. Большая скорость адсорбции может быть достигнута и в результате повышения общего числа адсорбционных центров на единице поверхности минерала вследствие деформации породы под действием изменяющегося эффективного давления или воздействия ударных волн при перфорации.

Наряду с изменением свойств хемосорбированного флюида в тонкой плёнке на поверхности твёрдого тела, изменяются свойства и самого твёрдого тела, модифицированные присутствием адсорбированных молекул. Адсорбированные частицы рассматриваются как примеси, внедрённые в поверхность кристалла или, другими словами, структурные дефекты. При такой трактовке адсорбированная частица и решётка адсорбента представляют собой единую квантовомеханическую систему, и, соответственно, адсорбированные частицы становятся активными участниками всего хозяйства решётки. Различие между «биографическими» дефектами, присутствующими на любой реальной поверхности, и адсорбированными частицами состоит только в том, что адсор-

бирова́нные частицы способны приходить на твёрдую поверхность и уходить с неё. Адсорбированные частицы, как активные участники хозяйства решётки минералов, оказывают влияние на то энергетическое состояние поверхности минералов, которое реализуется при дилатансии породы и в значительной мере определяет её фильтрационные свойства.

Для хемосорбированных частиц, находящихся на достаточно большом расстоянии друг от друга, когда их электронные оболочки не перекрываются и непосредственное обменное взаимодействие между ними отсутствует, на поверхности твёрдого тела становится возможным дальнедействующее обменное взаимодействие, которое осуществляется через кристаллическую решётку. Суть такого взаимодействия состоит в том, что валентные электроны адсорбированных атомов затягиваются в кристаллическую решётку тела и размазываются внутри решётки в достаточно большой области. При этом электронные облака адсорбированных атомов перекрываются, что и свидетельствует о возникновении дальнего обменного взаимодействия между атомами. Дальнее обменное взаимодействие приводит к образованию ассоциата, то есть системы, в которой активными участниками являются молекулы флюида и адсорбционные центры твёрдой поверхности минералов. В ассоциате невозможно создать стационарный градиент давления или температуры, поскольку это эквивалентно ситуации, когда части одной и той же молекулы имели бы различную энергию. Поэтому созданный внешними силами градиент давления ликвидируется самим ассоциатом и пути ликвидации зависят от характера обменного взаимодействия в нём. Так при преобладании сил притяжения между частицами и приложении внешнего давления к границе ассоциата будет происходить сжатие системы до достижения в ней величины приложенного давления. Иначе говоря, движение ассоциата будет происходить в сторону большего значения давления. В том случае, когда между частицами преобладают силы отталкивания, приложение внешнего давления вызовет мгновенный отток ассоциата от зоны увеличенного давления или, другими словами, возникнет сверхтекучесть флюида.

Образование ассоциата из хемосорбированных молекул насыщающего флюида и массоперенос в нём при создании скачка давления на границе сопровождается возникновением преимущественного направления также и связанных колебаний центров адсорбции. В первом приближении этот процесс можно представить в виде распространения в ассоциате набора гармонических упругих волн, имеющих различные частоты. В квантовой теории этим волнам сопоставляются квазичастицы – фононы. Фононы характеризуются энергией $h\nu$ и импульсом

$$p_i = \frac{h\nu_i}{v}, \quad (3.15)$$

где h – постоянная Планка; ν – частота тепловых колебаний центров адсорбции; v – скорость звука в породе.

Если колебания основной массы центров адсорбции совпадают по фазе и действие импульсов фононов направлено в сторону фильтрации флюида, то движение адсорбционных плёнок будет характеризоваться сверхтекучестью. Если колебания основной массы центров адсорбции совпадают по фазе, но действие импульсов фононов противоположно направлению фильтрации, то движение адсорбционных плёнок будет препятствовать фильтрации флюида или сделает её вообще невозможной в узких порах. В более широких порах при установившейся затрудненной фильтрации малейшее снижение градиента давления будет сопровождаться выравниванием 2-х противоположно направленных потоков. Один из них соответствует нормальной фильтрации, другой, направленный в противоположную сторону, является следствием образования ассоциата. При значительном снижении градиента давления поток флюида–участника ассоциата превзойдёт нормальный фильтрационный поток.

Ликвидации созданного внешними силами градиента давления способствует и теплоперенос, осуществляемый фононами. При этом в породе-коллекторе возникнет перенос энергии от стенки скважины в глубь пласта или к стенке скважины из объёма породы.

В первом случае будет иметь место снижение температуры прискважинной зоны пласта, в то время как во втором случае – повышение температуры из-за достижения максимальной амплитуды колебаний узлов на границе пласта, вплоть до разрушения минералов. При этом текущая граница между зоной разрушения и неизменённой породой будет продвигаться вглубь породы, поскольку разрушенная порода приобретает другие свойства.

Процесс решётчатой теплопроводности может быть рассмотрен как перемещение фононов по кристаллу. В рассматриваемых случаях длина свободного пробега фононов будет стремиться к бесконечности. В этой связи, коэффициент теплопроводности K , выражаемый через теплоёмкость единицы объёма – c , скорость звука – v , и среднюю длину свободного пробега фононов $\bar{\lambda}$, как

$$K = \frac{1}{3}cv\bar{\lambda}, \text{ также будет стремиться к бесконечности.}$$

Таким образом, при выстреле перфоратора и сдвиге флюида относительно твёрдой поверхности, в минералах породы разви-

ваются процессы, способные вызвать понижение или повышение температуры скважинной жидкости в интервале перфорации.

Ещё один эффект будет иметь место при выстреле перфоратора. При распространении фононов от скважины в глубь пласта звук от выстрела будет поглощаться пластом, что приведёт к отсутствию акустического сигнала на устье скважины.

3.2.2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АДСОРБЦИИ НА ЗАПАСЁННУЮ ЭНЕРГИЮ В СКЕЛЕТЕ ПОРОДЫ

В нулевом приближении минералы породы можно представить как совокупность малых сфер. Каждая сфера за счет адсорбции флюида на ее поверхности будет расширяться под действием собственных сил упругости и изменять свой объём. Для отдельной частицы можно записать известные соотношения:

$$\beta dp = \frac{dV}{V} \quad (3.16)$$

и

$$p = \frac{2\omega}{r}, \quad (3.17)$$

где β – сжимаемость твердого тела; ω – удельная поверхностная энергия сферы; r – радиус твердой частицы; p – избыточное давление, возникающее из-за кривизны поверхности; V – объем частицы.

Дифференцируя (3.17), получим

$$dp = \frac{2d\omega}{r} + \frac{2\omega dr}{r^2}. \quad (3.18)$$

Из (3.16) и (3.18) после совместного решения получим

$$-\frac{2\omega_0}{r_0 + \Delta r} + \frac{2\omega_0}{r_0} - \frac{3\Delta r}{\beta r_0} - \frac{2\Delta\omega}{r_0} + \frac{2\Delta\omega}{r_0 + \Delta r} - \frac{2\Delta\omega}{r_0} = 0. \quad (3.19)$$

При условии $\Delta r \ll r$ из (3.19) получим соотношение между относительным изменением объема минерала и изменением его удельной поверхностной энергии:

$$\varepsilon_v = 3 \frac{\Delta r}{r_0} = -2\beta \frac{\Delta\omega}{r_0}. \quad (3.20)$$

Расширение породы будет тем больше, чем значительней изменение $\Delta\omega$.

В том случае, когда расширение минералов несущего скелета происходит в условиях действия горного давления, порода при-

обретает запас энергии. Именно эта запасённая энергия расходуется на упорядоченное движение флюида в поровых каналах и теплоперенос в минералах породы.

Что касается расклинивающего давления, то оно, по-видимому, во многих случаях будет превалирующим в процессе накопления породой запасённой энергии. Однако оценка такой энергии связана с принципиальными трудностями.

3.2.3. СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОДВИЖНОСТЬ ФЛЮИДОВ В ПЛАСТОВЫХ УСЛОВИЯХ

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной установке, позволяющей изучать переходные процессы в образцах пород в условиях действия высоких пластовых и горных давлений. Необходимость создания такой установки обосновывалась очень низким уровнем знаний в области влияния на фильтрационные свойства пластов кратковременных интенсивных нагрузок при первичном и вторичном вскрытии. Установка такого плана «Поток» впервые была разработана и изготовлена под руководством и при непосредственном участии И.Н. Гайворонского. Заполняя сосуд высокого давления различными «перфорационными» жидкостями, создавая на керн нагрузки, действующие в реальной скважине (пластовое и горное давление), и используя однозарядный корпусный перфоратор, данная установка позволяет прогнозировать качество гидродинамической связи скважины с пластом, которое будет получено в реальной скважине. В установке «Пласт», разработанной под руководством В.С. Замахаева [12], осуществлялась фильтрация не только жидкостей, но и газов, а электроввод с разделением сигналов позволял не только подавать электрический импульс на подрыв заряда, но и регистрировать электрический сигнал от термонапы при изменении её температуры (рис. 3.7).

Сложность моделирования переходных процессов состояла в следующем:

- помещение образца породы в кернодержатель установки и создание нагрузки, моделирующей горное давление, уже является сильным возмущением, способным необратимо изменить систему порода – насыщающий флюид;
- последующие сравнительно слабые воздействия на образец породы в кернодержателе могут вызвать слабую, не подлежащую регистрации реакцию;
- из-за ограниченных размеров образцов пород, используемых в экспериментах, переходные процессы будут протекать в течение очень короткого времени и абсолютные значения эффектов будут не сопоставимо низкими.

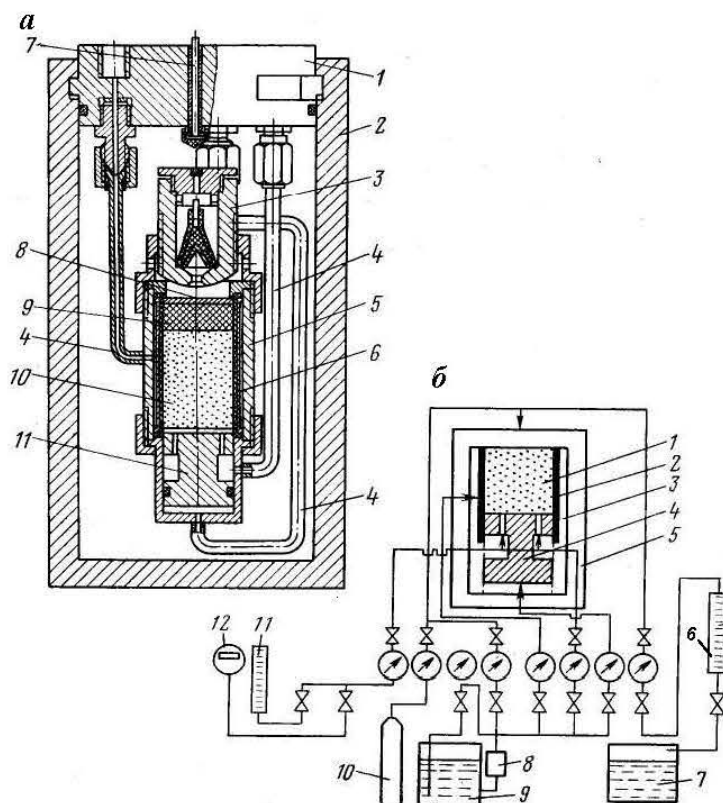


Рис. 3.7. Установки «Поток» и «Пласт»:

а — схема установки «Поток»: 1 — затвор, 2 — корпус сосуда высокого давления, 3 — однозарядный макет перфоратора, 4 — трубопроводы для подачи жидкости, 5 — корпус комбинированной мишени (кернодержатель), 6 — резиновая манжета с металлической обоймой для бокового гидрообжима, 7 — электроввод, 8 — стальной диск, 9 — цементный диск, 10 — керн горной породы, 11 — поршень для создания осевого гидрообжима и через него внутрипорового (пластового) давления, *б* — схема установки «Пласт»: 1 — образец породы (керна), 2 — резиновая манжета с металлической обоймой для бокового гидрообжима, 3 — корпус кернодержателя, 4 — поршень для осевого гидрообжима и фильтрации флюида через него, 5 — сосуд высокого давления, 6, 11 — измерительные емкости, 7 — сливная емкость, 8 — гидронасос высокого давления, 9 — исходная емкость, 10 — газовый баллон, 12 — газовый счетчик

В опытах использовались искусственные керны цилиндрической формы длиной 150–200 мм и диаметром 90 мм, изготовленные из смеси песка и маршаллита (молотого кварца) с добавлением в качестве связующего материала жидкого стекла. После уплотнения смеси в разъемных пресс-формах керны подвергали

предварительной сушке и обжигу по ступенчатому графику набору температуры с окончательным обжигом при температуре 800–900 °С.

Все используемые для изготовления кернов материалы были гидрофильными, что давало уверенность в получении пористых сред с гидрофильной поверхностью.

Основным критерием, служащим для сортировки искусственных кернов, являлось изменение проницаемости образцов по азоту после закачки и вытеснения 5%-ного водного раствора NaCl. Абсолютная и фазовая проницаемости определяли после помещения керна в кернодержатель, нагружения керна боковым и осевым гидрообжимом, моделирующим горное давление. По результатам таких испытаний керны были разделены на три группы (А, Б и С). В табл. 3.2 приведены значения исходной абсолютной проницаемости кернов по газу и относительной проницаемости $k_{пр}/k_{про}$ групп А и Б.

Свойства кернов группы А соответствовали свойствам уплотненных песков.

Причиной сильного отличия свойств искусственных песчаников групп А и Б могли быть только режимы ступенчатого нагрева и последующего охлаждения при предварительной сушке перед окончательным обжигом. Можно утверждать, что несмотря на гидрофильность образцов групп А и Б, основное отличие состояло в образовании на поверхности минералов группы А адсорбированных слоёв молекул воды. Отсутствие адсорбционных центров на поверхности минералов в образцах группы Б и, по-видимому, очень большое значение энергии активации не позволило хемосорбироваться молекулам воды на поверхности минералов несмотря на предшествующую закачке воды и деформацию керна гидрообжимом. Некоторую ясность такого преобразования поверхности минералов группы Б внесли исследования с образцами группы С.

Таблица 3.2

Влияние остаточной воды на проницаемость искусственных кернов

Группа образцов	Исходная проницаемость, $k_{про}, 10^{-12} \text{ м}^2$	Относительная проницаемость $k_{пр}/k_{про}$
А	1,30	0,80
	1,20	0,70
	1,20	0,75
	0,40	0,65
	0,13	0,575
Б	1,20	1,00
	0,40	1,00
	0,13	0,92
	0,12	1,00

Таблица 3.3

Сверхтекучесть коллоида (фильтрата глинистой промывочной жидкости)
в образцах группы С

№ п/п	Проницаемость при фильтрации коллоида (фильтрата глинистого раствора) $k_{пр}^*, 10^{-12} \text{ м}^2$	Проницаемость $k_{пр}^*, 10^{-12} \text{ м}^2$ (после ликвидации сверхтекучести)	
		По воде	По газу
1	>20	1,30	1,40
2	>10	1,15	1,20
3	>10	0,80	0,80
4	>10	0,50	0,50
5	> 5	0,34	0,35
6	> 5	0,17	0,17

Образцы группы С рассматривались отдельно, поскольку характеризовались сверхтекучестью, которая наблюдалась при фильтрации через них как минерализованной воды, так и фильтрата бурового глинистого раствора. В табл. 3.3 приведены фильтрационные характеристики образцов группы С.

При кольтматации кернов группы С глинистым буровым раствором был отмечен ещё один эффект. Он состоял в том, что даже после формирования глинистой корки большой толщины из неё продолжала вытягиваться жидкая фаза. Процесс длился до тех пор, пока глинистая корка не превращалась в камень. Такая инерционность связана с продолжающимися преимущественно направленными тепловыми колебаниями молекул в поверхностных слоях минералов породы и хемосорбированных слоях флюида. При этом преимущественными силами между молекулами флюида и твёрдого тела являются силы отталкивания.

После разгрузки керна от горного давления, удаления из канала (или торца керна) образовавшегося глинистого камня и повторного создания гидрообжима на смену сверхтекучести приходила обычная проницаемость. При этом образец по адсорбционным свойствам переходил в группу Б.

Применительно к процессу поглощения промывочной жидкости при бурении можно также утверждать, что во многих случаях причиной его является всё та же сверхтекучесть.

Геофизический контроль за процессами, протекающими в пластах при бурении скважины, подтвердил не только явление сверхтекучести в низкопроницаемых пластах, но и инерционность этого процесса.

В разведочной скв. 173 Ем-Ёговской площади после подъёма инструмента с проработкой ствола и выполнения промежуточного каротажа было обнаружено сужение ствола в интервале глубин 2482–2495 м и наличие низкопорового коллектора. На

Рис. 3.8. Пример образования обезвоженной глинистой корки против низкопорового коллектора, обладающего сверхтекучестью. Скв. 173 Ем-Еговской площади

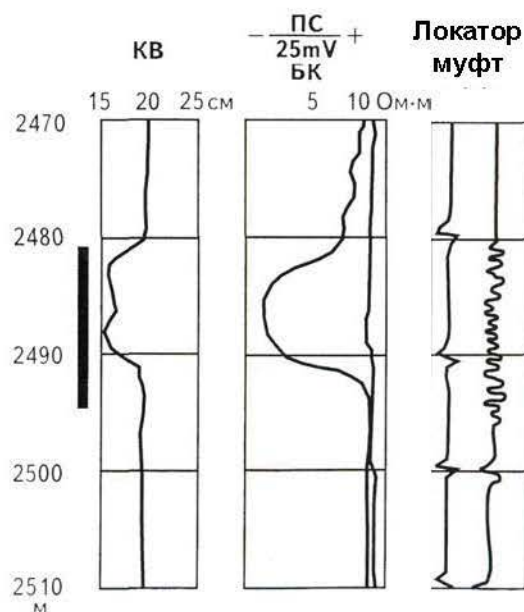


рис. 3.8 приведены результаты геофизических исследований, проведённых в скв. 173 Ем-Еговской площади. Кривые калвернометрии (КВ) и ПС указывают на сужение диаметра ствола скважины на 5 см за счёт формирования толстой обезвоженной глинистой корки. Последующий отток пластового флюида от стенки скважины вглубь пласта и снижение несущей способности породы (в том числе за счёт снижения пластового давления) привели к полной потере проницаемости породы.

Заканчивание скважины было связано с глушением пласта при доведении скважины до проектной глубины, цементированием после спуска обсадной колонны и вторичным вскрытием с использованием стреляющих перфораторов. С учётом очень большого радиуса зоны, характеризующейся потерей проницаемости, вторичное вскрытие пласта перфоратором ПР100 (контроль выполнен локатором муфт) не смогло обеспечить гидродинамическую связь скважины с пластом. Попытки химических и физико-химических обработок пласта также оказались безуспешными.

На рис. 3.9 приведены результаты кольматации глинистым раствором просверленного в искусственном образце группы С канала. В канале из глинистого раствора образовался очень прочный камень, выдерживающий огромную депрессию.

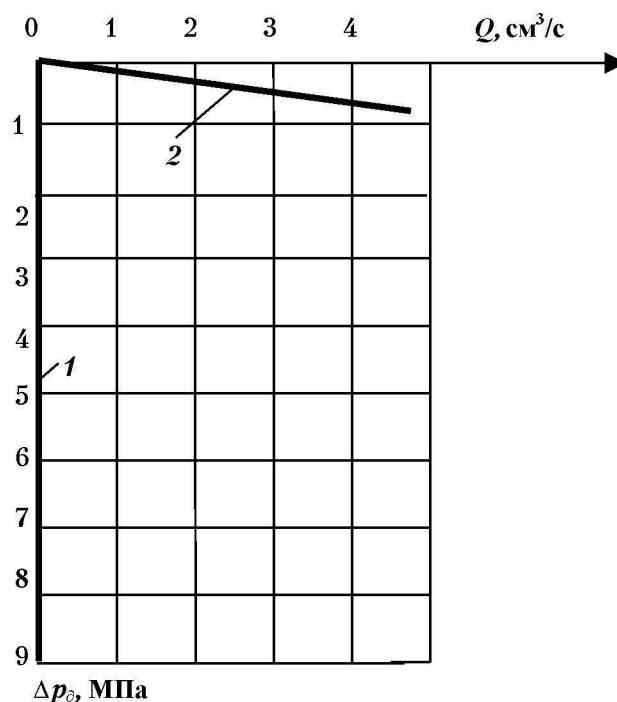


Рис. 3.9. Зависимость расхода керосина Q через керн группы С от величины депрессии Δp_0 после колюматации канала глинистыми растворами: 1 – после колюматации при «нулевой» репрессии; 2 – после механического удаления плотной глинистой корки. Глинистый раствор – 5 % NaCl, 0,5 % CaCl₂, 5 % КССБ

После снятия гидрообжима и рассверливания канала, порода по адсорбционным свойствам перешла в группу Б. То есть произошло разрушение состояния, ответственного за сверхтекучесть флюидов. Аналогичный процесс мог иметь место и при многократных сушках кернов группы Б и «уходе» адсорбционных плёнок и дефектов из минералов керна под действием возникающего в образце термоградиента.

Массоперенос в пористых средах с развитой поверхностью под действием приложенного термоградиента относится к достаточно изученным процессам. Однако, в нефтегазовых пластах приходится иметь дело с несколько иным механизмом массопереноса, хотя в основе его лежат всё те же тепловые колебания молекул.

Обнаруженная в образцах группы С сверхтекучесть флюида могла быть связана только с деформацией керна при гидрообжи-

ме. При этом сам образец группы С до гидрообжима находился в метастабильном состоянии. Обобщая полученные экспериментальные исследования и промысловый опыт, можно утверждать, что многие пласты в условиях залегания находятся в метастабильном состоянии и вскрытие их бурением будет инициировать сложные переходные процессы, в результате которых пласт может сохранить свойства сверхтекучести или утратить их. На рис. 3.10 и 3.11 показана трёхуровневая система, включающая 2 метастабильных уровня (I и II) и уровень стабильного состояния III. Метастабильные уровни соответствуют сверхтекучести I и антитекучести II. Ситуации на рисунках относятся к разным пластам и отличаются различным начальным состоянием системы на высшем энергетическом уровне. На рис. 3.10, а рассмотрен случай вынужденного (или естественного) перехода системы с высшего энергетического метастабильного уровня на средний, характеризующийся антитекучестью, и далее следующего перехода системы в стабильное состояние.

Соответствующее состояние подвижности флюида приведено на рис. 3.10, б. Переход на II уровень (т. А) будет характеризоваться падением подвижности флюида и пульсирующим потоком. Переход в стабильное состояние (т. В) несколько увеличит фильтрацию, но она останется несоизмеримой со сверхтекучестью.

На рис. 3.11 приведён случай, когда на высшем энергетическом метастабильном уровне система характеризуется антитекучестью. Тогда при переходе на более низкий энергетический метастабильный уровень, характеризующийся сверхтекучестью, подвижность флюида возрастёт (т. А) и останется достаточно высокой после перехода системы на стабильный уровень (т. В).

Для переходов между уровнями требуется небольшая энергия. При этом переход осуществляется в огромной зоне пласта, которая, находясь в метастабильном состоянии, характеризуется постоянством термодинамического потенциала во всех точках. Если при ограниченном воздействии пласт не удаётся перевести с одного уровня на другой, то от повторных более интенсивных воздействий следует отказаться. Такие воздействия приведут к разрушению ограниченной зоны пласта вокруг скважины и увеличению или снижению фильтрационных свойств в малой зоне, не оказывающей влияния на работу пласта.

Следствием переходных процессов (по аналогии с процессами в образцах группы С) является и уход нефти и газа от ствола скважины, сопровождающийся в той или иной мере изменением физико-механических свойств породы-коллектора. При этом, в зависимости от степени изменения физико-механических свойств породы-коллектора и проявления горного давления, пласт может

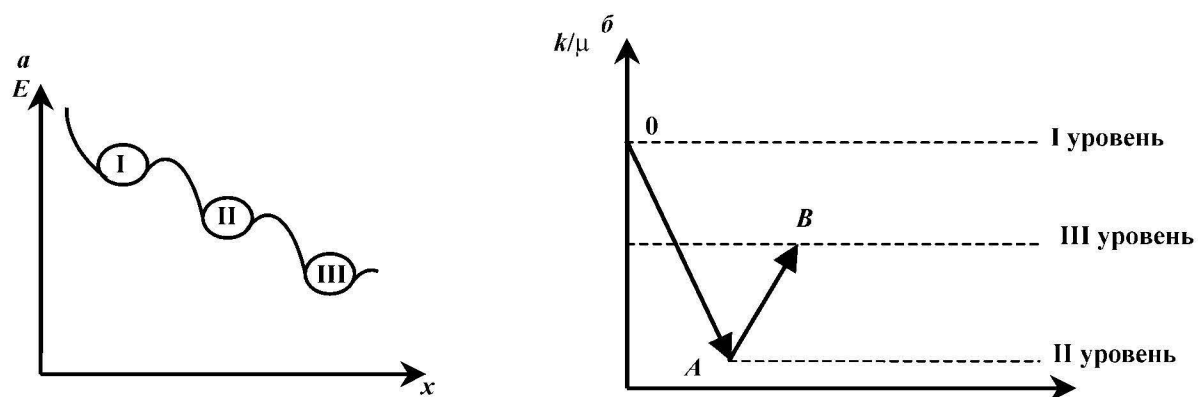


Рис. 3.10. Трехуровневая система метастабильных и стабильного состояния:
 a – энергетические уровни: I – сверхтекучесть, метастабильное состояние; II – антитекучесть, метастабильное состояние; III – ста-
 бильное состояние; δ – соответствующие подвижности флюида

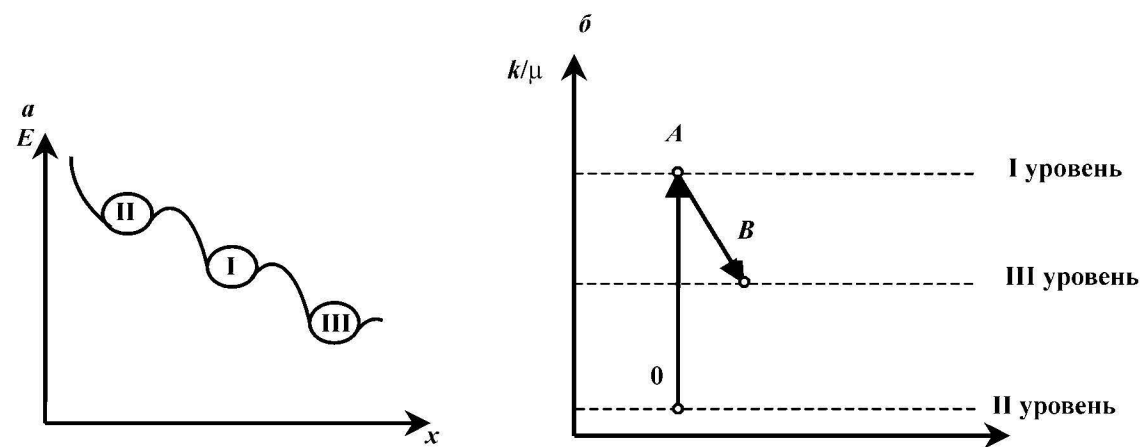


Рис. 3.11. То же, что и на рис. 3.10, но при других начальных условиях

полностью потерять проницаемость или наоборот – катастрофически поглощать скважинную жидкость. В таких случаях приходится иметь дело с размерами зон изменённых фильтрационно-емкостных свойств пласта в окрестности скважины в десятки и сотни метров. Многие из этих преобразований частично или полностью обратимы, но даже для частичного восстановления ФЕС могут потребоваться многие месяцы и годы.

На фоне значительных изменений фильтрационных свойств пласта при первичном вскрытии и непостоянства во времени полученных свойств, эффективность любого способа вторичного вскрытия определяется в том числе и интервалом времени между первичным и вторичным вскрытием.

В табл. 3.4 приведены результаты вторичного вскрытия и испытания пластов на разведочных площадях Хапчагайского месторождения (Республика Саха). В процессе бурения скважин и испытания пластов в открытом стволе была получена следующая информация о пластах: характер насыщения и потенциальная продуктивность. Не установлена несущая способность породы-коллектора в зависимости от эффективного давления (разница горного и пластового давлений) и характера насыщения. Испытания пластов после завершения строительства скважин и вторичного вскрытия кумулятивными перфораторами не обеспечили гидродинамическую связь внутрискважинного пространства с пластом. Безрезультатными оказались и дополнительные кислотные обработки.

Основываясь на изложенных выше соображениях, один из авторов настоящего учебника предложил повторить испытания после достаточно длительной выстойки скважин. Идею удалось реализовать на многих разведочных скважинах и получить положительный эффект. Для чистоты эксперимента использовался один и тот же типоразмер кумулятивного перфоратора: ПКС-80. Особое внимание при проведении опытно-промышленных работ уделялось наличию хотя бы слабой гидродинамической связи скважины с газовым пластом после первого этапа перфорации. При наличии таковой, давление на закрытом устье скважины могло возрастать из-за гравитационной замены жидкости газом. Однако в течение всего периода наблюдений появления газа на устье не наблюдалось. Из этого можно сделать несколько важных выводов. Во-первых, отток газа от стенки скважины изменил физико-механические свойства породы-коллектора в сторону повышения её пластичности и снижения несущей способности. Во-вторых, выстрел кумулятивного перфоратора в породу с изменёнными физико-механическими свойствами не в состоянии создать каналы, обладающие хотя бы низкой пропускной способностью в условиях действия горного давления. В-третьих, возврат

Таблица 3.4

Влияние выстойки скважины на эффективность вторичного вскрытия

Площадь № скв.	Интервал	Результат испытания	Время выстой- ки, мес.	Тип перфора- тора	Результат испытания
Ср. Тюнг 231	3424,8–3439,1	Притока нет	2	ПКС 80	80 ТМ ³ в сутки $D_{шт} = 12$ мм
Пеледуйская 751	1549,0 1557,0	Притока нет	12	ПКС 80	120 ТМ ³ в сутки $D_{шт} = 10$ мм
Хотого-Мур- байская 730	2016,4 2021,6	Притока нет	5	ПКС 80	135 ТМ ³ в сутки $D_{шт} = 10$ мм
Ср. Ботуо- бинская 403	1897,6 1900,0	Притока нет	5	ПКС 80	120 ТМ ³ в сутки $D_{шт} = 10$ мм

Обозначения: $D_{шт}$ – диаметр штуцера; ТМ³ – тысяч кубометров.

газа к стенке скважины через длительный промежуток времени в некоторой степени повышает несущую способность породы и вновь простреленные каналы сохраняют пропускную способность при действии горного давления. Речь, конечно, не идёт о возврате породы к изначальным свойствам.

Облитерация в породах-коллекторах.

Среди известных и достаточно изученных в экспериментальном плане процессов, инициируемых движением флюидов в тонких капиллярах и щелях, следует отметить облитерацию. Этим термином названо явление уменьшения, а во многих случаях полного прекращения течения флюидов через малые проходные сечения. На основе опубликованных сведений это происходит в результате хемосорбции радикалов со свободной валентностью на стенке капилляров и частичного или полного зарастивания проходного сечения. При этом зарастают не только тонкие капилляры, но и щели шириной до 0,1–0,2 мм.

Поверхностный слой металлов и минералов вследствие контакта с жидкостями и газами приобретает свойства полупроводников. Хемосорбция на поверхности полупроводников теснейшим образом связана с электронными процессами как внутри, так и на поверхности этого полупроводникового «чехла». Накопленный экспериментальный материал в области гетерогенного катализа свидетельствует о том, что электронные процессы, разыгрывающиеся в полупроводнике и обуславливающие его электрофизические свойства, в то же время определяют его адсорбционную способность и каталитическую активность. Не представляют исключения и природные породообразующие минера-

лы. Так, например, сухая глина не является катализатором, но будучи увлажнённой, становится катализатором окислительных реакций.

Исследованиями, выполненными авторами данного учебника, установлено, что в основе облитерации и кристаллогидратообразования лежит один и тот же механизм. Аналогично облитерации, при течении газовой смеси через свежизготовленные стальные втулки диаметром до 3 мм отмечалось полное перекрытие проходного сечения образующимися кристаллогидратами. Процесс проходил с обратным гидроударом в манометр. Если в период «молчания» давление на кристаллогидратную пробку быстро снижали на 20–30 %, пробка мгновенно разрушалась и временно до нового заклинивания возобновлялось течение газожидкостной смеси. Дальнейшее движение газовой смеси через втулку длиной 30 мм, при перепаде давления до 1 МПа между её торцами, становилось пульсирующим со скважинностью пульсаций до 10–30 с. Продолжительность периода непрерывного течения газожидкостной смеси через втулку не превышала 5 сек. С повышением перепада давления до 2–3 МПа втулка закрывалась образующимися кристаллогидратами с обратным гидроударом в манометр и скважинность пульсаций возрастала до 10 минут. Некоторые втулки через несколько циклов повышения и последующего понижения давления полностью теряли способность инициировать образование кристаллогидратов. Такого же эффекта можно было добиться путём обработки втулок кислотами.

Таким образом, было показано, что при соответствующей каталитической способности твёрдой поверхности сам процесс движения флюидов порождает заряженные радикалы, которые взаимодействуя между собой и с твёрдой поверхностью образуют объёмные новообразования, в значительной мере препятствующие движению флюидов. Высокие градиенты давления не только обеспечивают формирование новообразований, но и способствуют сохранению этих неустойчивых и малопрочных систем в узких каналах.

Пульсирующий режим фильтрации известен из практического опыта эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Моделировать такой процесс в пористых средах достаточно сложно. Причина этого лежит в сильной зависимости взаимодействия между флюидом и твёрдой поверхностью от предыстории породы, сорбированных газов, состава самого фильтрующегося флюида и т.п. Необратимые изменения свойств минералов при выбурировании кернов создают непреодолимые препятствия для исследования процессов в конкретных пластах при характерных для них термобарических условиях. Поэтому основные закономерности процессов в пластах целесообразно и более эффективно изучать на

искусственных моделях пород. Искусственные керны, изготовленные методом спекания смеси песка, маршаллита и жидкого стекла в отношении облитерации обладали совершенно различными свойствами. Малая часть из них инициировала облитерацию в поровых каналах при фильтрации осветительного керосина и трансформаторного масла. При этом облитерация имела место в зоне, простирающейся от торца вглубь керна не более чем на 3 см. Полная потеря проницаемости кернов за счет отложения асфальтосмолистых веществ происходила после прокачки не более одного литра керосина. После предварительной очистки керосина от асфальтосмолистых веществ серной кислотой процесс облитерации на таких кернах значительно снижался, и требовалось прокачать большие объёмы очищенного керосина (до 20–30 литров), чтобы произошло полное заращивание путей фильтрации. Позитивный эффект отмечался и при введении в неочищенный керосин добавок (в количестве 0,2 %) ионола. В последнем случае для полной потери проницаемости требовалось прокачать через образец объём жидкости в десятки раз больший, чем в случае очищенного керосина без добавок.

3.2.4. КОЛЬМАТАЦИЯ ПОРОД С ВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Исследования по кольматации кернов групп А и Б проводились на установке «Пласт» с использованием глинистых монтмориллонитовых суспензий, обработанных КМЦ и имеющих различную минерализацию. Кольматация и оценка влияния ее на снижение проницаемости кернов осуществлялись путем создания разницы давлений в объеме установки, заполненном глинистой суспензией, и поровом объеме керна. При кольматации перепад давления был направлен из объема установки, заполненном суспензией, в поровый объем керна (репрессия), при оценке влияния кольматации на проницаемость керна – в обратном направлении (депрессия) с использованием в качестве фильтрующей жидкости светильного керосина. Кольматация низкоминерализованными суспензиями плоского торца кернов (групп А и Б) без взрывного воздействия, но с созданием высоких репрессий (до 10 МПа) не сопровождалась негативными последствиями и их проницаемость полностью восстанавливалась до исходной при минимальных депрессиях (с учётом влияния остаточной воды в образцах группы А).

При совмещении кольматации со взрывным воздействием (взрыв производился в среде глинистого раствора) проницаемость образцов группы Б полностью восстанавливалась при создании минимальных депрессий. В то же время образцы группы А при создании перед взрывом репрессии более 2 МПа снижали

свою проницаемость в 2–2,5 раза и не восстанавливали ее при создании депрессий до 7–10 МПа. На рис. 3.12 приведены результаты определения относительного коэффициента проницаемости кернa после кольтматации плоского торца кернa без взрывного воздействия и со взрывным воздействием при различных значениях величины репрессии.

Большим числом опытов доказана возможность восстановления проницаемости кернa путём быстрого временного снятия гидрообжима. При очень медленном снижении гидрообжима, вплоть до половины его первоначального значения, восстановления проницаемости не отмечалось. В то же время создание репрессии на пласт, превышающей 3 МПа с последующим снижением этой репрессии до 0,5–1 МПа с использованием свежей порции глинистого раствора того же состава, что и при взрывной кольтматации, позволяло полностью восстановить проницаемость кернa.

Значительный объём исследований был выполнен на образцах групп А и Б длиной 150–170 мм с просверленным по оси кернa каналом, имеющим длину 80–100 мм, и диаметр – 8–10 мм.

Торец кернa, обращённый к взрыву, закрывался стальным диском с отверстием того же диаметра, что и просверленный канал.

Значение коэффициента продуктивности канала образцов группы А после кольтматации со взрывным воздействием и вызова притока составляло 15–20 % от его первоначального значения.

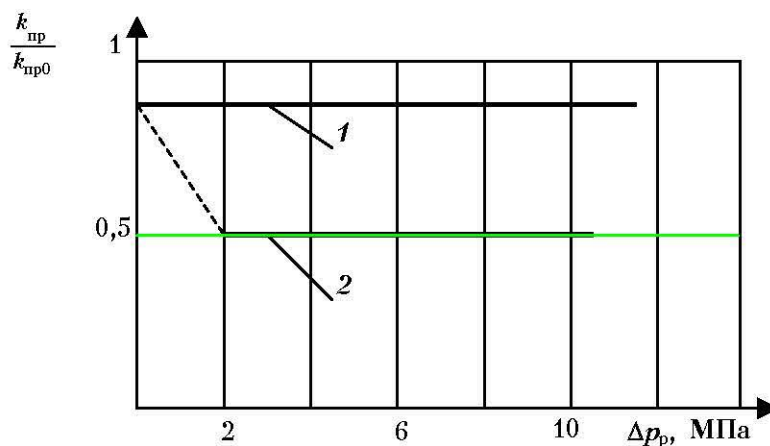
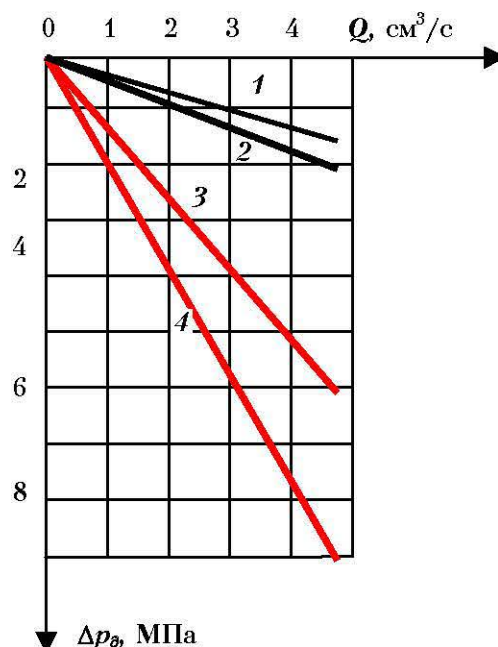


Рис. 3.12. Зависимость относительного коэффициента проницаемости кернa группы А с плоским торцом от величины репрессии без взрыва и при взрыве заряда ВВ:

1 – без взрыва; 2 – со взрывом

Рис. 3.13. Зависимость расхода керосина Q через просверленный канал в образце группы А от величины депрессии Δp_d после кольтматации глинистыми растворами с взрывным воздействием. Минимальная статическая репрессия составляла 2 МПа.

Состав глинистого раствора: 1 – техническая вода; 2 – глинистый раствор 5 % NaCl, 5 % CaCl₂, 5 % КССБ; 3 – глинистый раствор 5 % NaCl, 0,5 % CaCl₂, 5 % КССБ; 4 – глинистый раствор 5 % NaCl, 5 % КССБ



На рис. 3.13 представлены зависимости $Q = F(\Delta p_d)$ для случаев кольтматации глинистыми растворами со взрывным воздействием образцов группы А с просверленным каналом. Опыты проведены при репрессии $\Delta p_d \geq 2$ МПа. Значительное снижение коэффициента продуктивности канала $K = Q/\Delta p_d$ при достаточно большой репрессии при взрыве указывает на разрушение сольватных оболочек у глинистых частиц и, как следствие, осложнение с удалением их из поровых каналов фильтрационным потоком даже при очень больших депрессиях.

Следовательно, взрывное воздействие, совмещённое с кольтматацией, обеспечило переход системы порода – насыщающий флюид в метастабильное состояние, препятствующее фильтрации флюида. Как показали экспериментальные исследования, полученное состояние может сохраняться в течение нескольких месяцев.

Однако коэффициент продуктивности канала достаточно легко полностью восстанавливался методом повышения и последующего понижения давления в канале. При этом репрессия могла не превышать 1–2 МПа и снижение её на 30–40 % уже обеспечивало удаление всех глинистых частиц из поровых каналов и полное восстановление исходного коэффициента продуктивности. Фактически не требовалось изменять направление фильтрации путём создания репрессии с последующей депрессией.

Полученные эффекты не имели бы места без инерционности процессов, связанных с повышением давления в канале. Действительно, повышение давления на глинистую корку приводит к повышению давления в адсорбционных слоях глинистых минералов за счёт перемещения адсорбционных слоёв в зону больших давлений. После снижения давления на глинистую корку движение адсорбционных слоёв остаётся неизменным в течение достаточно длительного времени, что и обеспечивает вынос глинистых минералов из поровых каналов породы. Если бы инерционность процесса отсутствовала, то после снижения давления в канале адсорбционные плёнки вновь перемещались в сторону большего давления, то есть из канала в породу, и вынос глинистых минералов был бы невозможен. В этой связи, потребовалось проведение специальных исследований для оценки инерционности процесса перемещения адсорбционных плёнок после воздействия на них.

Ещё одна проблема состоит в выяснении причин разрушения сольватных оболочек глинистых частиц при взрывном воздействии на систему глинистые частицы – порода.

Введение поливалентных катионов в глинистый раствор оказало сильное влияние на процесс коагуляции со взрывным воздействием. Во-первых, с ростом концентрации хлорида кальция относительный коэффициент продуктивности канала снижался в

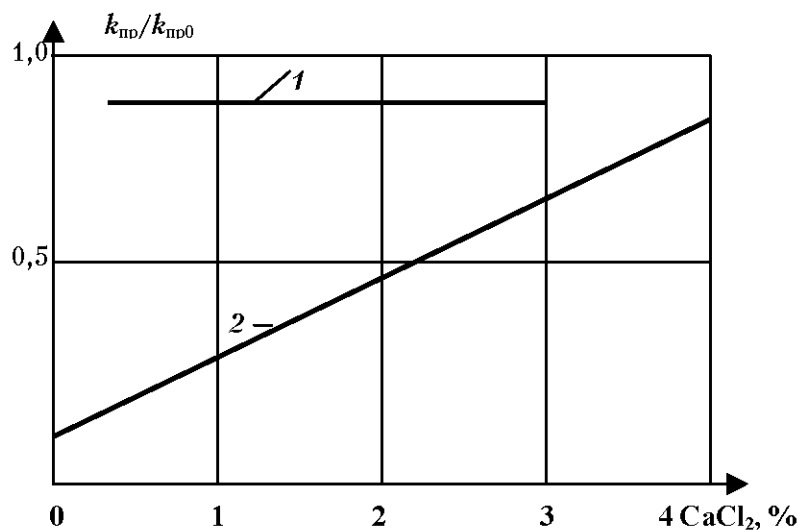


Рис. 3.14. Зависимость относительного коэффициента продуктивности канала образцов группы А от содержания CaCl_2 в глинистой суспензии: 1 – без воздействия взрыва; 2 – с взрывным воздействием

меньшей мере. На рис. 3.14 приведена зависимость величины относительного коэффициента продуктивности канала от содержания в глинистом растворе CaCl_2 .

Во-вторых, полученное снижение коэффициента продуктивности не могло быть восстановлено путём повышения и последующего уменьшения давления в канале. Не оказывала влияния и временная разгрузка керна от гидрообжима. Причиной такого эффекта явилось отложение солей в поровых каналах и на поверхности глинистых частиц.

Переводу системы порода – насыщающий флюид в метастабильное состояние, препятствующее фильтрации флюида, предшествовали переходные процессы, связанные с тепломассопереносом.

3.2.5. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПОРОДАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ВЗРЫВА

После помещения образца породы, насыщенного 5%-ным водным раствором NaCl , в кернодержатель и создания гидрообжима (30–60 МПа), моделирующего горное давление, сосуд высокого давления заполнялся глинистым раствором, обработанным понизителем водоотдачи – КМЦ (1,5 %). Взрывное воздействие осуществлялось при статическом перепаде давления на глинистую корку $\Delta P_p \geq 2$ МПа в сосуде высокого давления, заполненном глинистым раствором. Контролировалось перемещение флюида в керне с помощью сосуда Мариотта, находящегося вне сосуда высокого давления. Трубопровод от кернодержателя подключался к сосуду Мариотта, заполненного подкрашенной жидкостью до уровня 0–0. Само подключение трубопровода осуществлялось после завершения формирования глинистой корки на торце керна и при практическом отсутствии водоотдачи глинистого раствора. Снижение или повышение уровня жидкости в прозрачном капилляре Z при взрыве позволяло судить о направлении перемещения флюида в керне. Схема стенда приведена на рис. 3.15.

В образцах группы А жидкость при взрыве движется к взрыву несмотря на достаточно большую репрессию (рис. 3.16) $\Delta P_p \geq 2$ МПа. Ниже точки L через нижний конец капилляра прорывается воздух. При первом взрывном воздействии интенсивность движения жидкости в пористой среде выше, чем при повторном взрывном воздействии. При использовании образцов группы Б перемещение жидкости при взрывах отсутствует.

Интенсивное движение флюида в керне «к взрыву» сопровождается изменением физико-механических свойств породы в окрестности торца, в сторону которого направлено движение

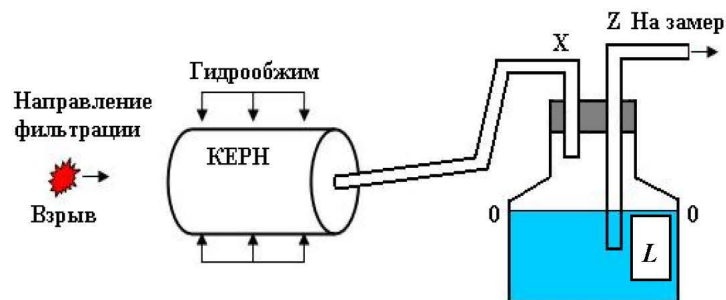


Рис. 3.15. Схема установки для регистрации малых перемещений флюида в керне

флюида. Это обнаружено по окрашиванию слоя минералов в окрестности торца керна при закачке в него газообразного гелия. Известно, что окрашивание минералов в сине-зеленый цвет газообразным гелием имеет место при возникновении в них внутрикристаллических дефектов. Высокая концентрация внутрикристаллических дефектов в минералах приведет к увеличению объема минералов и породы в целом (разрушительной дилатансии) в окрестности торца керна.

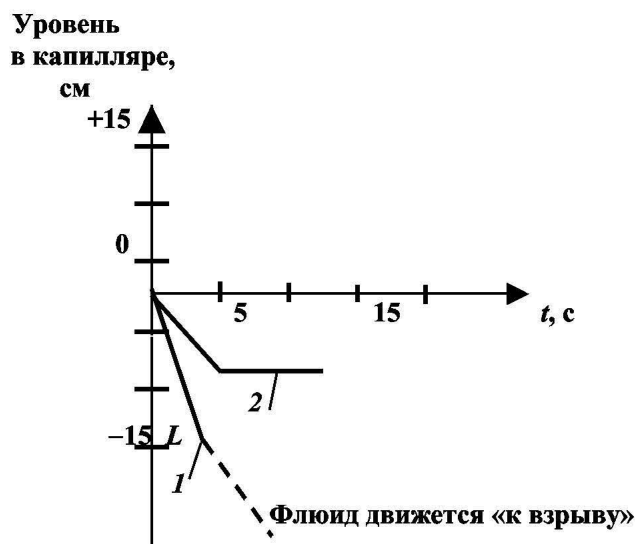


Рис. 3.16. Динамика уровня жидкости в капилляре после взрыва. Образцы группы А:
1 — после 1-го взрыва; 2 — после повторного взрыва. $\Delta p_p \geq 2$ МПа

Образцы группы А

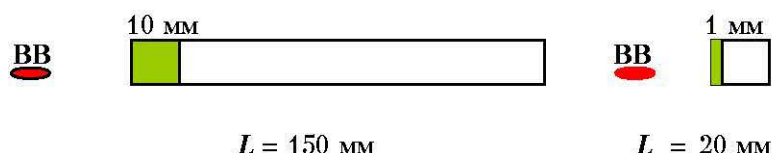


Рис. 3.17. Формирование зон разрушительной дилатансии при взрывном воздействии. Использованы образцы группы А с длиной $L = 150$ мм и $L = 20$ мм, $\Delta p_0 \geq 2$ МПа

На рис. 3.17 представлены результаты исследований по образованию зон разрушительных дилатансий в кернах при взрывном воздействии. Условно показано положение заряда взрывчатого вещества (ВВ) относительно керна и приведена протяженность зоны разрушительной дилатансии в зависимости от длины керна.

В образцах группы Б не было отмечено образования зоны дилатансии даже при увеличении массы ВВ в 10 раз.

Использование в опытах образцов группы А с просверленным каналом длиной 10 см в кернах длиной 15 см показало, что при $\Delta p_0 \geq 2$ МПа и взрывном воздействии вокруг канала возникала не только зона с дефектами в минералах, но и зона разрушения минералов породы. На рис. 3.18 схематично показаны зона разрушения минералов и зона с малой концентрацией дефектов в минералах. Последняя уже при комнатной температуре посте-

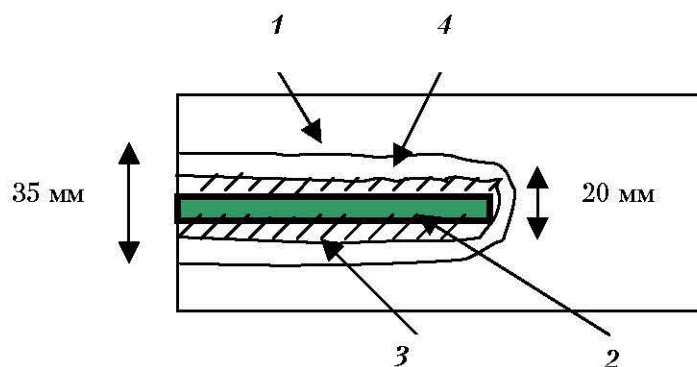


Рис. 3.18. Схема образования вокруг просверленного канала в породе зоны с малой концентрацией дефектов в минералах (4) и зоны разрушения минералов (3):
1 – керн, 2 – канал диаметром 8 мм. Диаметры зон: разрушения – 20 мм; с дефектами – 35 мм

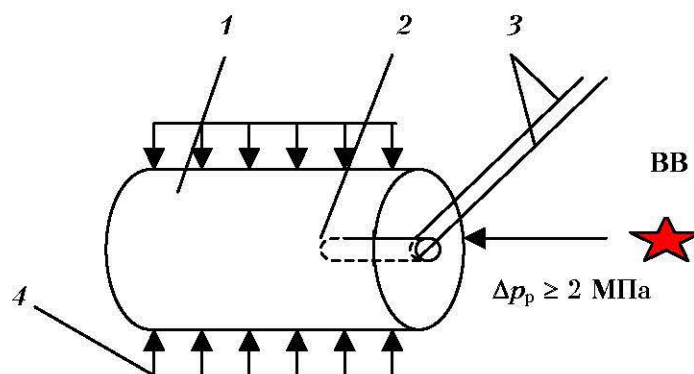


Рис. 3.19. Схема измерения температуры в просверленном канале:
1 – керн искусственный; 2 – канал; 3 – термопара ХК; 4 – гидрообжим

пенно исчезает, в то время как зона разрушения, не обладающая реальной прочностью, может быть вынесена потоком флюида из керна.

Контроль за температурой в канале осуществлялся термопарами ХК, установленными в канале до кольматации. Использование в опытах кернов группы Б показало отсутствие изменения температуры в канале, закольматированном глинистыми частицами, при взрывах зарядов гексогена от 1 г до 30 г на расстоянии 25 см от торца керна. Ошибка при измерении температуры не превышала 0,5 °С. Термопара после воздействия сохранялась в полной исправности, хотя и подлежала замене при каждом взрыве (рис. 3.19, 3.20).

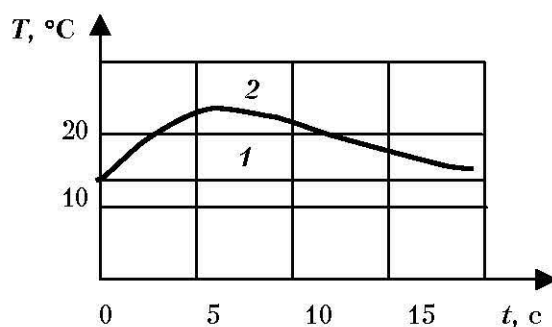


Рис. 3.20. Регистрация температуры в просверленном канале при взрывном воздействии и наличии репрессии $\Delta p_p \geq 2$ МПа.
Образцы группы А. 2 – T после взрывного воздействия от подрыва детонатора; 1 – исходное значение температуры; образцы группы Б. Изменения температуры не отмечено

3.2.6. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ КОЛЬМАТАЦИИ СО ВЗРЫВОМ

При кольматации с взрывным воздействием образцов группы А в ядре и на его границе одновременно протекают несколько процессов. Во-первых, ударные волны активируют поверхность минералов. Следствием этого является протекание хемосорбции с образованием ассоциата. В тонких порах, где адсорбционные слои перекрываются, движение их происходит в сторону взрыва (большого давления). Одновременно в поверхностных слоях минералов возникает преимущественное направление тепловых колебаний адсорбционных центров с переносом тепла к торцу, обращённому к взрыву. Основной теплоперенос осуществляется в поверхностных твёрдых слоях узких капилляров. На торце ядра тепло выделяется и, ввиду высокой концентрации энергии, происходит разрушение минералов и глинистых частиц. На рис. 3.21 представлена схема тепломассопереноса при взрыве заряда ВВ в глинистом растворе.

После создания депрессии глинистые частицы из широких капилляров легко удаляются. Из узких капилляров удалению глинистых частиц препятствует движущийся в сторону большего давления адсорбционный слой. При оттоке адсорбционного слоя глинистые частицы зацемяются под действием горного

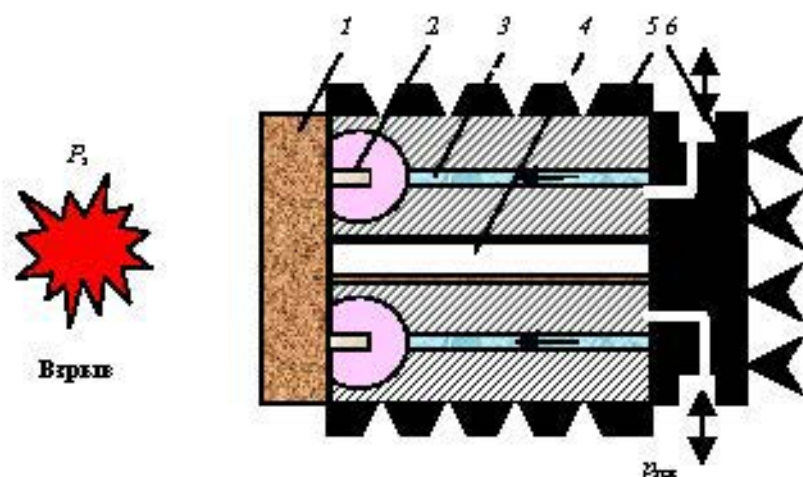


Рис. 3.21. Схема тепломассопереноса при взрыве заряда ВВ в глинистом растворе.

Депрессия $\Delta p > 2$ МПа; 1 - глинистая корка; 2 - зона выделения энергии; 3 - узкий капилляр; 4 - широкий капилляр; 5 - гидрообъем; 6 - канал фильтрации.

давления и поэтому даже при быстром снижении порового давления твёрдые частицы могут быть ещё дальше затянуты в поровые каналы.

Рассмотрим, что произойдёт при повышении и понижении давления в объёме, заполненном глинистым раствором, контактирующим с системой порода – флюид, находящейся в метастабильном состоянии. Повышение давления и создание репрессии (без взрыва) приведёт к течению адсорбционных плёнок из объёма породы в объём глинистого раствора, но избыточное давление на сами твёрдые частицы не позволяет им двигаться вместе с адсорбционными плёнками. Если от репрессии к депрессии переходить очень медленно, то вновь произойдёт защемление твёрдых частиц породой под действием горного давления. В случае быстрого снижения репрессии (даже без создания депрессии) вследствие большой инерционности процессов в ассоциате произойдёт выброс твёрдых, в том числе коллоидных частиц, из капилляров в объём, заполненный глинистым раствором.

3.3. АНАЛИЗ ТЕРМОАНОМАЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ В СКВАЖИНАХ ПОСЛЕ ВЫСТРЕЛА ПЕРФОРАТОРА

3.3.1. ПРИЧИНЫ ТЕРМОАНОМАЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В СКВАЖИНЕ ПОСЛЕ ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПЛАСТОВ СТРЕЛЯЮЩИМИ ПЕРФОРАТОРАМИ

Выстрел перфоратора в скважине, как показано выше, может сопровождаться локальным выделением или оттоком запасённой в пласте энергии, что неминуемо приведёт к изменению температуры жидкости ограниченного объёма во внутрискважинном пространстве. Другой причиной изменения температуры скважинной жидкости является выделение тепла при взрыве зарядов перфоратора. Газообразные продукты взрыва, имеющие высокую температуру, в зависимости от конструкции перфоратора, разогревают корпус перфоратора на несколько десятков градусов или непосредственно попадают в скважинную жидкость. Корпус перфоратора, спускаемого на кабеле, может смещаться в скважинной жидкости в вертикальном направлении под действием реакции от газовых струй, вылетающих из корпуса с большой скоростью. Последующее извлечение корпуса или каркаса перфоратора способствует перемешиванию жидкости и выравниванию её температуры по стволу скважины. Конечно, часть разогретой газожид-

костной смеси остаётся в интервале перфорации и она остаётся «сидеть» на разогретой от кумулятивных струй или локального выделения накопленной в пласте упругой энергии.

Рассмотрим причины сбора части размазанного теплового пятна в интервале перфорации. Разогрев стенки обсадной колонны от струй или реакции пласта, в который произведён выстрел перфоратора, и достаточно длительное сохранение тепла разогретым пластом и колонной в интервале перфорации приведёт к тому, что на газовый пузырьёк будет действовать сила

$$F_t = \pi R^2 \xi \Delta T, \quad (3.21)$$

где R – радиус пузырька; ξ – температурный коэффициент изменения поверхностного натяжения воды (скважинной жидкости); ΔT – температурный градиент.

Пузырёк стремится переместиться в область более высокой температуры (к наиболее нагретой области стенки) при условии $F_t \geq F_a$, где F_a – выталкивающая сила Архимеда. Такое поведение пузырьков газа способствует сохранению характерной формы термоаномалии в течение длительного периода времени. Следовательно, обнаружению в чистом виде термоаномалий, связанных с реакцией пласта на воздействие при перфорации, препятствует целый ряд причин. Среди них: разогрев пласта и обсадной колонны кумулятивными струями и продуктами взрыва, образование газожидкостной системы в стволе скважины.

Однако ряд факторов способствует обнаружению термоаномалии от самой реакции пласта на динамическое воздействие. Так, применение корпусных перфораторов значительно уменьшает количество тепла, выделяющееся в интервале отстрела перфоратора, и основная часть тепла вместе с извлекаемым корпусом уносится сразу после перфорации. Кроме того, сравнительно большой диаметр корпуса перемешивает жидкость в скважине и является важной причиной выравнивания температуры по стволу. К этому следует добавить и тот факт, что изменение температуры жидкости в интервале простреливания за счёт образования ассоциата и инерционности в нём процессов достигает значительно больших значений по сравнению с интегральным выделением тепла от срабатывания перфоратора.

При переносе тепла ассоциатом от стенки скважины вглубь подстилающего прострелянного или непрострелянного пласта, всё выделяющееся тепло, независимо от его источника, будет формировать в скважине положительную температурную аномалию выше зоны охлаждения пласта.

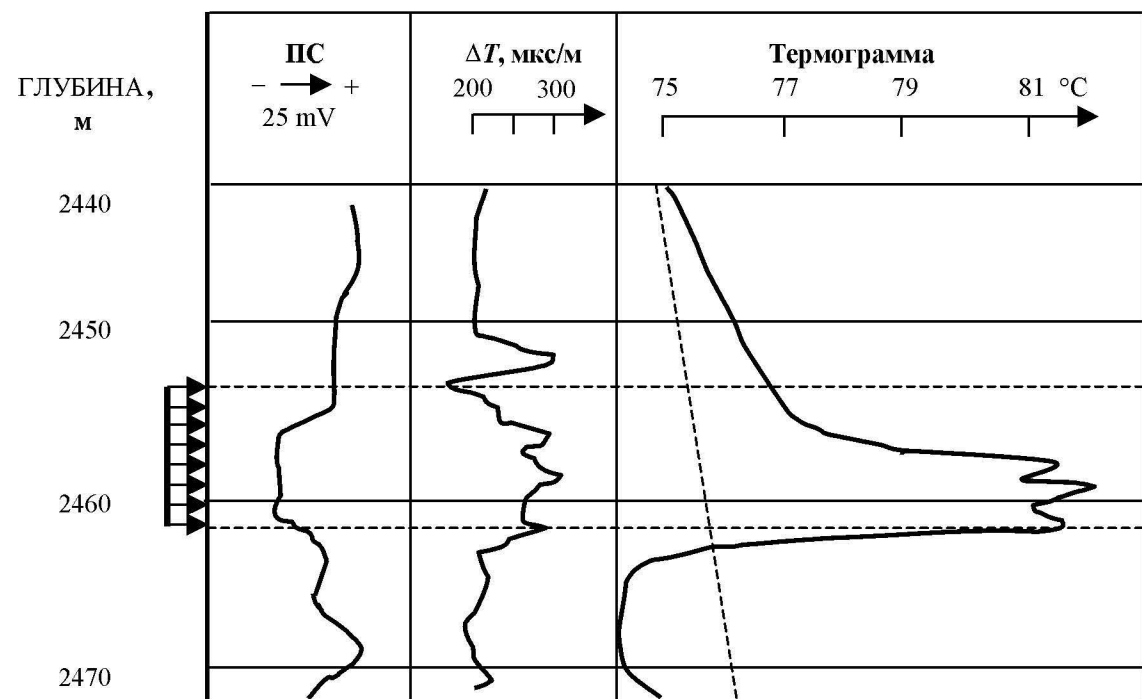


Рис. 3.22. Температурная аномалия, зарегистрированная через 5 ч после перфорации кумулятивным перфоратором ПКС80 на скв. 139 Новопортовского месторождения

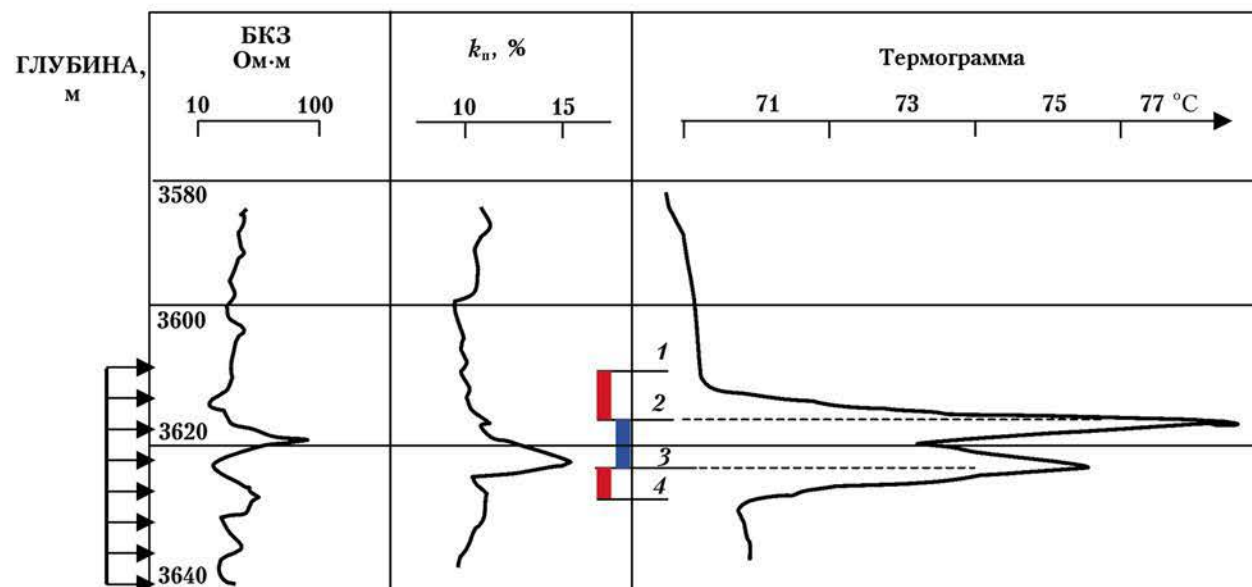


Рис. 3.23. Температурная аномалия, зарегистрированная через 4 ч после перфорации на скв. Жанажол-3. Перфорация выполнена при репрессии ($\Delta p_p = 4$ МПа) кумулятивным перфоратором ПКС80

Нижняя часть термоаномалии в таких случаях будет характеризоваться бесконечно большим температурным градиентом.

Профиль термоаномалий, регистрируемых в интервале прострелянного пласта имеет изрезанный вид и этим он отличается от профиля в непрострелянной, но подвергнутой воздействию ударных волн части пласта. Для непрострелянной части пласта профиль имеет гладкий вид.

На рис. 3.22 в качестве примера приведена температурная аномалия, зарегистрированная через 5 часов после перфорации кумулятивным перфоратором ПКС80 на скв. 139 Новопортовского месторождения. Ниже интервала перфорации произошёл отток тепла от стенки скважины, что сопровождалось охлаждением пласта ниже отметки 2460 метров, что и привело к бесконечно большому температурному градиенту.

При чередовании пропластков с различной литологией и резко отличающимися энергетическими и фильтрационно-емкостными свойствами в интервале перфорации, температурная аномалия имеет сложную конфигурацию. На рис. 3.23 приведена температурная аномалия, демонстрирующая этот факт.

Расформирование температурной аномалии в скважинах происходит крайне медленно и перемещение её по стволу (вверх или вниз) происходит, за редким исключением, и только при наличии притока пластового флюида в скважину или поглощения скважинной жидкости, последующего за перфорацией.

В табл. 3.5 и на рис. 3.24 приведены данные по расформированию температурной аномалии в скважине, возникшей в результате перфорации. Длительное существование термоаномалий в скважине позволило создать надёжный способ определения фактического положения интервала перфорации и сделать заключение о процессах, протекающих в пластах при воздействии на них из скважины.

Таблица 3.5

Расформирование термоаномалии

	Интервал между перфорацией и замером температуры	Температурная аномалия, °С
1	120 мин	4
2	150 мин	4
3	180 мин	3,8
4	240 мин	3
5	270 мин	2,7

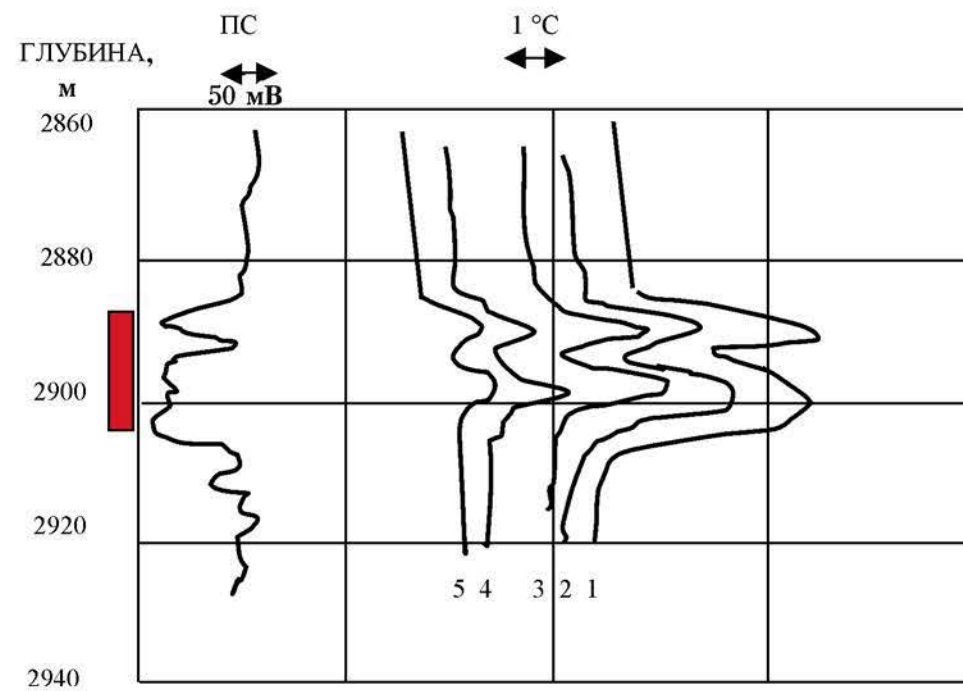


Рис. 3.24. Расформирование термоаномалии после перфорации. Пл. Карамовская скв. 149 (куст 11). Термограммы после перфорации ПКС80 записаны на спуске термометра

Выводы

1. Температурные аномалии в интервалах перфорации являются следствием процессов в пласте, инициируемых динамическими нагрузками, а также выделения тепла от взрыва кумулятивных зарядов и проникающих в пласт струй. В отличие от всегда только положительных термоаномалий, связанных с выделением тепла при срабатывании стреляющего перфоратора, термоаномалии от реакции пласта на динамическое воздействие могут быть как положительными, так и отрицательными.

2. Перфорация с использованием стреляющих систем способна вызвать локальное выделение энергии и частичное или полное разрушение породы в окрестности скважины.

3. Эффективность вторичных методов вскрытия с использованием прострелочно-взрывной аппаратуры в значительной мере определяется состоянием пласта к моменту проведения работ и теми преобразованиями его фильтрационных свойств в ближней и удалённой зонах, которые могут произойти под действием кратковременных интенсивных нагрузок.

4. Регистрация температурных аномалий позволяет устанавливать фактическое положение интервала перфорации, в том числе в старом фонде скважин при уплотнении перфорации.

3.4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТ ПО ВСКРЫТИЮ ПЛАСТА И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКОВ

Из формулы Дарси $V = -\frac{k}{\mu} \text{grad} p$ при условии фильтрации флюида в цилиндрическом объёме породы радиусом R_k и толщиной h к скважине цилиндрической формы с радиусом по долоту r_c может быть получена формула Дюпюи для объёмного дебита пластового флюида с давлением в пласте $p_{пл}$

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{(p_{пл} - p_a)}{\ln \frac{R_k}{r_c}}, \quad (3.22)$$

где p_a – давление в скважине на уровне залегания пласта; R_k – радиус контура питания; k – проницаемость; μ – динамическая вязкость.

С учётом выделения газа из нефти по мере движения её по стволу к устью скважины формула Дюпюи изменится и примет следующий вид:

$$Q = \frac{2\pi kh}{b\mu} \frac{(p_{пл} - p_a)}{\ln \frac{R_k}{r_c}}, \quad (3.23)$$

где b – объёмный коэффициент, варьирующий в диапазоне 1–3.

Влияние на величину дебита различных эффектов в прискважинной зоне пласта (ПЗП) учитывается скин-эффектом S

$$Q = \frac{2\pi kh}{b\mu} \frac{(p_{пл} - p_a)}{\ln \frac{R_k}{r_c} + S}. \quad (3.24)$$

Такие же эффекты учитываются и при замене реального радиуса скважины на приведённый радиус $r_{пр}$

$$Q = \frac{2\pi kh}{b\mu} \frac{(p_{пл} - p_a)}{\ln \frac{R_k}{r_{пр}}}. \quad (3.25)$$

Приравнивая знаменатели 2-х последних равенств, имеем

$$\ln \frac{R_k}{r_{пр}} = \ln \frac{R_k}{r_c} + S \quad \text{или} \quad \ln \frac{R_k}{r_{пр}} - \ln \frac{R_k}{r_c} = S.$$

После преобразования получим

$$\ln \frac{r_c}{r_{пр}} = S \quad \text{или} \quad \frac{r_c}{r_{пр}} = e^S, \quad \text{откуда} \quad r_{пр} = \frac{r_c}{e^S}. \quad (3.26)$$

Однако не следует полагать, что возрастание или снижение $r_{пр}$ связано только с трещиной или с глубиной перфорационного канала. Как было показано выше, при воздействии на породы или деформации их горным давлением может возникать сверхтекучесть или сверхнестекучесть. Это приведёт к росту (или снижению) подвижности флюида в огромной зоне вокруг скважины.

При этом в случае значительного увеличения подвижности $\frac{k}{\mu}$ в зоне радиуса R_s , приведённый радиус скважины будет близок к R_s .

В тех случаях, когда исключается значительный приток флюида в скважину после её мгновенной остановки, оказывается возможным использовать для анализа кривых восстановления давления на забое уравнения упругого режима. Мгновенная остановка нефтяной скважины, работавшей до этого с постоянным дебитом Q , может быть осуществлена путём перекрытия внутреннего сечения обсадной колонны пакером, установленным в кровле продуктивного пласта. При этом под пакером предвари-

тельно устанавливается автономный манометр, который регистрирует кривую восстановления давления.

Восстановление давления на забое мгновенно остановленной нефтяной скважины, эксплуатировавшей перед остановкой однородный пласт при постоянном дебите, может быть описано уравнением

$$\Delta p = \frac{Q\mu b}{4\pi kh} \ln \frac{2,25\kappa}{r_{\text{пр}}^2} + \frac{Q\mu b}{4\pi kh} \ln t, \quad (3.27)$$

где $\Delta p(t)$ – изменение давления во времени, Н/м²; Q – стабильный дебит скважины перед остановкой, м³/с; μ – динамическая вязкость пластовой жидкости, Па·с; k – проницаемость пласта, м²; h – толщина пласта, м; $r_{\text{пр}}$ – приведённый радиус скважины, м; κ – коэффициент пьезопроводности, м²/с; t – время, отсчитанное с начала остановки скважины, с.

В полулогарифмических координатах $\Delta p(t) - \ln t$ графическим изображением уравнения (3.27) будет прямая линия, отсекающая на оси $\Delta p(t)$ отрезок длиной A и составляющая с осью $\ln t$ угол α .

На рис. 3.25 приведён принципиальный общий вид графического изображения уравнения (3.27). Здесь

$$A = \frac{Q\mu b}{4\pi kh} \ln \frac{2,25\kappa}{r_{\text{пр}}^2}; \quad \text{tg } \alpha = \frac{Q\mu b}{4\pi kh}. \quad (3.28)$$

Зная значение $\text{tg } \alpha$, можно определить проницаемость породы. Расчёты пьезопроводности по найденной проницаемости и известным значениям сжимаемости жидкости $\beta_{\text{ж}}$ и $\beta_{\text{п}}$ выполняют по формуле

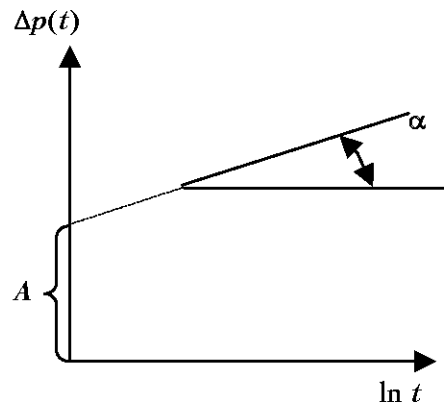


Рис. 3.25. Принципиальный общий графический вид уравнения (3.27)

$$\varkappa = \frac{k}{\mu (m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{п}})}.$$

Определив из графика значение A , находим приведённый радиус.

Выводы

1. Для использования закономерностей упругого режима при оценке эффективности работ, связанных с заканчиванием скважины, необходимо выполнение ряда требований среди которых главными являются:

- стабильность дебита до момента закрытия скважины;
- исключение притока пластового флюида в скважину после её закрытия;
- пласт должен быть однородным.

2. Полученная оценка скин-эффекта указывает, прежде всего, на уменьшенную или увеличенную подвижность флюида k/μ . Последняя не обязательно связана с наличием искусственных или естественных трещин.

4

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПЛАСТОВ СТРЕЛЯЮЩИМИ ПЕРФОРАТОРАМИ

4.1. ВСКРЫВАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДЫ

4.1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Перфорацию скважины после крепления ее обсадной колонной и цементирования заколонного пространства проводят с целью:

- вскрытия объектов для решения поисковых и разведочных задач;
- вскрытия пластов-коллекторов для добычи жидких или газообразных углеводородов
- вскрытия пород-коллекторов для закачки в них воды или газа с целью повышения нефтегазоотдачи;
- повышения качества гидродинамической связи внутрискважинного пространства с пластом;
- подготовки фильтровой зоны к интенсификации притока пластового флюида.

Для проведения эффективного вторичного вскрытия объектов в эксплуатационных скважинах необходимо (но недостаточно) располагать детальными сведениями о:

- задачах, стоящих перед перфорацией;
- геолого-технических условиях в скважине;
- характеристиках объектов вскрытия;
- существующих методах вскрытия;
- эксплуатационных характеристиках перфораторов;
- специальном вспомогательном оборудовании;
- геофизическом сопровождении прострелочных работ;
- готовности скважины к прострелочным работам.

Достаточные условия проведения эффективного вторичного вскрытия имеют место в тех случаях, когда для поставленной задачи, заданных геолого-технических условий и характеристик

пласта может быть подобран аппаратурно-методический комплекс, включающий методику вскрытия, типоразмер перфоратора, вспомогательное оборудование и геофизическое сопровождение.

Для проведения эффективного вторичного вскрытия объектов в поисковых и разведочных скважинах необходимым (но недостаточным) условием является детальная информация о:

- задачах испытаний конкретного объекта в скважине;
- геолого-технических условиях в скважине;
- возможных техногенных преобразованиях ФЕС породы объекта в процессе бурения и закачивания скважины;
- существующих методах вторичного вскрытия объектов и пластов;
- эксплуатационных характеристиках перфораторов;
- специальном вспомогательном оборудовании;
- геофизическом сопровождении прострелочных работ;
- готовности скважины к прострелочным работам.

Достаточные условия проведения эффективного вторичного вскрытия возникают в тех случаях, когда для поставленной задачи, заданных геолого-технических условий и характеристик объекта с учетом техногенных преобразований его ФЕС может быть подобран аппаратурно-методический комплекс, включающий методику вскрытия (в том числе в комплексе интенсификацию), типоразмер перфоратора, вспомогательное оборудование и геофизическое сопровождение.

4.1.2. ЗАДАЧИ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ РЕШЕНЫ С ПОМОЩЬЮ ПЕРФОРАЦИИ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ, ПОИСКОВЫХ И РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИНАХ

В эксплуатационных скважинах вторичное вскрытие должно обеспечить:

- создание перфорационных каналов, пересекающих стенку обсадной колонны (или нескольких колонн), цементный камень и входящих в породу-коллектор на глубину от 200 до 1000 мм;
- необходимую плотность перфорации и научно обоснованную взаимную ориентацию простреленных каналов;
- исключение попадания в простреливаемый канал кольматанта из бурового раствора;
- сохранение эффективной гидродинамической связи внутри-скважинного пространства с разрабатываемым пластом при подключении (путём дополнительной перфорации) выше – или ниже лежащих пластов;

- сохранность конструкции скважины (герметичности затрубного цементного камня и целостности обсадной колонны) за пределами интервала перфорации;
- вскрытие пластов в вертикальных, наклонно направленных и горизонтальных скважинах;
- необходимые диаметры перфорационных каналов для эффективной интенсификации притоков пластовых флюидов или приемистости нагнетаемого флюида.

В поисковых и разведочных скважинах перфорация может способствовать решению следующих проблемных задач:

- оценке коллекторских свойств объектов (определению границ коллектор-неколлектор);
- определению характера насыщения объекта флюидами (в том числе по толщине пласта с обнаружением зон недонасыщения пласта углеводородами);
- уточнению эффективных толщин пласта;
- определению потенциальной продуктивности объекта.

4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СКВАЖИНАХ

Классификация геолого-технических условий в скважинах осуществляется по нижеперечисленным параметрам.

1. По температуре в интервале перфорации объекты подразделяются на 4 группы:

- 1 – до 100 °С;
- 2 – до 170 °С;
- 3 – до 200 °С;
- 4 – свыше 200 °С.

2. По гидростатическому давлению в интервале перфорации объекты подразделяются на 4 группы:

- 1 – до 70 МПа;
- 2 – до 100 МПа;
- 3 – до 120 МПа;
- 4 – свыше 120 МПа.

3. По конструктивным особенностям скважины в интервале перфорации объекты подразделяются на 2 группы:

- 1 – одна обсадная колонна;
- 2 – две и более обсадных колонн.

4. По значению максимального зенитного угла на любом участке ствола скважины подразделяются на 2 группы:

- 1 $\leq 0,7$ рад (40°);
- 2 $> 0,7$ рад (40°).

5. По качеству затрубного цементного камня объекты подразделяются на 2 группы:

1 – объект находится в интервале с качественным затрубным цементным камнем;

2 – объект находится в интервале с некачественным затрубным цементным камнем.

6. По наименьшему диаметру проходного сечения в колонне обсадных или насосно-компрессорных труб, через которые спускается перфоратор, объекты подразделяются на 4 категории:

1 – диаметром от 118 мм до 300 мм;

2 – диаметром от 96 мм до 118 мм;

3 – диаметром от 76 мм до 96 мм;

4 – диаметром от 50 мм до 76 мм.

7. По максимальной плотности жидкости, заполняющей любой интервал глубин скважины, объекты подразделяются на 4 группы:

1 – $\sigma \leq 10^3$ кг/м³;

2 – 10^3 кг/м³ < $\sigma \leq 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³;

3 – $1,2 \cdot 10^3$ кг/м³ < $\sigma \leq 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³;

4 – $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³ < $\sigma \leq 2 \cdot 10^3$ кг/м³.

Безаварийный спуск перфоратора в скважину на кабеле обеспечивается только при достаточной величине диаметральных зазоров между стреляющим перфоратором и стенкой обсадной трубы или НКТ.

В табл. 4.1 даны величины минимально допустимых зазоров в зависимости от плотности жидкости в скважине и типа перфоратора.

Таблица 4.1

Минимально допустимые диаметральные зазоры между габаритом перфоратора и стенкой обсадной колонны или НКТ

Тип перфоратора	Диаметр или поперечный габарит перфоратора, мм	Плотность жидкости в скважине, σ г/см ³	Минимальный зазор δ , мм
Ленточные	70–100	$\leq 1,5$	13
Каркасные	42, 54, 65	$> 1,5$	22
		$\leq 1,0$	8, 8, 11
		$1 < \sigma \leq 1,2$	10, 10, 11
Разрушающиеся полностью	43, 54, 65, 100	$\leq 1,0$	7, 8, 11, 18
Многоразового использования	80, 85, 95, 105	$1 < \sigma \leq 1,2$	10, 12, 15, 20
		$\leq 1,0$	16, 16, 16, 13
Одноразового использования	32, 38, 48, 73, 89	$1 < \sigma \leq 1,2$	16, 16, 16, 15
		$1 < \sigma \leq 1,5$	10, 10, 12, 15, 20
Специального назначения	73, 89	$1 < \sigma \leq 1,5$	20, 20
Пулевые	70	$1,5 < \sigma \leq 2,0$	
		$1 < \sigma \leq 2,0$	25

4.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ, ВСКРЫВАЕМЫХ ПЕРФОРАЦИЕЙ

Для обоснования техники и технологии вторичного вскрытия необходимо не только знать склонность породы-коллектора к дилатансии, но что ещё важнее – знать энергетическое состояние системы порода – насыщающий флюид. В стабильном состоянии эта система обладает минимальной энергией и взаимодействием между флюидом и твёрдой поверхностью можно пренебречь. Иначе обстоит дело в случае перехода системы в метастабильное состояние, которое по определению является возбуждённым состоянием. Такое состояние, являясь результатом хемосорбции, в условиях действия неизменного горного давления и постоянства термобарических условий может существовать неопределённо долго, определяя саму возможность фильтрации.

По склонности к изменению ФЕС пласты подразделяются на 3 категории.

Изменения ФЕС могут происходить как при первичном, так и при вторичном вскрытии и связаны с переходом породы в окрестности бурящейся скважины в новое напряженно-деформированное состояние, характеризующееся дилатансией или уплотнением и (или) с переходом в метастабильное или стабильное состояние в результате кратковременного интенсивного воздействия на породу при перфорации. При этом может иметь место как увеличение, так и уменьшение подвижности флюида k/μ .

1-я категория (породы, подверженные наибольшему снижению фильтрационно-емкостных свойств) – песчано-алевритовые породы, слабо уплотненные, с преимущественно глинистым цементом и пористостью $K_{\Pi} > 15 \%$, а также карбонатные породы с $K_{\Pi} > 12 \%$.

2-я категория (породы, подверженные как снижению, так и увеличению ФЕС) – уплотненные песчано-алевритовые породы с кварцевым и карбонатно-глинистым цементом, карбонатные породы, аргиллиты и другие породы, в которых трещиноватость отсутствует, а пористость варьирует для терригенных пород в пределах $10 \% < K_{\Pi} < 15 \%$, а карбонатных пород $8 \% < K_{\Pi} < 12 \%$.

3-я категория (породы, не снижающие проницаемость и склонные к увеличению ФЕС) – сильно уплотненные песчаники, алевриты, известняки, доломиты, мергели, аргиллиты и другие породы, в том числе с развитой трещиноватостью при пористости матрицы терригенных пород $K_{\Pi} < 10 \%$, а карбонатных пород – $K_{\Pi} < 8 \%$.

По строению объекты подразделяются на однородные и неоднородные.

Однородными считаются объекты, сложенные породой постоянного литологического состава и имеющие одинаковую степень уплотнения.

Неоднородными считаются объекты, сложенные породами различного литологического состава и имеющие различную степень уплотнения. К неоднородным относят объекты, в которых геофизические параметры, отражающие пористость, глинистость, проницаемость пород изменяются более чем в 1,3 раза. Среди неоднородных объектов выделяются тонкослойные, характеризующиеся малой (менее 0,4 м) толщиной отдельных однородных прослоев.

По соотношению между пластовым и гидростатическим давлением, соответствующим данной глубине залегания пласта, объекты подразделяются на 3 группы:

1 – с пластовым давлением, соответствующим гидростатическому, условно допустимо превышение его но не более чем на 30 %;

2 – с пластовым давлением ниже гидростатического – аномально низким пластовым давлением (АНПД);

3 – с пластовым давлением, превышающим более чем на 30 % гидростатическое – аномально высоким гидростатическим давлением (АВПД).

По составу пластового флюида объекты подразделяются на 5 категорий:

1 – нефтяные;

2 – газовые;

3 – газоконденсатные;

4 – водяные;

5 – водонефтяные.

Каждая категория подразделяется на две группы:

1 – пластовый флюид не содержит агрессивных компонентов;

2 – пластовый флюид содержит агрессивные компоненты (сероводород, углекислый газ и др.).

4.4. МЕТОДЫ ВСКРЫТИЯ ОБЪЕКТОВ И ПЛАСТОВ СТРЕЛЯЮЩИМИ ПЕРФОРАТОРАМИ

Различают три основных метода вскрытия: при депрессии (давление в скважине ниже пластового), при репрессии (давление в скважине выше пластового) и при равновесии (давление в скважине равно пластовому). Любой из этих методов может быть реализован при наличии соответствующего типоразмера перфоратора, вспомогательного оборудования и геофизического сопровождения.

4.4.1. МЕТОД ВСКРЫТИЯ ПРИ ДЕПРЕССИИ

Позитивные стороны метода:

- не требуется подготовки специальной жидкости для частичного или полного заполнения скважины;
- создается ударная депрессия на пласт;
- вскрытие совмещается с вызовом притока.

Негативные стороны метода:

- необходимо вспомогательное оборудование (лубликатор, подъёмник или специальная перфораторная головка при спуске перфоратора на трубах);
- возможно снижение проницаемости ПЗП вследствие уплотнения породы, закупорки перфорационных отверстий в стенке обсадной трубы шламом породы;
- устье скважины может подвергаться опасному по величине гидроудару;
- возникает опасность разрушения конструкции скважины в интервале перфорации;
- при недостаточном гидростатическом давлении в интервале перфорации может произойти разрушение или запредельная деформация корпуса перфоратора при отстреле, что затруднит извлечение его из скважины;
- при отстреле полностью разрушающихся перфораторов, спускаемых через НКТ, и отсутствии зумпфа или малой глубине его, воронка НКТ должна находиться на расстоянии не менее 30 метров от верхнего заряда перфоратора, во избежание забрасывания кабельного наконечника и части кабеля в зазор между НКТ и обсадной колонной.

4.4.2. МЕТОД ВСКРЫТИЯ ПРИ РЕПРЕССИИ

Позитивные стороны метода:

- возможность совмещения перфорации с физическим, химическим и (или) физико-химическим воздействием на пласт;
- возможность применения полноразмерных перфораторов с высокой пробивной способностью;
- возможность плавного создания депрессии на пласт при вызове притока;
- высокая производительность при ведении прострелочных работ;
- факт качества и полноты срабатывания перфоратора устанавливается

Негативные стороны метода:

- возможность возникновения аварийной ситуации за счет разрыва пласта при перфорации, поглощения скважинной жид-

кости и последующего интенсивного поступления в скважину газа или газожидкостной смеси из пласта:

- возможность попадания из скважины в пласт твердых кольматантов, снижающих проницаемость породы-коллектора;
- возможность попадания в пласт скважинной жидкости с образованием в пласте высоковязких соединений за счёт активизации химических реакций под действием ударных волн.

4.4.3. МЕТОД ВСКРЫТИЯ ПРИ РАВНОВЕСИИ

Позитивные стороны метода:

- возможность расширения интервала перфорации или увеличения плотности перфорации без глушения пласта;
- исключение попадания скважинной жидкости в пласт, активизированный в момент перфорации;
- возможность плавного создания депрессии.

Негативные стороны метода:

- удорожание прострелочных работ;
- необходимо специальное оборудование (лубрикатор со станцией управления и насосный агрегат для подачи густой смазки в случае спуска перфоратора через НКТ или устройство инициирования при спуске перфоратора в скважину на НКТ).

4.5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВСКРЫТИЯ ПЛАСТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

4.5.1. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕТОДИКИ ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ОБЪЕКТОВ В ПОИСКОВЫХ И РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИНАХ

4.5.1.1. МЕТОДИКА ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА

а) При испытании объекта в открытом стволе с использованием КИИ получен стабильный приток углеводородов.

Вскрытие такого объекта проводят при ограниченной величине депрессии, с использованием кумулятивных зарядов, имеющих пробивную способность не менее радиуса ствола скважины.

При вскрытии газонасыщенных объектов величину депрессии рекомендуется ограничивать 10 % от величины пластового давления. При вскрытии нефтенасыщенных объектов величина де-

прессии не должна превышать 10 МПа. Полученный результат испытания объекта в обсадной колонне является окончательным.

б) Испытания в открытом стволе не проводились.

Вскрытие такого объекта проводят при ограниченной репрессии в условиях полного или частичного заполнения скважины специальным раствором с использованием перфораторов (в том числе пулевых), с пробивной способностью не менее радиуса ствола скважины. Перед проведением перфорации при репрессии в скважину необходимо спустить НКТ с промывкой до забоя. После этого в скважину закачивают 3–5 куб. метров специальной жидкости: воды, обработанной сульфанолом, или ОП-6; раствора на нефтяной основе; инвертной эмульсии. Объем закачанной жидкости должен обеспечить заполнение ствола скважины в интервале перфорации и выше него на 100–150 м. Гидростатическое давление столба промывочной жидкости в скважине должно превышать пластовое давление на величину:

10–15 % для скважин глубиной до 1200 м, но не более 1,5 МПа;

5–10 % для скважин глубиной от 1200 м до 2500 м, но не более 2,5 МПа;

4–7 % для скважин глубиной более 2500 м, но не более 3,5 МПа.

При отсутствии притока или получении неудовлетворительных результатов (но по петрофизическим данным и геофизическим исследованиям подтверждается наличие коллектора) переходят к интенсификации или повторяют перфорацию с использованием стреляющих аппаратов после длительной выстойки скважины.

4.5.1.2. МЕТОДИКА ВСКРЫТИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕНИЯ ПОРОДЫ И УТОЧНЕНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ТОЛЩИН ПЛАСТА

Вскрытие необходимо проводить при равенстве пластового и забойного давлений с постепенным расширением интервала перфорации сверху вниз без задавливания испытанной части объекта перед очередным этапом перфорации. Величину депрессии при испытании очередной раз расширенного объекта следует ограничивать 10 % пластового давления.

Протяженность простреливаемого отдельного интервала не должна превышать 3 м. Рекомендуемая плотность должна составлять не менее 10–12 отв./м. Перед проведением первого этапа вскрытия скважину частично или полностью заполняют инвертной эмульсией.

4.5.1.3. МЕТОДИКА ВСКРЫТИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ОБЪЕКТА

а) Вскрытие однородных объектов I и II категории.

Вскрытие проводят по методике, изложенной п. 4.5.1.1.

б) Вскрытие однородных объектов III категории.

Вскрытие проводят при максимально допустимой депрессии для достижения дилатансии породы. Используют перфораторы с пробивной способностью, равной или превышающей радиус скважины и обеспечивающей высокую плотность перфорации за один спуск (> 10 отв./м).

в) Вскрытие неоднородных объектов.

Применяют комбинированный метод, включающий два этапа:

1 – вскрытие при репрессии участков пониженной проницаемости;

2 – после вызова притока из участков пониженной проницаемости без глушения этих участков на равновесии пластового и забойного давлений проводят вскрытие участков повышенной проницаемости.

г) Вскрытие тонкослоистых объектов.

Вскрытие проводят при репрессии с наращиванием плотности перфорации до 20–24 отв./м.

4.5.2. МЕТОДИКА ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПЛАСТОВ В ДОБЫВАЮЩИХ И НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

4.5.2.1. МЕТОДИКА ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПЛАСТОВ В ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ

Применяют методику, изложенную в п. 4.5.1.1.

4.5.2.2. МЕТОДИКА ВСКРЫТИЯ ПРИКОНТАКТНЫХ ЗОН

Вскрытие пластов I и II категорий проводят по методике, изложенной в п. 4.5.1.1, дополнительно обеспечивая минимальное расстояние от крайних перфорационных отверстий до межфлюидных контактов в 3–5 м.

4.6. ТАКСОНОМИЯ ТИПОВ ПЕРФОРАТОРОВ И УСЛОВИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

В табл. 4.2 приведена таксономия типов перфораторов и условия их применения.

Таблица 4.2

Таксономия типов перфораторов и условия их применения

Класс	Типы	Индекс	Спуск на кабеле		На НКТ
			через НКТ	через ОК	
Бескорпусные	Ленточные	ПКСУЛ		◆	
	Каркасные	ПЛ ПРК	◆	◆	
	Разрушающиеся	ПРKM ПР КПРУ	◆	◆	
Корпусные	Многokrатные	ПК ПКО ПКOT ПКOC	◆	◆	
	Однократные	ПМИ ТП-К ТПНК Т ПРТ ПКТ ПMT		◆	◆
Пулевые		ПВКТ ПВК		◆	

4.6.1. СРЕДСТВА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ВЗРЫВАНИЯ

Средства воспламенения и взрыва используются для инициирования горения порохов и детонации ВВ. Они являются важнейшим составляющим элементом прострелочно-взрывной аппаратуры и должны отвечать диаметрально противоположным требованиям. С одной стороны, все средства воспламенения и взрыва должны быть абсолютно безопасными, а с другой – надёжно срабатывать от сравнительно слабого импульса в условиях действия высоких температур и давлений. Воспламенение взрывчатых веществ обеспечивается применением различных электрозапалов, электровоспламенителей и пиропатронов. Детонация зарядов ВВ возбуждается взрывом капсюлей-детонаторов (КД), электродетонаторов (ЭД), капсюлей-детонаторов накольного действия, а также взрывных патронов. Взрывные патроны всегда содержат электродетонаторы. Передача детонации от детонатора к группе кумулятивных зарядов осуществляется детонирующими шнурами.

Простейший электровоспламенитель представляет собой гильзу, закрытую с одного конца пробкой, через которую пропущено два проводника, соединённые мостиком накаливания, на который в виде капли нанесён чувствительный к нагреву быстрогорящий порох или пиротехнический состав. При пропуске тока

мостик нагревается, капелька воспламеняется и даёт луч огня. Элементы, обеспечивающие поджигание, могут входить непосредственно в состав изделия, как, например, в термостойких электродетонаторах (рис. 4.1, *з*). Существуют также капсули-воспламенители, срабатывающие от удара бойка. **Капсюли-детонаторы** (рис. 4.1, *а*) – комбинированные заряды инициирующего 4 и бризантного 5 ВВ, размещённые в гильзе 1. Срабатывают от луча электровоспламенителя или огнепроводного шнура. Промышленностью выпускаются гремуче-ртутные КДМ в медной оболочке и КД8Б в бумажной оболочке с зарядом 0,5 г гремучей ртути и 1 г гексогена, а также азидные КД8А в алюминиевой оболочке с зарядом 0,15 г азида свинца, 0,1 г ТНРС и 1 г гексогена. В перфораторах и торпедах, спускаемых на трубах, применяются капсули-детонаторы наконечного действия. Схема наконечного капсюля, изображена на рис. 4.1, *б*. В оболочку 5 помещают чашечку 1 с чувствительным к удару и трению составом 2 (часто сенсibilизированным). Последний контактирует с инициирующим ВВ 3, а он, в свою очередь, – с бризантным 4. При ударе бойка металл оболочки сминается или пробивается и происходит воспламенение чувствительного к трению состава с последующей детонацией инициирующего ВВ.

Электродетонаторы являются простой комбинацией электровоспламенителя с капсюлем-детонатором. Одним из самых надёжных является электродетонатор ЭД8 (рис. 4.1, *в*). В металлическую гильзу 8 с небольшой кумулятивной выемкой помещён

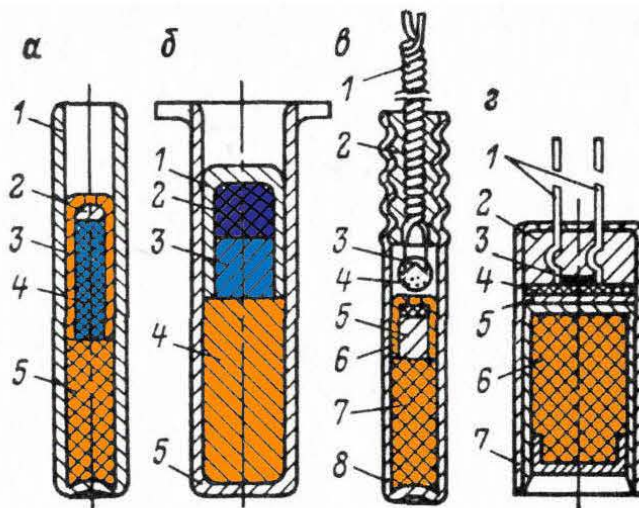


Рис. 4.1. Капсюли-детонаторы и электродетонаторы

заряд бризантного ВВ 7, и на него установлена чашечка 6 с запрессованным инициирующим ВВ 5. При подаче электрического импульса на линию 1 мостик накаливания 3 поджигает капелюшку пиротехнического состава 4 и его горение вызывает воспламенение инициирующего вещества. Электродетонатор герметизируется пластиковой пробкой 2.

Сопротивление мостика 1,5–3 Ом. Максимальный безопасный ток, не вызывающий срабатывания, для большинства электродетонаторов составляет 0,18 А. Проверка сопротивления цепи осуществляется только специальными приборами, допущенными Федеральной службой по технологическому надзору и дающими ток в цепь не более 50 Ма. Импульс воспламенения – наименьший импульс тока, при котором происходит безотказное воспламенение электродетонатора, для ЭД 8 не превышает $2,5 \text{ мс} \cdot \text{А}^2$. Иницирующую способность капсюлей проверяют по пробитию свинцовой пластинки толщиной 5 мм. Тротиловый эквивалент ЭД 8 равен 1,4 г. Испытания капсюлей проводят в условиях, исключающих поражение окружающих осколками оболочки или кумулятивной струей. Электродетонаторы не подлежат разборке. Запрещено брать электродетонатор за провод и тянуть за него.

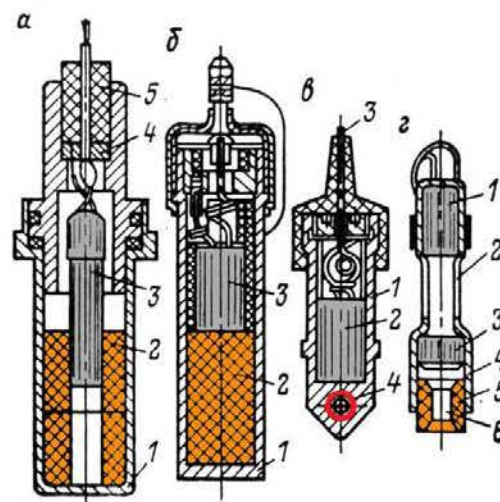
Широкое применение при ПВР получили термостойкие электродетонаторы. Так ТЭД 200 и ТЭД 250 могут быть использованы при температуре 200 и 250 °С. Принципиальная схема термостойкого детонатора изображена на рис. 4.1, г. В металлическую гильзу запрессована колодочка 2, через которую пропущены проводники 1, соединённые мостиком накаливания 3, лежащим на поверхности колодочки. В контакте с колодочкой и мостиком запрессован воспламенительный состав 4, за ним инициирующее ВВ 5 и заряд бризантного ВВ. Для ТЭД 165, ТЭД 200 в качестве инициирующего ВВ применяют азид свинца, ТЭД 250 – азид серебра.

Взрывные патроны. Из патронов, применяемых в скважинной жидкости, наиболее проста конструкция ВТШ (рис. 4.2, а), прочный корпус 1 которого с размещёнными внутри шашкой 2 и электродетонатором 3 с герметичным уплотнителем 5, опирающимся на шайбу 4, выдерживает внешнее давление. Патрон и в настоящее время находит применение в торпеде ТШ 84.

Патрон взрывной герметичный усиленный ПВГУ 4, изображённый на рис. 4.2, б имеет прочный корпус 1, шашку ВВ 2, ТЭД 3, герметизирующие детали и токоввод.

Для того чтобы избавиться от прочного и толстостенного патрона и повысить эффективность передачи детонации пассивному заряду (детонирующему шнуру), П.В. Вольницким и Е.А. Левиным был разработан патрон ПВГУ 250/1500. Суть этого пред-

Рис. 4.2 Конструкции взрывных патронов



ложения состояла в том, что доньшко патрона толщиной 0,5 мм опиралось на спрессованное термостойкое (до 250 °С) бризантное вещество, которое упрочняло дно патрона и сам патрон до 150 МПа. Благодаря этому патрону удалось провести взрывные работы в самых глубоких скважинах, пробуренных в нашей стране. Сходную по элементам, но отличную в деталях оформления конструкции имеет взрывной патрон ПВГУ 5, рассчитанный на применение при температурах до 180 °С.

Перечисленные выше патроны предназначены для использования непосредственно в скважинной жидкости в условиях действия высокого давления и температуры. Имеется класс патронов, которые удобны для применения в малогабаритных перфораторах, и их задача – возбуждение взрыва детонирующего шнура. На рис. 4.2, в изображён взрывной патрон ПВГ 4, вместе с отрезком детонирующего шнура 4, состоящий из корпуса 1, электродетонатора 2 и пробки с электроводом 3. Контакт дна патрона с ДШ обеспечен скобой, в отверстие которой и пропускается шнур. Последняя модификация патрона ПВГ разработана В.И. Павловым.

Отдельная группа патронов используется для возбуждения взрыва детонирующих шнуров в герметичных корпусах перфораторов корпусных (ПК) или корпусных одноразовых (ПКО).

К таким патронам предъявляются совсем другие требования. Примером такого патрона может служить взрывной патрон предохранительного действия (ПВПД). Использование для прострелочных работ корпусных перфораторов и особенно одноразовых не исключает вероятности утечки жидкости при больших давле-

ниях в скважине через их резьбовые соединения. В такой ситуации часть зарядов, оказавшихся в жидкости, сработает фугасно и ударная волна, распространяющаяся в жидкости, деформирует корпус и перфоратор выполнит несанкционированную функцию пакера. Изображённый на рис. 4.2, *з*. ПВПД состоит из корпуса 4 с окном 2. В корпусе размещены электродетонатор 1, промежуточный детонатор 3 и втулка 5 с гнездом под детонирующий шнур 6. Расстояние между электродетонатором и промежуточным детонатором подобраны таким образом, что взрыв первого в обычных условиях вызывает надёжное срабатывание только в случае заполнения разрыва воздухом. Заполнение промежутка водой исключает срабатывание промежуточного детонатора и тем самым устраняется возможность подрыва зарядов перфоратора.

Огнепроводные и детонирующие шнуры.

Огнепроводные шнуры, представляют собой своеобразный «чулок» с зарядом из пороха с фиксированной скоростью горения, чаще 1 см/с. При геофизических работах в скважинах практически не используются. В отличие от огнепроводных, детонирующие шнуры находят широкое применение при работах в глубоких скважинах как средство подрыва группы зарядов или как самостоятельный линейный заряд со сравнительно небольшой массой ВВ на единицу длины. Применяются они и в сейсморазведке для возбуждения сейсмического сигнала в качестве линейных зарядов с небольшой массой ВВ. В табл. 4.3 приведены рабочие параметры некоторых из них.

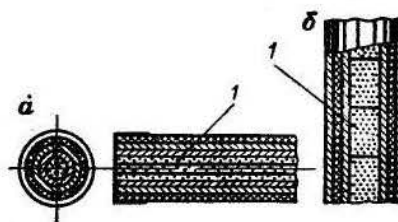
Наиболее широко известен и используется при прострелочно-взрывных работах детонирующий шнур в водонепроницаемой оболочке – ДШВ, изображённый на рис. 4.3, *а*. На изделие существует государственный стандарт.

Таблица 4.3

Рабочие параметры детонирующих шнуров

Обозначение	Тип ВВ	Масса ВВ, г/м	Наружный диаметр, мм	Условия применения			Примечание
				давление, МПа	температура, °С	среда	
ДША	ТЭН	12,5±0,5	4,8–5,8	–	–28 +50	Воздух,	В скважинах не применяют
ДШВ	ТЭН	12,5±0,5	5,5–6,1	50	–50...+50 (на воздухе), 100 (в скважине)	грунт Жидкость	
ДШТ 165 ДШТ 180 ДШУ 33	Гексоген Гексоген	20±2 33±2	6,3±0,9 8,5±0,9	50	≤ 165 ≤ 180 100	Воздух Жидкость	

Рис. 4.3. Схема устройства детонирующих шнуров



В ДШВ заряд размещается в гибких, сформированных из хлопчатобумажных нитей оболочках, покрытых слоем полихлорвинила, не пропускающего влагу. В нем размещено $12,5 \pm 1$ г/м взрывчатого вещества ТЭН 1. Выпускается бухтами по 50 и 100 м. Скорость детонации шнура 6,5–7,5 км/с. Шнур ДШВ должен сохранять детонационные свойства после выдержки в воде на глубине 0,5–1 м в течение 12–24 ч. Но, как показала практика применения шнура в скважинах, при герметизации его концов он успешно взрывается на глубинах в 2–3 км при температурах до 100 °С. Взрыв шнура ДШВ возбуждается электродетонатором ЭД 8. Отказы могут быть при прикреплении ЭД не по направлению движения детонационной волны по шнуру, перегибах шнура под острым углом или при наличии зазора между средством взрывания и шнуром. Дефекты изготовления – утонение и пропуски заряда ВВ – также частая причина отказов. Кроме того, причиной отказа или затухания начавшейся детонации может быть замокание заряда шнура. Последние чаще всего являются следствием повреждения оболочки (прокола в процессе спуска в скважину) кусочками проволоки кабеля, предметами, находящимися в скважинной жидкости, металлом буровой или обсадной колонны. У параллельных, прилегающих друг к другу на участке в 10 см и более шнуров детонация одного надежно передается другому.

Детонирующий шнур режут острым ножом, положив на деревянную пластину. От бухты отматывают отрезок необходимой длины и еще 10 м, чтобы в момент перерезания оставшаяся в бухте часть шнура находилась на расстоянии 10 м от режущего. На участке, расположенном по направлению к бухте, делают петлю из того же шнура так, чтобы шнур пересекался под углом 90°. При таком пересечении шнуров детонация от одной нити к другой не передается: случайно возникший при перерезании детонационный процесс разрушит в точке пересечения, не вызвав детонации, участок пересекаемого шнура, и детонация, дойдя до места пересечения, встретив разрыв, затухнет. Это дополнительная мера безопасности, которой не следует пренебрегать при работах

со шнуром. Поскольку, как показывает опыт применения шнура в условиях земной поверхности, одной из основных причин затухания его детонации являются утонение и пропуск заряда, то нужно перед употреблением внимательно осматривать используемый отрезок для выявления этих дефектов.

Таблеточные детонирующие шнуры (ДШТ) применяются при прострелочно-взрывных работах в скважинах для возбуждения взрыва зарядов корпусных перфораторов. Конструкция шнура изображена на рис. 4.3, б. Заряд собирают из пашек прессованного ВВ 1, заключенных в оболочку. Используют гексоген или октоген, могут применяться и другие ВВ, выбором которых и определяется в первую очередь температура применения шнура. Масса ВВ 20 г/м. ДШТ применяют в воздушной среде.

Имеющие аналогичную конструкцию детонирующие шнуры таблеточные термостойкие ДШТТ, рассчитанные на использование в контакте со скважинной жидкостью, несут навеску ВВ, достигающую 80 г на метр длины заряда. Это позволяет обеспечить более высокое инициирующее действие шнура.

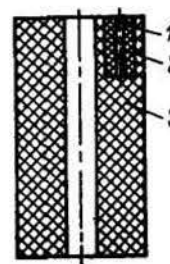
Детонирующий шнур усиленный ДШУЗЗ содержит 33 г/м гексогена. Применяется при температурах до 100 °С и давлении до 50 МПа. Рекомендуется использовать одним отрезком. Применяется в бескорпусных перфораторах для возбуждения взрыва кумулятивных зарядов.

Диаметры многих детонирующих шнуров, используемых геофизиками, превышают 6–10 мм, что создает известные трудности при конструировании малогабаритной прострелочно-взрывной аппаратуры, в частности спускаемой через насосно-компрессорные трубы. Срок их хранения 5 лет. Разрабатываемые детонирующие шнуры, прежде чем поступят на производство, проверяются на восприимчивость к передаче детонации, эластичность и полноту детонации. Испытания проводятся как на земной поверхности, так и в сосудах высокого давления в условиях, аналогичных скважинным.

Для надежного возбуждения ВВ, слабочувствительного к импульсу капсюля-детонатора или детонирующего шнура, применяют пашки-детонаторы, являющиеся промежуточными детонаторами, усиливающими инициирующий импульс изделий. В зависимости от назначения изготавливаются отдельными пашками разной конфигурации либо как элемент заряда. Пример последнего (рис. 4.4) – пашка прессованного тротила 1 с отверстием под электродетонатор 2 в литом тротиловом заряде 3, используемом при сейсмической разведке.

Заряды из взрывчатых веществ, как правило, изготавливаются в заводских условиях. Придание нужной формы чаще осуществляется прессованием и литьем, реже засыпкой или патронирова-

Рис. 4.4. Шашка литого тротила с промежуточным детонатором



нием. Большое значение при этом имеет прессуемость ВВ. Для повышения прессуемости в состав ВВ вводят добавки – пластификаторы, которые одновременно могут служить флегматизаторами. Удельное давление прессования, обычно равное 120–160 МПа, позволяет получать плотность заряда 1,5–1,65 г/см³, в зависимости от свойств вещества. У кумулятивных зарядов, где качество прессования имеет решающее значение, качество изделия проверяют отстрелом на мишени. Заливкой в оболочки снаряжают заряды торпед больших диаметров, а также пороховые заряды к некоторым видам оборудования, применяемым в геофизике.

Все изделия из ВВ, используемые в геофизике, имеют сроки хранения от двух до пяти лет, в течение которых гарантируется их работоспособность. Продление срока хранения должно быть подтверждено проверкой состояния изделия, выполняемой в установленном порядке по разработанным для этого методикам.

Ограничения обычно связаны со сроками использования вспомогательных материалов, резин, клеев и др. Сами ВВ, особенно термостойкие, могут храниться значительно дольше, не изменяя заметно свойств.

4.6.2. ТИПЫ ПЕРФОРАТОРОВ

Ленточные кумулятивные перфораторы. Кумулятивные заряды заключены в индивидуальные термобаростойкие оболочки, которые крепятся к стальной грузонесущей ленте. Взрывной патрон типа ПВГУ также крепится к стальной ленте. Отходящий от него детонирующий шнур плотно прилегает к выемке у каждого кумулятивного заряда. Малая объемная масса перфоратора заставляет применять дополнительные грузы. Средства иницирования и взрывания контактируют со скважинной жидкостью. Ленточный каркас после отстрела перфоратора извлекают из скважины. Повторному использованию ленточный каркас не подлежит. Спуск перфоратора в скважину осуществляется на геофизическом кабеле и через него же импульсом электрического тока перфоратор приводится в действие.

На рис. 4.5 представлены разрезы кумулятивных зарядов типа ЗПКС различных габаритов. Из таких зарядов, закрепляемых на металлическом ленточном каркасе, формируется перфоратор требуемой длины.

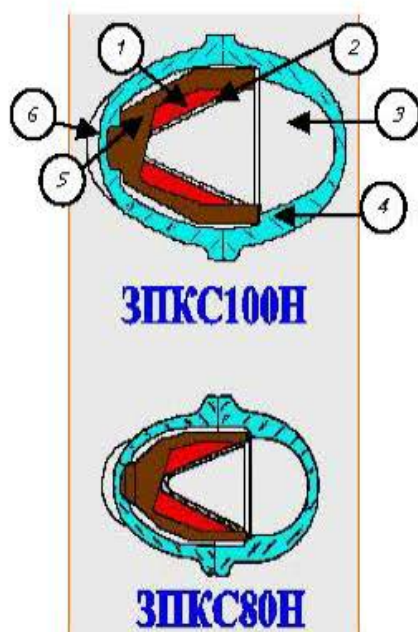


Рис. 4.5. Кумулятивный заряд в прочной индивидуальной оболочке: 1 – заряд ВВ с выемкой под облицовку; 2 – коническая тонкостенная облицовка (воронка); 3 – воздушная полость для формирования кумулятивной струи; 4 – прочная индивидуальная оболочка, выдерживающая большое гидростатическое давление в скважине; 5 – прочный кожух для увеличения активной части заряда ВВ, участвующей в формировании струи; 6 – место подсоединения детонирующего шнура

Оболочки из стекла или ситалла при срабатывании перфоратора полностью разрушаются, что гарантированно исключает засорение скважины при отсутствии в зарядах прочного кожуха, служащего для увеличения активной части заряда. Перфораторы применяются при давлении в скважине до 80 МПа и температуре до 160 °С. Глубина и диаметр пробиваемого канала зависят от массы заряда ВВ и его конструкции. Перфораторы могут применяться в вертикальных и наклонно направленных скважинах с зенитным углом до 0,7 рад, в которых по геолого-техническим условиям допустимо ограниченное фугасное воздействие на крепь.

Каркасные кумулятивные перфораторы (рис. 4.6). Сегментный каркас 1 этих перфораторов выполняет дополнительную функцию части термобаростойкой оболочки для каждого отдельного кумулятивного заряда. Другая часть оболочки, в которой запрессован кумулятивный заряд 2, герметично соединяется с сегментным каркасом. Перфоратор не требует дополнительных грузов и даже в промывочных жидкостях высокой плотности он обладает повышенной проходимостью. Сегментный каркас после отстрела перфоратора извлекается из скважины и повторному использованию не подлежит. Перфораторы спускают в скважину

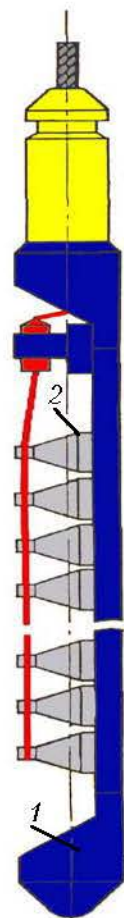


Рис. 4.6. Каркасныйкумулятивный перфоратор:
1 – каркас; 2 –кумулятивный заряд

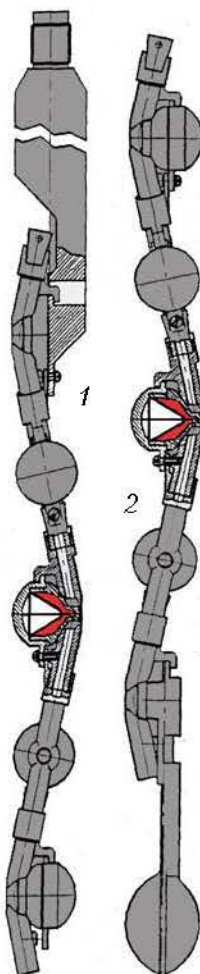


Рис. 4.7. Разрушающиеся полностью перфораторы:
1 –кумулятивный заряд; 2 – детонационная цепь

на геофизическом кабеле, через который электрическим импульсом их приводят в действие. Значительное смещение центра массы перфоратора определяет возможность формирования сети каналов только по одной образующей обсадной трубы даже при минимальном значении зенитного угла в интервале перфорации. После отстрела перфоратора в скважине остаются осколки ме-

таллических оболочек. Перфораторы применяют при давлении в скважине до 100 МПа и температуре до 150 °С. Перфораторы применяют в вертикальных и наклонно направленных скважинах с зенитным углом до 0,7 рад, в которых по геолого-техническим условиям допустимо ограниченное фугасное воздействие на крепь.

Разрушающиеся полностью перфораторы (рис. 4.7). Кумулятивные заряды 1 заключены в индивидуальные термобаростойкие алюминиевые оболочки особой конфигурации, позволяющей соединять заряды в гирлянды 2 без дополнительного каркаса. Перфоратор может быть применён для спуска его через НКТ и при наличии лубриката обеспечивает возможность выполнения перфорации при равновесии или вскрытия при депрессии. Малая объемная масса перфоратора вынуждает применять дополнительные грузы. При срабатывании перфоратора происходит полное разрушение его. Остающиеся в скважине осколки и грузы могут создавать помехи и поэтому подлежат уничтожению щелочью. Спуск перфоратора осуществляется на геофизическом кабеле, через который электрическим импульсом он приводится в действие. Перфоратор обладает повышенным фугасным действием на конструкцию скважины. Перфораторы применяют при давлении в скважине до 80 МПа и температуре до 150 °С. Перфораторы могут быть применены в вертикальных и наклонно направленных скважинах с зенитным углом до 0,7 рад, в которых по геолого-техническим условиям допустимо фугасное воздействие на крепь.

Корпусные кумулятивные перфораторы многократного использования (рис. 4.8). Кумулятивные заряды, средства инициирования и взрывания заключены в общий термобаростойкий не деформирующийся при взрыве зарядов корпус. Последний может использоваться до 30 раз до появления заметных деформаций. Перфораторы спускают в скважину на геофизическом кабеле, через который электрическим импульсом его приводят в действие. При выстреле перфоратора в скважину выбрасываются простреленные диски, закрывающие отверстия для выхода кумулятивных струй. Остальные детали и осколки остаются в корпусе и вместе с ним поднимаются на поверхность. Перфораторы применяют в вертикальных и наклонно направленных скважинах с зенитным углом до 0,7 рад. Предельные параметры по температуре и давлению 180 °С и 50 МПа, соответственно. Перфоратор применяют, прежде всего, для дострелов и перестрелов скважин старого фонда из-за практического отсутствия фугасного воздействия на их конструкцию.

Корпусные кумулятивные перфораторы однократного использования (рис. 4.9). Кумулятивные заряды, средства ини-

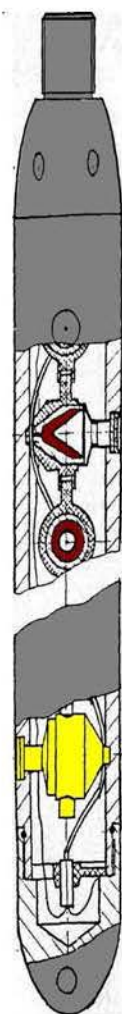


Рис. 4.8. Корпусный кумулятивный перфоратор многократного использования

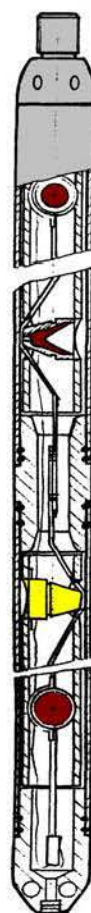


Рис. 4.9. Корпусный кумулятивный перфоратор однократного использования

цирования и взрывания заключены в общий термобаростойкий корпус. Допускается в определенных пределах деформация корпуса при срабатывании кумулятивных зарядов. Простреленный кумулятивными зарядами и деформированный корпус повторному использованию не подлежит. Жесткие ограничения, накладыва-

ваемые на величину деформации корпуса при срабатывании кумулятивных зарядов, связаны с предупреждением аварийных ситуаций при извлечении из скважины отстрелянного перфоратора. Поэтому для таких перфораторов задаются не только максимально допустимые давления в скважине, но и минимальные значения гидростатического давления, при которых деформация корпуса в радиальном направлении не превышает 5 %. Спуск перфоратора в скважину осуществляется на геофизическом кабеле, через который электрическим импульсом он приводится в действие. Перфораторы обладают низким фугасным действием на конструкцию скважины и позволяют за одну спуско-подъемную операцию простреливать протяженные интервалы. Перфораторы применяют при давлении в скважине до 120 МПа и температуре до 210 °С. Перфораторы относятся к полноразмерным и поэтому могут быть вооружены кумулятивными зарядами с очень высокой пробивной способностью. Перфораторы применяют в вертикальных и наклонно направленных скважинах с зенитным углом до 0,7 рад. Применение зарядных модулей значительно упрощает и ускоряет сборку перфоратора на скважине.

Корпусные кумулятивные перфораторы специального назначения. Кумулятивные заряды, средства инициирования и взрывания заключены в общий термобаростойкий корпус однократного использования. Последний может состоять из одной или нескольких секций, свинчиваемых герметично между собой на устье скважины по мере спуска очередной секции. Перфораторы спускают на НК или лифтовых трубах. Во избежание разрушения и заклинивания корпуса в скважине, вводятся нижний и верхний пределы применения перфоратора по давлению. Эти пределы определены для конкретных зарядных комплектов и поэтому использование в этих перфораторах других зарядных комплектов запрещается. Перфораторы оснащены устройством инициирования, а в отдельных случаях – адиабатическим взрывателем. Привод перфоратора в действие осуществляется сбрасыванием в скважину ударника (при малых зенитных углах) или гидравлическим импульсом с предварительным сбросом в скважину стального обрезиненного шара. Последний выполняет функцию перекрытия циркуляционного канала в НКТ с одновременным обеспечением нагрузки на шток головки перфоратора для срезания чеки и срабатывания устройства инициирования. Перфоратор после срабатывания может быть сброшен в зумпф или оставлен в интервале перфорации на весь период испытания скважины. В этой связи обязательна оценка факта и полноты срабатывания перфоратора. Перфораторы могут применяться при давлении в скважине до 150 МПа. Предельная тем-

пература применения зависит от применяемой системы инициирования, средств взрывания и типа кумулятивных зарядов. Глубина пробиваемого канала сильно зависит от длительности пребывания перфоратора при высокой температуре перед выстрелом.

Пулевые перфораторы. Пулевые перфораторы с улучшенной внутренней баллистикой за счет длинного вертикально-криволинейного ствола используют энергию горения порохов. Перфоратор спускают в скважину на геофизическом кабеле, через который электрическим импульсом приводят в действие. Перфораторы применяют при давлении до 100 МПа и температуре до 200 °С. Глубина пробиваемого канала достигает 500 мм по комбинированной мишени. Высокая объемная масса пулевых перфораторов определяет их хорошую проходимость даже в случае заполнения скважин утяжеленными промывочными жидкостями. После каждого выстрела требуется тщательная очистка внутренних полостей, что реально осуществимо только в условиях базы. Пулевые перфораторы заряжают на базе и доставляют на скважину в виде отдельных секций.

Большая масса пули обеспечивает не только пробитие глубоких каналов, но и формирование вокруг каналов протяженных трещин, что и определяет во многих случаях высокую эффективность вскрытия пластов пулевыми перфораторами.

4.7. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ

Для вскрытия пласта при депрессии или дострелах и расширениях интервала перфорации при равновесии без глушения скважины используют малогабаритные перфораторы, спускаемые в скважину на геофизическом кабеле через НКТ и комплекс оборудования, представленный на рис. 4.10. Башмак НКТ необходимо оборудовать воронкой во избежание зацепа кабельным наконечником или извлекаемым каркасом за нижнюю муфту. Устье скважины оборудуется аварийной задвижкой и на неё устанавливается лубрикатор. Задача последнего состоит в обеспечении возможности спуска в скважину перфораторов и геофизических приборов в условиях избыточного давления на устье. Любой лубрикатор состоит из камеры, герметично соединённой с устьем, нижней задвижки и верхнего сальника, через который движется кабель. При высоких давлениях на устье скважины в герметизирующее устройство лубрикатора вводится гидродинамическая система с подачей под сальник густой смазки или лабиринтовое уплотнение с подачей в него жидкости.

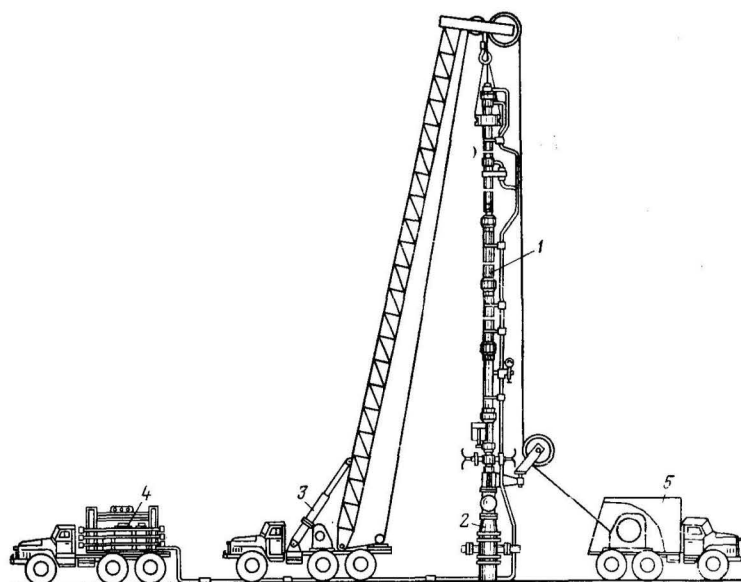


Рис. 4.10. Схема комплекса оборудования для геофизических исследований и перфорации скважин аппаратами на кабеле при герметизированном устье:
 1 – лубрикатор; 2 – обвязка устья скважины; 3 – передвижная подъемная установка; 4 – станция управления и насосный агрегат для подачи густой смазки; 5 – каротажный подъемник

Различные системы уплотнения в лубрикахторах приведены на рис. 4.11.

Для спуска перфораторов в скважину на НКТ и надёжного их отстрела применяется перфораторная головка (рис. 4.12.)

В верхней части перфораторной головки имеется муфта-переходник для соединения с колонной насосно-компрессорных труб. Ниже упора штока в головке имеются окна для циркуляции скважинной жидкости между затрубьем и внутренним объемом НКТ. К нижней части головки герметично подсоединяется корпус перфоратора, в котором размещены кумулятивные заряды с детонирующим шнуром, который вставлен в устройство инициирования. До сбрасывания в НКТ стального обрезиненного шара перфоратор спускают на колонне НКТ в заглушенную скважину и устанавливают в заданном интервале с привязкой к геологическому разрезу. Устье скважины герметизируют. Циркуляционные окна в головке перфоратора обеспечивают смену жидкости в скважине и создание возможной необходимой депрессии или равновесия. Обрезиненный шар сбрасывают через

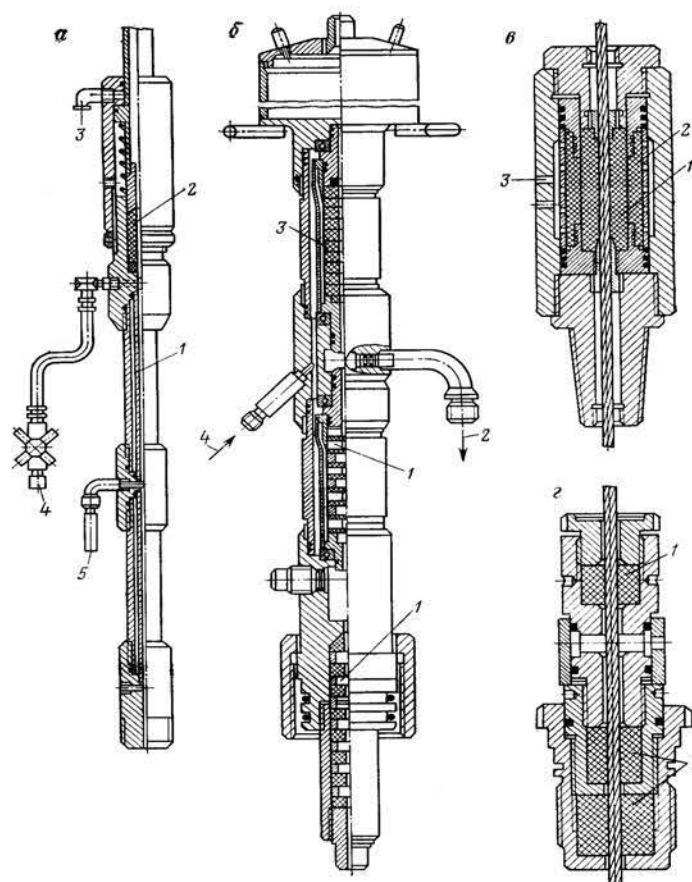


Рис. 4.11. Устройство лубрикаторов для спуска геофизической и прострелочной аппаратуры на кабеле при герметизации устья скважины:
 Конструкции: а – гидродинамическая: 1 – цилиндрическая втулка; 2 – сальник; 3 – подача жидкости; 4 – сброс смазки; 5 – подача густой смазки; б – лабиринтовая: 1 – лабиринтовые уплотнения; 2 – стравливание газа; 3 – сальник; 4 – подача жидкости; в – конструкция контактная: 1 – сальник разъемный; 2 – диафрагма; 3 – подача жидкости; г – контактная: 1 – сальник

устьевые задвижки в НКТ. Через 20–30 минут шар достигает посадочного места и останавливается на упоре штока. С этого момента затрубье и внутренний объём НКТ разобщены. Заполняя НКТ жидкостью, создаём нагрузку на верхнюю чеку. При срезании этой чеки сдвигается шток и удерживающие этот шток предохранительные шарики выпадают внутрь ударника. Теперь нагрузка переходит на нижнюю чеку. После срезания нижней

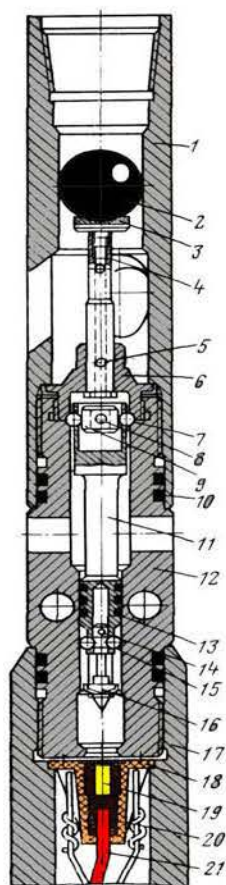


Рис. 4.12. Перфораторная головка с устройством инициирования:

1 – муфта-переходник к колонне насосно-компрессорных труб; 2 – резиновый шар; 3 – упор штока; 4 – шток; 5, 8, 14 – чека; 6 – стопорная гайка; 7, 15 – предохранительные шарики; 9 – втулка; 10, 13 – уплотнительные кольца; 11 – ударник; 12 – корпус взрывного устройства; 16 – боек; 17 – корпус головки; 18 – пластмассовый корпус устройства инициирования; 19 – капсуль-детонатор; 20 – шашки ВВ; 21 – детонирующий шнур

чеки и освобождения предохранительных шариков боек перемещается к устройству инициирования и наносит колющий удар по устройству инициирования, в котором вмонтирован капсуль-детонатор. При срабатывании капсуля-детонатора и дополнительной шашки ВВ, детонация возбуждается в детонирующем шнуре. В свою очередь, детонирующий шнур возбуждает детонацию в кумулятивных зарядах.

Сработавший перфоратор не позволяет спускать аппаратуру в прострелянный интервал и оценивать полноту срабатывания перфоратора, а также реакцию пласта на кратковременное интенсивное воздействие. Если был получен приток пластового флюида, то перфоратор может быть оставлен в скважине до её ремонта. При подъёме таких перфораторов требуется присутствие специалиста по ПВР.

4.8. ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ

Геофизическое сопровождение вторичного вскрытия требуется для решения следующих задач:

- контроля за спуском в скважину перфоратора на кабеле;
- привязки интервалов перфорации к геологическому разрезу;
- контроля за фактом и полнотой срабатывания перфоратора;
- определения фактического положения интервала перфорации;
- оценки качества выполненных прострелочных работ.

При вскрытии пластов в условиях репрессии полноразмерными перфораторами и отсутствии в скважине колонны НКТ, еще

до спуска ее в скважину необходимо иметь информацию о получении после прострелочных работ гидродинамической связи внутрискважинного пространства с пластом. Если колонна НКТ спущена, то такую информацию получают сразу после создания депрессии.

Начальнику каротажно-перфораторной партии перед выездом на скважину производственно-технологической службой выдается заказ и индивидуальный технический проект. К заявке прилагается диаграмма РК (ГК или НГК) на которой нанесен интервал перфорации.

4.8.1. КОНТРОЛЬ ЗА СПУСКОМ В СКВАЖИНУ ПЕРФОРАТОРА НА КАБЕЛЕ

Компоновка перфоратора со специальным локатором муфт (ЛМ), стойким к воздействию взрывных нагрузок, обеспечивает возможность непрерывного контроля за движением перфоратора в скважине путем контроля за прохождением перфоратора мимо муфт обсадной колонны или НКТ. При несанкционированной остановке перфоратора в скважине его спуск своевременно может быть прекращен.

4.8.2. ПРИВЯЗКА ИНТЕРВАЛОВ ПЕРФОРАЦИИ К ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ РАЗРЕЗУ

Привязка должна осуществляться с использованием методов радиоактивного каротажа. Для этих целей в терригенных разрезах используют гамма-каротаж (ГК), а в карбонатных – нейтронный гамма-каротаж (НГК).

Перед выездом на скважину начальник отряда получает на базе каротажную диаграмму РК, записанную в аналоговой форме с известным масштабом и нанесённым на ней запланированным интервалом перфорации. Последний наносится по результатам комплексной интерпретации данных ГИС, записанных в открытом стволе скважины.

В скважинах глубиной до $2 \cdot 10^3$ м для привязки может быть применён следующий метод (рис 4.13).

В скважину до искусственного забоя спускают прибор РК. Запись ведут при подъёме прибора в том же масштабе, что и запись основной кривой РК в открытом стволе.

Прибор останавливают над верхней границей планируемого интервала перфорации и на записываемой кривой РК ставят метку. Одновременно на кабеле между устьем скважины и подъёмником завязывают метку, которая должна совпадать с неподвижным относительно земли репером.

Совмещают новую записанную вспомогательную кривую РК с основной.

На основную диаграмму переносят отметку стоянки прибора РК.

По основной диаграмме РК рассчитывают расстояние от стоянки прибора РК (метки) до нижней границы планируемого интервала перфорации (H_n).

Аналогичным образом определяют расстояние от стоянки

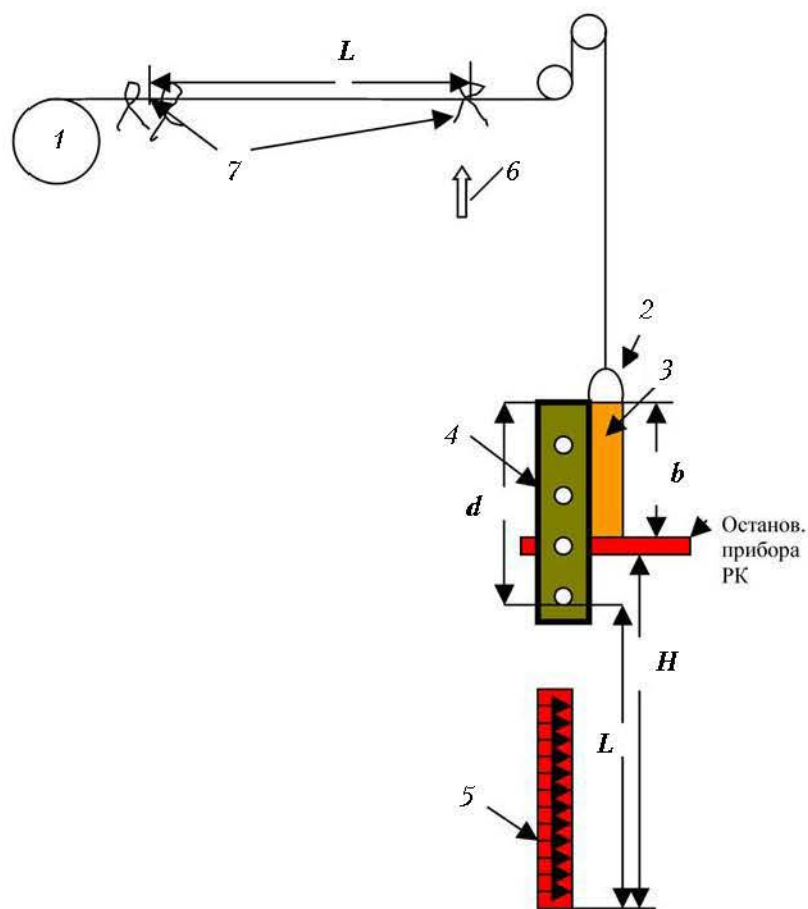


Рис. 4.13. Схема привязки перфорации к геологическому разрезу и наметенному интервалу перфорации:

1 – лебедка подъемника; 2 – кабельный наконечник; 3 – скважинный прибор РК и его длина b ; 4 – перфоратор и его длина d ; 5 – наметенный к перфорации интервал; 6 – неподвижный репер на поверхности Земли; 7 – завязанные метки на кабеле

прибора РК до верхней границы планируемого интервала перфорации (H_v).

При вскрытии пласта снизу вверх и отсоединении прибора РК перед присоединением к кабелю перфоратора, положение первой метки на кабеле для установки перфоратора находят следующим образом. От завязанной метки на кабеле в сторону подъёмника откладывают отрезок длины L и завязывают двойную метку:

$$L = H_n - d + b,$$

где d – расстояние от кабельного наконечника до нижнего кумулятивного заряда или ствола (пулевого) перфоратора; b – длина прибора РК.

Совпадение двойной завязанной метки с неподвижным репером на поверхности земли обеспечивает совпадение нижнего перфорационного канала с нижней границей планируемого интервала перфорации. Аналогично рассчитывают и завязывают метки на кабеле для спуска следующих перфораторов. Схема привязки перфорации к геологическому разрезу и намеченному интервалу перфорации приведена на рис. 4.13.

В скважинах глубиной свыше $2 \cdot 10^3$ м применяют следующий метод привязки.

В скважину спускают комплексный прибор, состоящий из прибора РК и прихватопредельителя (ПО) или магнитного индуктора.

Спуск комплексного прибора прекращают не доходя 10–20 м до верхней границы планируемого интервала перфорации.

После полного затухания колебаний кабеля на обсадной трубе ставят двойную магнитную метку. Одновременно на кабеле между устьем скважины и подъёмником завязывают метку. Последняя должна совпадать с неподвижным репером на поверхности земли. Спускают комплексный прибор до искусственного забоя. На подъёме прибора одновременно ведут запись кривых РК и ПО.

После записи двойной магнитной метки регистрацию прекращают и завершают подъём прибора.

Вспомогательную кривую РК совмещают с основной. Переносят магнитную метку со вспомогательной кривой на основную кривую РК.

По основной диаграмме РК рассчитывают расстояние от двойной магнитной метки до нижней и верхней границ планируемого интервала перфорации.

Для установки перфоратора размечают кабель и завязывают метки в соответствии с изложенным выше приёмом.

Установка перфоратора, спускаемого на насосно-компрессорных трубах.

Высокая точность привязки интервала перфорации к геологическому разрезу может быть обеспечена только с использованием метода радиоактивного каротажа.

В скважину спускают комплекс, состоящий из прибора РК и прихватоопределителя или магнитного индуктора.

Прибор останавливают над планируемым интервалом перфорации. После полного затухания колебаний системы кабель – приборы, на обсадной колонне ставят двойную магнитную метку. Продолжают спуск прибора до искусственного забоя.

На подъёме прибора одновременно записывают кривые РК и ПО. Такая вспомогательная кривая РК записывается в том же масштабе, что и основная, записанная в открытом стволе или в обсадной колонне. После записи двойной магнитной метки запись прекращают и завершают подъём прибора.

Совмещают вспомогательную и основную кривые РК и на последнюю переносят двойную магнитную метку.

По основной кривой РК рассчитывают расстояние от двойной магнитной метки до нижней H_n и верхней H_v границ планируемого интервала.

На расстоянии H_n от нижнего заряда перфоратора на НКТ наносят одинарную или тройную магнитную метку. Совпадение магнитных меток на обсадной колонне и НКТ обеспечит точную установку перфоратора в планируемом интервале разреза.

Спускают перфоратор на НКТ с постоянным контролем их общей длины. Когда расчётная длина НКТ соответствует размещению перфоратора в планируемом интервале перфорации, проводят корректировку установки перфоратора. Для корректировки установки перфоратора спускают в НКТ малогабаритный прихватоопределитель и определяют расстояние между магнитными метками на НКТ и обсадной колонне. Компонуют из НКТ, планшайбы и патрубков необходимую длину для совмещения магнитных меток на НКТ и обсадной колонне. После допуска в скважину НКТ и посадки на планшайбу ещё раз определяют совпадение магнитных меток.

Все записи вспомогательных кривых РК и ПО хранят в деле скважины.

4.8.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ПЕРФОРАЦИИ

Необходимость определения фактического положения интервала перфорации вызвана следующим рядом причин:

- приведением перфоратора в действие, не дожидаясь полного прекращения колебательного процесса в геофизическом кабеле;
- сложностью получения информации в режиме on-line о факте и полноте срабатывания перфоратора. Особую остроту определение фактического положения интервала перфорации приобретает для полностью разрушающихся перфораторов, перфораторов, каркас или корпус которых сбрасывают в зумпф после отстреливания.

Контроль за фактическим положением интервала перфорации осуществляется локатором муфт (ЛМ), индукционным дефектомером (ДСИ) и электротермометрами (рис. 4.14).

ЛМ и ДСИ дают надёжную информацию только в случае достаточно больших деформаций стенки обсадной колонны, то есть при применении бескорпусных перфораторов или создании высокой плотности перфорации.

Термометрия применяется для исключения грубых ошибок в местоположении фактического интервала перфорации и осуществляется стандартными модулями, включающими термометр и РК, спускаемыми на кабеле.

Интервал времени между термометрией и отстрелом перфоратора не должен превышать трех часов.

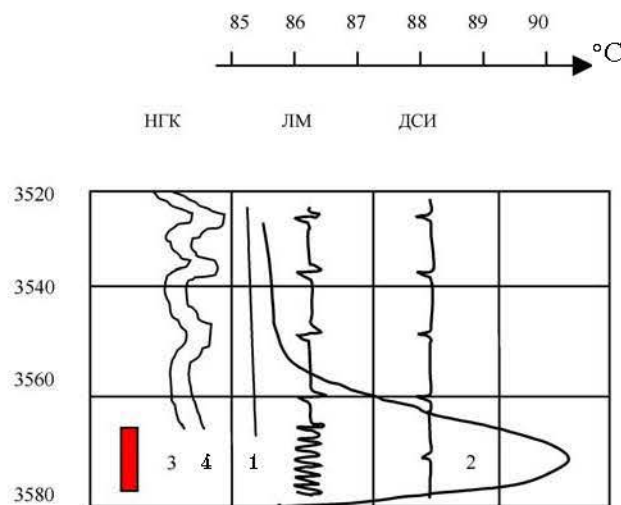


Рис. 4.14. Пример контроля фактического положения интервала перфорации с помощью ЛМ, ДСИ и термометрии. Объект вскрыт перфоратором ПКО 89; 1, 2 – термометрия до и после перфорации; 3 и 4 – основная и вспомогательная кривые НГК. Интервал выделяется только локатором муфт и термометрией

При проведении перфорации внутри ранее простреленного интервала для определения фактического положения достреляемого интервала применяется только термометрия, осуществляемая совместно с РК. По данным термометрии имеется принципиальная возможность оценивать наличие гидродинамической связи скважины с пластом до вызова притока.

4.9. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА КОНСТРУКЦИЮ СКВАЖИНЫ

Структура кумулятивных перфораторов, представляющая собой гирлянду зарядов взрывчатого вещества, в которой строго выдерживается расстояние между соседними зарядами, определяет и особенность воздействия взрыва на крепь скважины или собственный корпус перфоратора. Общее количество зарядов в перфораторе определяется особенностью его конструкции и задачей, стоящей перед перфорацией. Наибольшему воздействию конструкция скважины подвергается при отстреле каркасного (бескорпусного) перфоратора в условиях полного или частичного заполнения скважины жидкостью.

4.9.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взрыв одиночного заряда.

Рассмотрим взрыв уединённого кумулятивного заряда в скважине, закреплённой обсадной колонной и заполненной водой, и проведём оценку кратковременных интенсивных нагрузок на крепь скважины.

В стендовых условиях возможно применение различных методов регистрации как непосредственно самого давления на фронте ударной волны (пикового давления), так и других параметров, функционально связанных с пиковым давлением (скорость распространения УВ, массовая скорость за фронтом волны). Все применяемые методы характеризуются существенной погрешностью, что связано с самой особенностью ударных волн. Мы остановимся на фотографическом методе регистрации скорости распространения ударной волны от взрыва кумулятивного заряда, имеющего достаточно сложную конфигурацию

Применение метода сверхскоростной киносъёмки позволяет получать распределение давления на фронте первичной ударной волны, в момент достижения ею внутренней поверхности трубы. Эксперименты проводятся с использованием аквариума, заполненного водой, в котором подвешивают короткий патрубок. Ку-

кумулятивный заряд с подсоединённым к нему детонирующим шнуром размещают внутри патрубку. Длина патрубку и его ориентация в пространстве должна обеспечивать хороший обзор поля между кумулятивным зарядом и внутренней поверхностью трубы. Именно в этом поле будут распространяться ударные волны, которые необходимо фиксировать при взрыве.

На рис. 4.15 приведена схема эксперимента для скоростного фотографирования ударных волн при взрыве кумулятивного заряда. Принцип фотографической регистрации ударной волны базируется на эффекте изменения коэффициента оптического преломления воды при сжатии.

Покадровая регистрация процесса позволяет определить скорость перемещения ударной волны в заданном направлении, а затем, используя известные связи гидродинамических величин со скоростью перемещения ударной волны, определить давление на фронте ударной волны в заданном направлении. В таких экспериментах решающее значение имеет подсветка, так как она должна обеспечить просвечивание слоя воды толщиной 0,4–0,5 м и бронестекло, отделяющее взрывную камеру от сверхскоростного регистратора. Лучшие результаты, как показал опыт, достигаются при использовании взрывной подсветки (например, подсветка взрывом двух цилиндрических зарядов из смеси тротила и гексогена (Т/Г), массой по 30 г каждый). Стенки аквариума изготавливаются из обычного стекла, толщиной 4 мм. Естественно, при каждом взрыве аквариум полностью разрушается, но при

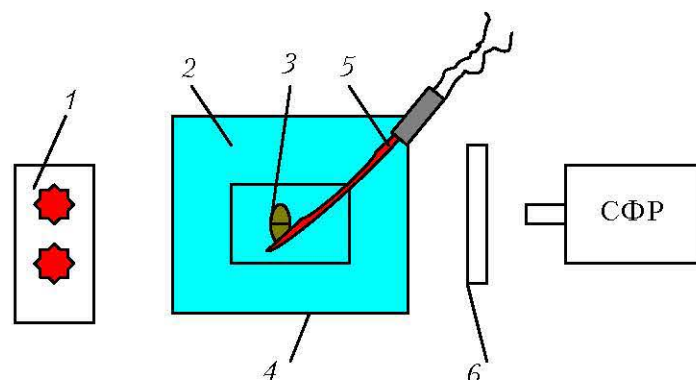


Рис. 4.15. Схема эксперимента для фоторегистрации ударных волн в трубе при взрыве кумулятивного заряда:
1 – взрывная подсветка; 2 – аквариум с водой; 3 – кумулятивный заряд; 4 – короткий патрубок; 5 – детонирующий шнур с детонатором; 6 – бронестекло; СФР – сверхскоростной фоторегистратор

этом удаётся сфотографировать процесс от момента взрыва заряда перфоратора до достижения ударной волной внутренней поверхности трубы и отражения этой волны от стенки трубы.

В опытах использовались кумулятивные заряды двух типов: ЗКПРУ65 массой 30 г и ЗПКС80 массой 21,5 г. Эти заряды существенно отличаются друг от друга ещё и конструкцией. Заряд ЗКПРУ65 имеет оболочку из дюралюминиевого сплава и между боковой поверхностью заряда и оболочкой отсутствуют воздушные зазоры. Заряд ЗПКС80 размещается в оболочке из стекла и между боковой поверхностью заряда и оболочкой имеются достаточно большие воздушные пазухи. Различия в характеристиках оболочек, масс зарядов (масса заряда у ЗКПРУ65 больше на 40 %) обуславливает не только разные величины давлений на фронте падающих ударных волн, но и их распределение по окружности трубы.

На рис. 4.16 представлено распределение давлений в волне сжатия, падающей на внутреннюю поверхность трубы ($D_t = 100$ мм) при взрыве заряда ЗПКС80.

На рис. 4.17 представлено распределение давлений в волне сжатия, падающей на внутреннюю поверхность трубы ($D_t = 100$ мм) при взрыве заряда ЗКПРУ65.

Для оценки начального давления в преломлённой в металл волне у внутренней поверхности трубы, с учётом распределения по окружности трубы давлений в падающей волне (см. рис. 4.16 и 4.17), можно использовать зависимость Коула Р., представленную на рис. 4.18.

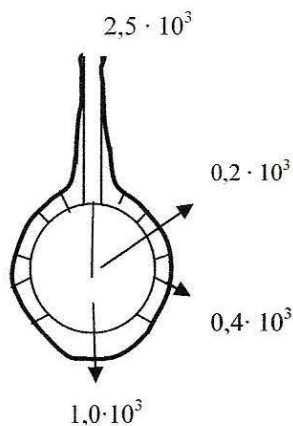


Рис. 4.16. Распределение давлений в волне сжатия, падающей на стенку трубы от взрыва заряда ЗПКС80. Цифры – величины давлений в МПа

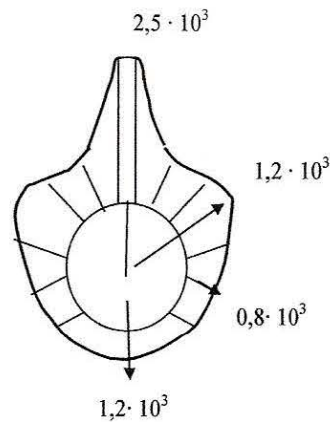


Рис. 4.17. Распределение давлений в волне сжатия, падающей на стенку трубы от взрыва заряда ЗКПРУ65. Цифры – величины давлений в МПа

В качестве примера проведём оценку пикового давления на внутренней и внешней поверхностях трубы с внутренним диаметром $D_t = 0,1$ м и толщиной стенки 0,7 см при взрыве зарядов ЗКПРУ65 и ЗПКС80. Для этого по направлению, составляющему с осью кумулятивной струи 1 рад, из распределения пиковых давлений P_1 в падающей волне (см. рис. 4.16 и 4.17) находим: для заряда ЗКПРУ65 $P_1 = 1,2 \cdot 10^3$ МПа; для заряда ЗПКС80 $P_1 = 0,3 \cdot 10^3$ МПа.

Используя зависимость Р. Коула (рис. 4.18), находим отношение P_2/P_1 при соответствующих значениях P_1 и заданном направлении относительно кумулятивной струи: для ЗКПРУ65 $P_2/P_1 = 3,15$; для ЗПКС80 $P_2/P_1 = 2,3$. Тогда для ЗКПРУ65 $P_2 = P_0^* = 3,78 \cdot 10^3$ МПа, а для ЗПКС80 $P_2 = P_0^* = 0,69 \cdot 10^3$ МПа.

Пиковые давления $P_2 = P_0^*$ имеют место и в стенке трубы в непосредственной близости от внутренней поверхности трубы. Для оценки пикового давления $P_{r=r_n}^*$ в металле трубы у её внешней поверхности необходимо учесть, что по мере продвижения ударной волны в металле давление на её фронте будет уменьшаться из-за расширения поверхности фронта и диссипации энергии.

Уменьшение давления в результате расширения поверхности фронта ударной волны может быть выражено в следующем виде:

$$P_r^* = P_0^* \left(\frac{r}{r_0} \right)^n, \quad (4.1)$$

где P_r^* – пиковое давление на расстоянии r от оси трубы $r \geq r_0$;

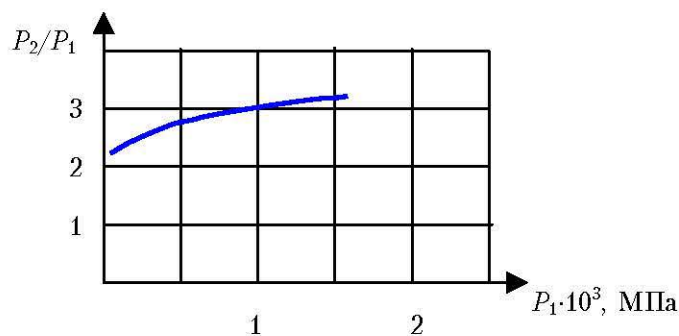


Рис. 4.18. Зависимость соотношения между пиковым давлением в падающей УВ на внутреннюю поверхность трубы P_1 и кратностью увеличения давления в металле трубы

r_0 и r_n – внутренний и наружный радиусы трубы; P_0^* – пиковое давление на внутренней поверхности трубы.

Уменьшение давления из-за потерь на внутреннее трение для плоской волны при перемещении её на расстояние $r - r_0$ может быть представлено как

$$P_r^* = P_0^* \exp \{-\alpha(r - r_0)\}. \quad (4.2)$$

Результирующее пиковое давление на внешней поверхности трубы с учётом (4.1) и (4.2) приобретёт следующий вид

$$P_r^* = P_0^* \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^n \exp \{-\alpha(r_n - r_0)\}, \quad (4.3)$$

где α – коэффициент затухания пикового давления в слое металла, варьирующий для сталей в диапазоне $0,07-0,35 \text{ см}^{-1}$.

Для сферической ударной волны в формуле (4.3) $n = 2$. Формула (4.3) применима только в тех случаях, когда θ ударной волны превышает время пробега ударной волны в слое металла (для нашего случая в стенке трубы). Так, для детонирующего шнура, имеющего массу ВВ на погонный метр $33-35 \text{ г}$, при взрыве его на внутренней поверхности трубы формируется ударная волна с пиковым давлением $(3 \div 5) \cdot 10^3 \text{ МПа}$, и $\theta = 10^{-7} \text{ с}$, которая на внешней поверхности трубы с толщиной стенки $0,7 \text{ см}$ будет иметь пиковое давление, не превышающее десятков МПа.

Принимая для трубы группы прочности Д $\alpha = 0,3$ при толщине стенки $0,7 \text{ см}$, получим значения пикового давления у внешней поверхности трубы $P_{r=r_n}^*$: для заряда ЗКПРУ65 – $2,38 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, для заряда ЗПКС80 – $0,43 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

На рис. 4.19 приведена схема распределения пиковых давлений в стенке трубы при взрыве зарядов в скважине $P_{r=r_n}^*$.

Мы рассмотрели только ту часть процесса, которая связана с ударной волной. Эта ударная волна, близкая по форме к сферической, создаёт в стенке трубы сжимающие радиальные напряжения и растягивающие тангенциальные. Первая ударная волна после отражения её от внутренней поверхности трубы и последующего отражения от газового пузыря (расширяющихся продуктов взрыва) вновь достигнет внутренней поверхности трубы. Дальнейшее развитие процесса будет зависеть от гидростатического давления, конструкции и массы заряда прочности трубы и среды за трубой. При низком гидростатическом давлении и отсутствии цемента за трубой взрыв такого заряда как ЗКПРУ65 вызовет в стенке трубы недостаточной прочности трещинообра-

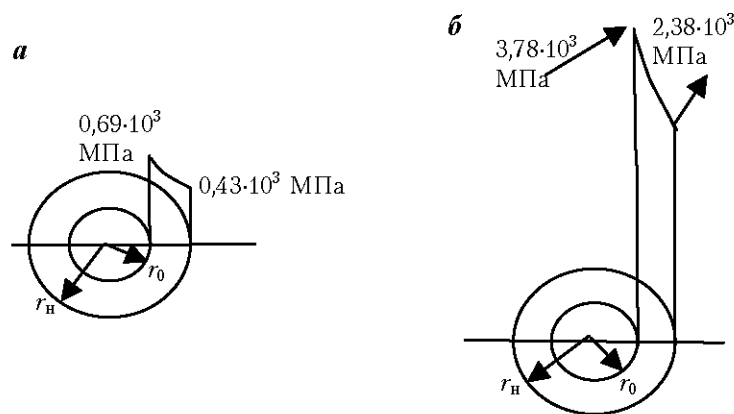


Рис. 4.19. Схема распределения пиковых давлений в стенке трубы и затрубном цементе при отстреле кумулятивных зарядов в скважине: *а* – пиковое давление в УВ, преломлённой в металл трубы, у внутренней и наружной поверхности трубы, заряд ЗПКС80; *б* – пиковое давление в УВ, преломлённой в металл трубы, у внутренней и наружной поверхности трубы, заряд ЗКПРУ65; r_0 и r_n – внутренний и наружный радиусы трубы

зование. Сам процесс трещинообразования можно разделить на две основные стадии. На первой стадии первичная ударная волна доводит металл до начального пластического состояния и возникновения микротрещин вокруг перфорационного канала. На второй стадии расширяющиеся продукты взрыва разгоняют жидкость в трубе до больших скоростей и тем самым способствуют развитию трещины в теле трубы.

Если за трубой находится воздушная среда, то кроме трещины может произойти и откол слоя металла. Такой эффект имеет место в тех случаях, когда к внешней поверхности трубы подходит интенсивная ударная волна сжатия, которая на границе с воздухом отражается и становится волной разрежения. При этом растягивающие напряжения могут превысить прочность стали на растяжение. За первой ударной волной и отражением её сначала от внутренней поверхности трубы, а затем от газового пузыря последует вторая ударная волна, которая по интенсивности на порядок слабее первой.

Волновой картиной в стенке трубы, связанной с многократными отражениями вторичных ударных волн от внутренних и внешних поверхностей трубы можно пренебречь.

С ростом гидростатического давления уменьшает время расширения газового пузыря до максимального размера, да и сам размер пузыря уменьшается.

Это приводит к некоторому увеличению давления на фронте как первичной, так и вторичных ударных волн, но гидропоток снижается существенно. Итогом такого перераспределения энергии является уменьшение импульса, действующего на стенку трубы.

По мнению многих исследователей пластические деформации обсадных труб в интервале перфорации, если они не сопровождаются появлением недопустимых трещин и разрушений, не представляют опасности для испытаний и эксплуатации скважин. Однако следует отметить, что деформация муфт в самом интервале перфорации и даже за его пределами представляет опасность, часто отложенную на длительный период времени и проявляющуюся в потере герметичности резьбовых соединений обсадных труб.

В связи с широким применением во многих нефтегазовых регионах бескорпусных перфораторов, характеризующихся относительно сильным воздействием на конструкцию скважины, особую важность приобретают исследования деформации обсадных труб при различной степени их закрепления и фактора прочности обсадных труб, представляющего собой произведение толщины стенки трубы b на предел текучести материала σ_t . Достаточно представительными в этом направлении являются экспериментальные исследования, выполненные В.Т. Беллом и Д.Б. Шором [61]. На рис. 4.20. представлены графики зависимости радиаль-

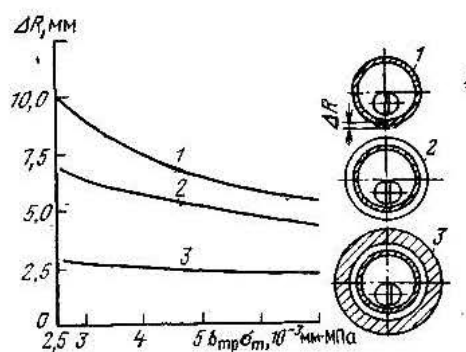


Рис. 4.20. Графики зависимости радиальной деформации ΔR обсадных труб от фактора прочности и степени закрепления их в скважине (по В.Т. Беллу и Д.Б. Шору):

1 — свободная (незакрепленная) труба диаметром 140 мм с толщиной стенки 7,5 мм; 2 — то же, в цементной оболочке толщиной 19 мм с кожухом из листовой стали; 3 — то же, зацементированная в стальном кольце толщиной стенки 25 мм при толщине слоя цемента 19 мм; во всех случаях использовался заряд от бескорпусного перфоратора в алюминиевой оболочке с массой 20,5 г, прилегающий к стенке трубы; гидростатическое давление было равно 7 МПа

ной деформации ΔR обсадных труб от прочностной характеристики и степени закрепления их в скважине.

При оценке деформации и разрушении труб под действием статических и динамических нагрузок, необходимо учитывать наличие в стенках труб концентраторов напряжений (плен, закатов, трещин, и других дефектов металлургического происхождения или полученных при эксплуатации в скважинах). Визуальный контроль и опрессовка далеко не всегда позволяют обнаружить такие дефекты. Поэтому для исключения пропуска скрытых дефектов должны привлекаться ультразвуковые, электромагнитные и другие методы дефектоскопии.

Для оценки норм отбраковки труб по наличию дефектов проводят исследования допустимой величины плотности поверхностной энергии T_{Σ} или связанной с ней конечной работы излома, характеризующих сопротивляемость материала распространению трещин. Из энергетической теории разрушения Гриффитса на основе закона о минимальной потенциальной энергии системы, находящейся в равновесии, следует выражение для плотности поверхностной энергии T_{Σ} :

$$T_{\Sigma} = \frac{\sigma_{\text{нр}}^2 \lambda_{\text{н}}}{E}, \quad (4.4)$$

где $\lambda_{\text{н}} = \frac{\pi \lambda_{\text{т}}}{2}$ – характеристический размер трещины; $\lambda_{\text{т}}$ – длина трещины; $\sigma_{\text{нр}}$ – нормальное напряжение в момент начала развития трещины; E – линейный модуль упругости. Запас прочности на дефектном участке определяется отношением $\sigma_{\text{нр}}/\sigma_{\text{т}}$, то есть нормального напряжения в момент развития трещины к пределу текучести. При достаточном запасе прочности это отношение должно значительно превышать единицу. Величина T_{Σ} ограничена возможностями и технологией металлургического производства, но и размер дефектов, остающихся в незабракованных трубах, определяется реальными возможностями дефектоскопической аппаратуры.

Зная разрешающую способность конкретной дефектоскопической аппаратуры в заданных условиях (наличие шероховатости поверхности, коррозии и т.п.) формируют трещину длиной, соответствующей предельной чувствительности, и при герметизации этой трещины создают нагрузку и определяют напряжение $\sigma_{\text{нр}}$. Дальнейший расчёт T_{Σ} и запаса прочности трубы, при известных значениях модуля упругости E и предела текучести $\sigma_{\text{т}}$, не представляет сложности.

Экспериментальные исследования проводились с использованием насосно-компрессорных и обсадных труб.

Отрезки НКТ диаметром 60,3 мм, толщиной стенки 5 мм, длиной 200 мм из стали марки 36Г2С закаливались от 1000 °С и отпуска при 180 °С. В результате термообработки была достигнута твёрдость по Роквеллу в 40–42 единиц. На рис. 4.21 показана зависимость между разрушающим внутренним давлением p_p и величиной λ_n . Низкие значения T_3 ($16,1 - 23,7 \cdot 10^{-3}$ МДж/м²) подчёркивают хрупкий характер разрушения.

Отрезки обсадных труб диаметром 146 мм, толщиной 11 мм (группы прочности Д и К) в состоянии поставки подвергались опрессовке внутренним давлением при предварительно сформированной в стенке трубы трещине с характеристическим размером $\lambda_n = 5-6,3$ мм. Отрезки труб группы прочности Д выдерживали давления $p_p = 66-78$ МПа, а группы прочности К – давления 60–77 МПа. Соответствующие значения T_3 составили: для группы прочности Д – $0,152-0,173$ МДж/м²; для группы прочности К 110–160 МДж/м².

С увеличением характеристического размера трещины λ_n давление разрушения при опрессовке как НКТ, так и обсадных труб снижается. Этот факт демонстрируют графики, полученные на основе обширного экспериментального материала и приведённые на рис. 4.21 и 4.22.

Одна из разновидностей взрывных проб на динамическую прочность труб осуществляется одиночным выстрелом заряда перфоратора в отрезке трубы, помещённом в воду при атмосферном давлении. В таких условиях начальный дефект в стенке трубы создаётся пулей или кумулятивной струёй. Именно от пробитого отверстия начинает развиваться трещина.

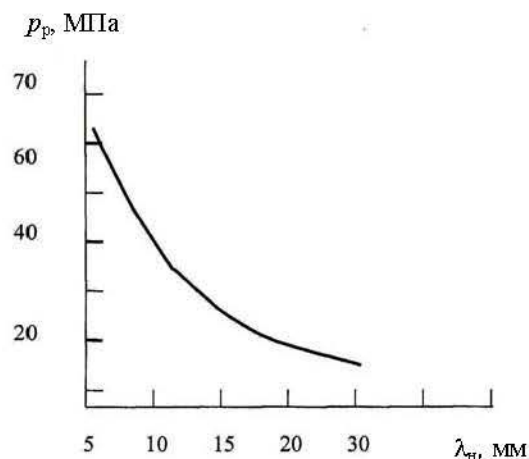
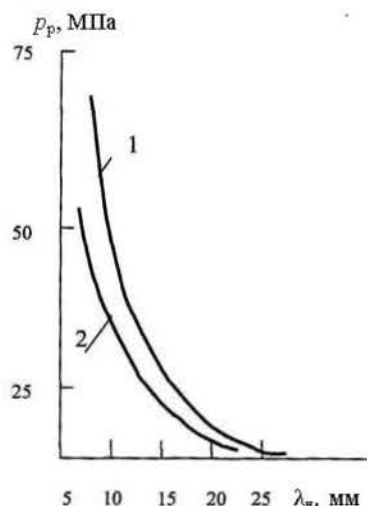


Рис. 4.21. График зависимости внутреннего разрушающего давления p_p от характеристического размера λ_n начальной трещины в трубе диаметром 60,3 мм толщиной 5 мм

Рис. 4.22. График зависимости внутреннего разрушающего давления p_p от характеристического размера λ_n начальной трещины в обсадной трубе диаметром 146 мм толщиной стенки 11 мм. Группы прочности трубы: 1 – Д; 2 – К



На рис. 4.23 приведена гистограмма разрушаемости обсадных труб групп прочности Д, К, Л различного диаметра и различной толщины стенки.

Отстрел в трубе (скважине) бескорпусного перфоратора

Рассмотрим срабатывание зарядов каркасного перфоратора в глубокой скважине, заполненной водой. Для получения принципиальных соотношений для минимальных допустимых расстояний между зарядами вместо кумулятивных зарядов будем рассматривать сферические заряды с массой взрывчатого вещества, соответствующей кумулятивному. Внутренний радиус обсадной колонны обозначим R_T , расстояние между центрами зарядов (шаг) – h , массу одного заряда – m . При известной плотности ВВ и массе заряда m определим его эквивалентный радиус r_s .

Интервал времени между срабатыванием соседних зарядов определяется длиной отрезка детонирующего шнура между ними. При равенстве этого интервала нескольким единицам микросекунд, с учетом запаздывания развития детонации при передаче её от детонирующего шнура через стенки оболочек самого шнура и кумулятивного заряда, можно считать, что все заряды перфоратора срабатывают одновременно. В такой ситуации срабатывание зарядов создаст цилиндрическую волну, воздействие которой на обсадную колонну будет превосходить воздействие ударной волны от одиночного заряда. Поэтому необходимо увеличить временной интервал между срабатыванием отдельных зарядов до такого значения, при котором импульсная нагрузка от срабатывания предыдущего заряда уже не будет представлять опасности для конструкции скважины.

Исключим из рассмотрения те случаи, когда приведённый внутренний радиус трубы $R_T/r_s \leq 1,8$, что соответствует сохранению достаточно высокого давления в газовом пузыре даже после расширения его и касания стенок трубы. Действительно, изменение давления в продуктах взрыва в случае сферической симметрии уменьшается обратно пропорционально $R^{-9} = (R_T/r_s)^9$,

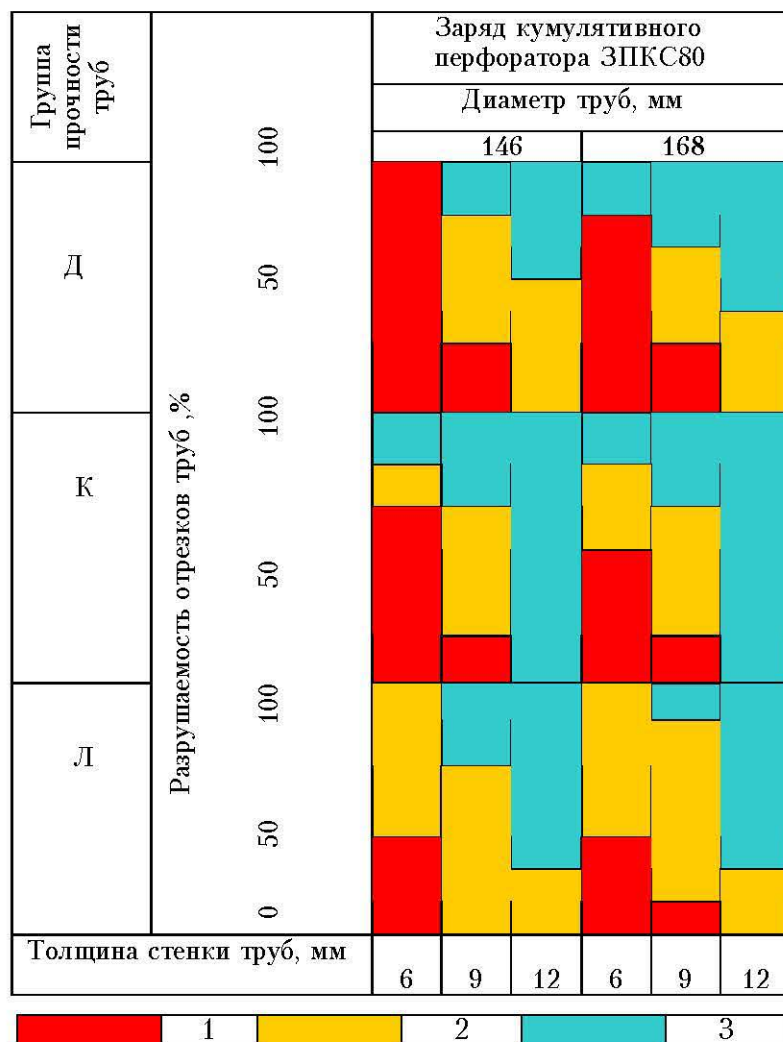


Рис. 4.23. Гистограмма разрушаемости обсадных труб группы прочности Д, К, Л различного диаметра и различной толщины стенки при отстреле в патрубке, погружённом в воду, кумулятивного заряда ЗПКС80: 1 – полное разрушение отрезка; 2 – ограниченные трещины; 3 – без видимых разрушений

где R – текущий радиус расширяющихся продуктов детонации, r_a – радиус сферического заряда. Такая сильная зависимость давления от приведённого радиуса объясняется следующими причинами. Во-первых, сильно сжатые продукты детонации расширя-

ются в соответствии с законом $pV^3 = \text{const}$. Во-вторых, объём газообразных продуктов $V \approx R^3$. При увеличении приведённого радиуса пузыря не более чем в 1,8 раз давление в газовом пузыре уменьшится не более чем в 198 раз и составит для заряда из гексогена свыше 126 МПа. Дальнейшее расширение газового пузыря будет происходить вдоль оси трубы и темп снижения давления снизится. Инициирование взрыва соседнего заряда, находящегося на расстоянии даже нескольких диаметров трубы, приведёт к усилению воздействия первого заряда.

При $R/r_s \geq 2$ давление в продуктах детонации в момент касания газового пузыря стенок трубы не превысит 50 МПа.

Таким образом, одним из критериев взаимодействия зарядов, срабатывающих в трубе, заполненной жидкостью, является приведённый радиус трубы $\bar{R} = R/r_s$.

Если при данном значении приведённого радиуса газового пузыря $\bar{R}_{\text{гп}} = R_{\text{гп}}/r_s$ давление в нём соответствует гидростатическому в трубе или равно нескольким единицам МПа и $\bar{R}_{\text{гп}} \leq \bar{R}$, то возможно инициирование соседнего заряда без усиления воздействия первого на конструкцию скважины. Иначе говоря, если срабатывание каждого следующего заряда будет происходить после того как давление в газовом пузыре, образованном от срабатывания предыдущего заряда, снизится до гидростатического или единиц МПа, то взаимодействие между зарядами окажется минимальным.

Применяя метод скоростного фотографирования взрыва любого заряда в воде (техника и методика изложены выше), можно определить время расширения газового пузыря до заданного значения приведённого радиуса.

Рассмотрим срабатывание перфоратора с зарядами ЗПКС80 в трубе с внутренним диаметром 0,1 м. Газовый пузырь 1-го заряда расширится и его поверхность приблизится к внутренней поверхности трубы когда $\bar{R}_{\text{гп}} = 2,7$. Для заряда время увеличения приведённого радиуса продуктов взрыва в 2,7 раз в воде при атмосферном давлении, определённое с помощью скоростной фоторегистрации, составляет $\tau = 30$ мкс. Давление в газовом пузыре при этом упадёт до 3,2 МПа. За это время детонационная волна, распространяющаяся по детонирующему шнуру, должна достичь следующего заряда и инициировать в нём детонацию. При известной скорости детонации в шнуре D^* минимальное допустимое расстояние между зарядами h в перфораторе составит

$$h = \tau D^* = 0,225 \text{ м.} \quad (4.5)$$

Такое расстояние между зарядами является достаточным даже в тех случаях, когда срабатывание одиночного заряда вызывает остаточные пластические деформации трубы, но без развития трещин.

С ростом гидростатического давления часть энергии взрыва будет расходоваться на преодоление внешнего давления. Так, при гидростатическом давлении 10 МПа давление в газовом пузыре (без учёта перерасширения газового пузыря) упадёт только до 10 МПа, что будет соответствовать увеличению радиуса газового пузыря в 2,4 раза. При этом время достижения максимального приведённого радиуса значительно сократится. Поэтому при повышенных гидростатических давлениях шаг между зарядами также может быть сокращён без усиления воздействия на обсадную колонну в простреливаемом интервале.

4.9.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В СКВАЖИНЕ

При срабатывании в скважине, заполненной жидкостью, перфоратора, торпеды или порохового генератора давления (ПГД) может произойти полное поглощение ударной волны пластом даже в условиях заполнения скважины жидкостью до устья. Близкая к этой возникает ситуация при отстреле перфоратора в скважине со сниженным уровнем. В таких ситуациях возникают проблемы по установлению факта и полноты срабатывания перфоратора. Для перфораторов, спускаемых на трубах, единственный путь решения проблемы состоит в подъёме перфоратора на дневную поверхность. Если поглощение ударных волн пластом отсутствует, то независимо от того, инициируется срабатывание одного заряда или группы, по жидкости и по обсадной колонне распространяются ударные волны. За пределами интервала срабатывания перфоратора формируются только две волны. Одна из них распространяется в скважинной жидкости в сторону устья, другая – в сторону забоя.

Среди факторов, способных оказать влияние на распространение таких волн, нужно отметить дисперсию, упругость самих труб, а также диссипацию энергии. Таким образом, ослабление ударной волны до акустической должно произойти уже на расстоянии всего лишь нескольких десятков метров от интервала срабатывания взрывного устройства.

Однако, как показывает практический опыт, интенсивные возмущения от срабатывания перфоратора или порохового генератора давления могут распространяться в жидкостях, заполняющих обсаженные скважины, без значительного затухания на многие километры. Хорошо известны случаи достижения возмущениями устья скважины с выбросом ограниченного объёма

жидкости при проведении перфорации на глубине пяти и более километров. Не получили также должного объяснения случаи выброса из скважины десятков метров кабеля при срабатывании порохового генератора давления. И это несмотря на то, что пороховые заряды спускали в скважину, заполненную жидкостью, на кабеле с постоянным контролем и воспламеняли их только после достижения зарядами заданной глубины (как правило, нескольких километров). Не редки случаи забрасывания кабельного наконечника в зазор между НКТ и обсадной колонной при срабатывании полностью разрушающегося перфоратора, спущенного на кабеле через НКТ, в условиях малых расстояний от интервала перфорации до башмака НКТ. Всё это говорит о том, что в скважинах, заполненных жидкостью, могут формироваться особые волны, способные не только распространяться на большие расстояния, но и перемещать находящиеся в жидкости предметы, которые обычные волны (в том числе и ударные) должны огибать. Для объяснения наблюдаемых эффектов целесообразно обратиться к теории солитонов, то есть уединённых волн, распространяющихся по поверхности океана без затухания на десятки и сотни километров.

Многие исследователи предполагают, что в уединённой волне происходит одновременное движение частиц жидкости в продольном и поперечном направлениях. Поэтому уединённые волны не являются ни продольными, ни поперечными, а представляют собой симбиоз тех и других. Одна из главных проблем распространения уединённых волн состоит в разработке основ теории сохранения ими амплитуды. Попытка объяснить отсутствие затухания амплитуды волны компенсацией дисперсии нелинейностью, связанной с зависимостью амплитуды волны от скорости её распространения, является не вполне состоятельной. Тем более, что нужно компенсировать ещё и диссипацию энергии.

Одновременное движение частиц жидкости в продольном и поперечном направлениях в уединённой волне определяет и особенность действия её на стенку трубы (НКТ или обсадной). Со специфическим движением частиц жидкости в волне связано и появление сжимающего давления, направленного к оси трубы.

Рассмотрим подробнее причины радиального сжатия жидкости в пределах волны, распространяющейся в цилиндрической трубе. Прежде всего, представим волну как совокупность отдельных волн с возрастающей величиной давления от волны к волне в направлении к общему фронту. Таким образом, уединённая волна в трубе напоминает модулированную радиоволну. В пределах каждой отдельной волны, входящей в состав совокупной, частицы жидкости движутся в продольном и поперечном направлении, что в итоге приводит к круговым перемещениям их.

Сложение скоростей частиц жидкости вдоль оси трубы формирует «стержень», в котором жидкость движется с огромными скоростями. Давление в жидкости вокруг «стержня» в пределах волны может быть ниже даже гидростатического в скважине, несмотря на очень высокое давление на фронте волны.

Представленный качественный анализ указывает на принципиальную возможность распространения в трубах, заполненных жидкостью, интенсивных возмущений с очень малым затуханием на расстояние многих километров. Однако в случае отсутствия в стенке труб сквозных дефектов виде отверстий или трещин, такая волна не представляет опасности для конструкции скважины. В то же время на сквозных дефектах труб будет происходить локальное выделения огромной энергии волны с развитием дефектов и воздействием через них на затрубное пространство.

Выход акустической волны на границу раздела жидкость–воздух. Прежде всего, рассмотрим, в каких случаях возможно перемещение предметов, находящихся в жидкости под действием ударной или акустической волны. Если предмет находится на пути распространения подводной ударной волны на значительном расстоянии от границы жидкость–воздух, то при малом сечении предмета его перемещение будет незначительным. Иначе обстоит дело в случае нахождения того же предмета вблизи границы раздела жидкость–газ. При достижении ударной волны границы жидкость–газ, в газ выйдет преломлённая волна сжатия, а по жидкости будет распространяться волна разрежения. Когда волна разрежения создаст в жидкости на глубине h напряжение растяжения, превышающее сумму гидростатического давления на этой глубине и динамической прочности жидкости на разрыв, произойдёт кавитационный разрыв сплошности жидкости. Если граница жидкость–воздух находится на уровне верхнего фланца устьевой арматуры или открытой перфораторной задвижки, то кавитационный разрыв сплошности будет сопровождаться выбросом части оторванного слоя жидкости из скважины. В случае нахождения предмета в оторванном слое и отсутствия якорящих устройств предмет может быть увлечён жидкостью и выброшен из скважины.

За первым разрывом сплошности жидкости последуют другие разрывы, и процесс продолжится до тех пор, пока в скважинной жидкости будут возникать достаточные растягивающие напряжения, которые зависят от формы волны. Роль свободной поверхности, на которой происходит скачок акустического сопротивления, при втором и последующих разрывах будут играть предыдущие кавитационные разрывы. Понятно, что давление на границе кавитационного разрыва близко к нулю. Менее определённой является динамическая прочность жидкости на разрыв.

По экспериментальным данным Бриджа вода, свободная от механических примесей и газовых включений, выдерживает давление на разрыв в десятки МПа. Поскольку разрывы в скважинной жидкости не достигают глубины в сотни метров, гидростатическим давлением на уровне кавитационного разрыва можно пренебречь и учитывать только прочность жидкости на разрыв.

Для получения принципиальных соотношений рассмотрим упрощённую задачу. Пусть на поверхность раздела падает плоская волна экспоненциального профиля:

$$p = p_m e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (4.6)$$

где p_m – давление на фронте волны; t – текущее время, отсчитанное от фронта волны; θ – показатель падения давления в волне.

Применив метод зеркального отображения источника и стока, найдём результирующее давление на глубине h_1 (рис. 4.24)

$$-p_m + p_m e^{-\frac{2h_1}{a_0\theta}} = p_m \left(e^{-\frac{2h_1}{a_0\theta}} - 1 \right), \quad (4.7)$$

где a_0 – скорость звука в скважинной жидкости.

Приравнявая результирующее давление из (4.7) прочности жидкости на разрыв $-p_k$ получим

$$p_m \left(e^{-\frac{2h_1}{a_0\theta}} - 1 \right) = -p_k. \quad (4.8)$$

Из (4.8) получим выражение для толщины первого выброшенного слоя жидкости:

$$h_1 = -\frac{a_0\theta}{2} \ln \left\{ 1 - \frac{p_k}{p_m} \right\}. \quad (4.9)$$

Из представленной зависимости следует, что глубина разрыва сплошности жидкости h_1 в скважине зависит не от абсолютного значения давления на фронте волны p_m , но определяется относительной прочностью воды на разрыв. Чем ближе значения p_m и p_k , тем на большей глубине будет происходить образование кавитационной полости. Значительное влияние на глубину разрыва h_1 оказывает показатель падения давления в волне θ . В свою очередь, показатель θ зависит от количества и общей

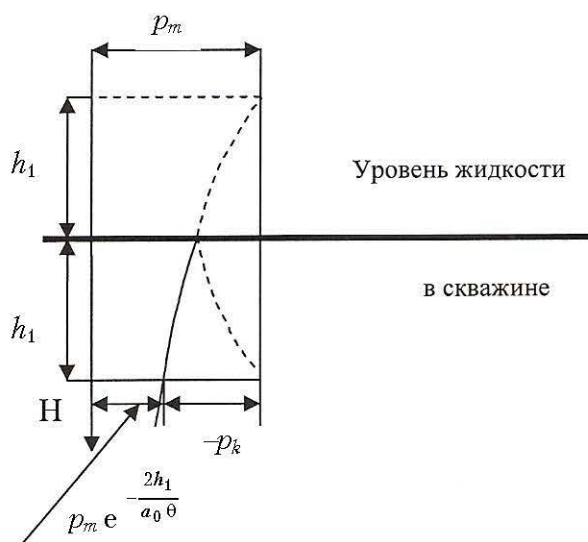


Рис. 4.24. Схема образования разрыва жидкости на глубине h_1 при выходе акустической волны на границу жидкость-воздух в скважине

массы одновременно срабатывающих в скважине кумулятивных зарядов.

Рассмотрим движение первого оторванного слоя. В нулевом приближении (пренебрегая сопротивлением воздуха) движение этого слоя тормозится силой тяжести.

Поэтому дифференциальное уравнение движения запишется в следующем виде.

$$\rho h_1 \frac{d^2 z}{dt^2} = -\rho g h_1,$$

где z – вертикальная координата; ρ – плотность воды.

При достаточно большой общей массе зарядов и отсутствии газовых включений в скважинной жидкости величина h_1 может составлять сотни метров. Движение столба скважинной жидкости выше зоны разрыва вверх и даже частичный выброс её из скважины приведёт к возникновению временной депрессии на пласт и поступлению из последнего пластового флюида в скважину. Для газовых скважин или нефтяных, эксплуатирующих пласты с большим газовым фактором, это может привести к поступлению в скважину газа и несанкционированному фонтанированию.

4.9.3. ИССЛЕДОВАНИЯ В РЕАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Проведение исследований в реальных скважинах по геофизическому контролю изменения состояния обсадной колонны и цементного камня в интервале перфорации и за его пределами сопряжено с большим риском потери скважинного прибора из-за возможного прихвата его. Чисто случайное расположение отверстий в стенке обсадной колонны при создании конечной плотности перфорации за несколько спусков перфоратора не исключает образование трещин с вывалом элементов стенки трубы внутрь колонны. Однако, отсутствие детальной информации о состоянии колонны и цементного камня как в интервале перфорации, так и ниже него, где распространяются отражённые от забоя ударные волны сделало необходимым выполнение таких исследований. Ещё одной причиной таких исследований является слабая изученность реакции породы на кратковременное интенсивное воздействие как в интервале перфорации, так и за его пределами. Постоянные изменения термобарических условий в пластах и состава насыщающего флюида могут привести при очередной интенсификации притока к потере устойчивости колонны и выходу из строя скважины. Именно поэтому необходимо проведение контроля технического состояния скважины после каждого достаточно интенсивного воздействия на продуктивный пласт. Современная скважинная радиометрическая, электрометрическая и акустическая аппаратура, решает комплекс вопросов по определению фактической толщины обсадных труб и затрубного цементного камня, а также наличие трещин в цементе и колонне с определением их геометрических размеров.

Оценка технического состояния скважин до и после перфорации для повышения достоверности осуществлялась несколькими комплексами. В комплекс радиометрических приборов входили гамма-дефектомер, калиброммер и толщиномер, в комплекс электромеханических приборов – индукционный дефектомер, локатор для обнаружения отверстий, пробитых в стенке колонны при перфорации, и электромеханический профиломер. Качество сцепления цементного камня с колонной и породой в процессе исследований контролировали акустическим цементомером. Наличие дефектов в виде каверн и трещин в цементном камне контролировалось гамма-дефектомером. Перфорацию осуществляли при равновесии или репрессии широко распространенными кумулятивными перфораторами – корпусными ПК105ДУ и мощными бескорпусными ленточными ПКС80 и ПКС105.

Работу проводили в два этапа. На первом этапе изменение состояния обсадной колонны и цементного камня после перфорации регистрировали с помощью акустических и радиометриче-

ских методов, на втором – комплексом электромеханических приборов и акустического цементомера. Величину деформации обсадных колонн определяли по изменению диаметра колонны в различных азимутальных направлениях.

Первый этап исследований проводили в скважине в Республике Татарстан на глубинах 1100–1500 м. Выбранная скважина была обсажена пятидюймовой колонной, с толщиной стенки 8 мм, группы прочности Д и заполнена водой до устья. Использовали мощный, бескорпусный перфоратор ПКС105 ($m_3 = 50$ г). Пласты в зоне перфорации представлены известняками. Перед проведением прострелочных работ с помощью акустических и радиометрических методов измерили исходные параметры в скважине. По полученным данным наметили зоны перфорации – интервалы, в которых обсадные трубы не имели дефектов, а сцепление цементного камня с колонной в затрубном пространстве было либо полным, либо частичным.

На рис. 4.25 показаны типичные диаграммы измерений внутреннего диаметра колонны и средней толщины стенки колонны до проведения прострелочных работ и после них.

В табл. 4.4 приведены данные об измерении толщины стенки колонны и внутреннего ее диаметра при различном гидростатическом давлении p_T и разном сцеплении цементного камня с колонной и породой, которые получены при использовании радиометрических приборов.

Наличие трещин определяли, сопоставляя величины изменения среднего диаметра обсадной колонны и толщины стенки. Для того чтобы убедиться в возникновении в стенке колонны трещин, применяли также селективный толщиномер.

Работы второго этапа проводили в одной из скважин Березанской площади Краснодарского края на глубинах 1600–2576 м. Скважина была обсажена пятидюймовой колонной с толщиной стенки 10 и 12 мм, группы прочности Д и Е и заполнена водой. Использовали тот же перфоратор ПКС105. Перед началом прострелочных работ с помощью комплекса электромеханических приборов и акустического цементомера измеряли исходные параметры в скважине.

Для перфорации выбирали интервалы, характеризующиеся отсутствием повреждений в стенках обсадных труб. Кроме того, обязательным условием при выборе интервалов перфорации было хорошее сцепление между цементным камнем и колонной в затрубном пространстве. После каждого прострела регистрировали изменения исходных параметров в интервале перфорации.

На рис. 4.26 приведены типичные кривые измерений внутреннего диаметра обсадных труб до проведения прострелочных работ и после них, полученные с помощью электромеханического

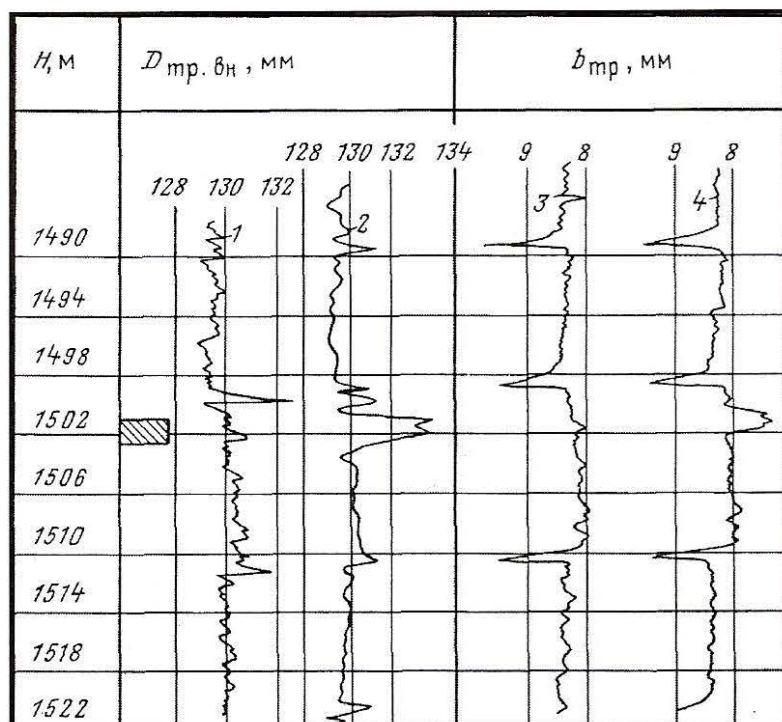


Рис. 4.25. Типичные диаграммы измерений внутреннего диаметра и толщины стенки обсадной трубы с помощью радиометрической аппаратуры (перфоратор ПКС105):

1, 2 – регистрация внутреннего диаметра $D_{\text{тр. вн}}$ колонны соответственно до и после перфорации; 3, 4 – регистрация толщины стенки колонны $b_{\text{тр}}$ до и после перфорации соответственно. Интервал перфорации заштрихован

Таблица 4.4

Деформация обсадной колонны при различном качестве сцепления цементного камня с колонной и плотности перфорации $n = 7$ отв/м

Гидростатическое давление p_2 , МПа	Число спущенных зарядов	Приращение внутреннего диаметра обсадной колонны $\Delta D_{\text{тр. вн}}$, мм	Уменьшение толщины стенки обсадной колонны $\Delta b_{\text{тр}}$, мм	Качество сцепления цементного камня с колонной и породой	
				до перфорации	после перфорации
15	9	3	0,5	Полное	Полное
14	9	3	0,5	Полное	Полное
11	7	7	1,5	Частичное	Частичное

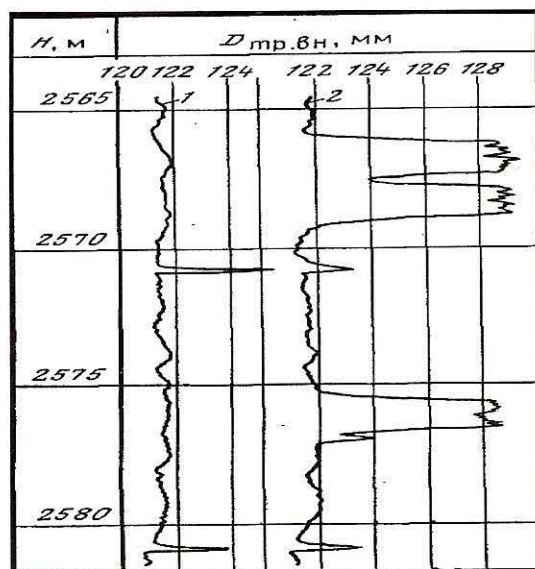


Рис. 4.26. Типичные диаграммы изменения внутреннего диаметра $D_{\text{вн}}$ обсадной колонны, зарегистрированные с помощью электромеханического нутромера (перфоратор ПКС105); 1 – до перфорации; 2 – после перфорации

нутромера. В первом интервале перфорации (2575,5–2576,5 м) и во втором (2566–2568 м) конечная плотность перфорации была одинаковой – 7 отв/м, но второй интервал превосходил первый по протяженности в 2 раза. При этом разница в величинах деформаций труб составила около 10 %.

В третьем интервале (2503,5–2506,5) конечная плотность перфорации ($n = 7$ отв/м) была достигнута не сразу. Вначале за счет увеличения расстояния между кумулятивными зарядами плотность $n = 3$ отв/м, что в 2 раза меньше плотности простреливания, характерной для перфоратора данного типа. Повторное перфорирование этого интервала повлекло за собой значительное увеличение деформации обсадной трубы (рис. 4.27).

Аналогичные исследования проведены с менее мощным каркасным бескорпусным кумулятивным перфоратором ПКС80 ($m_3 = 21$ г) также на Березанской площади Краснодарского края в другой скважине на глубинах 1810–1990 м против глинистых пропластков. Плотность перфорации $n = 7$ отв/м. В этом случае деформация обсадных труб по диаметру составила 4,5 мм и только в отдельном случае – 7 мм (т.е. почти в два раза меньше, чем при простреливании перфоратором ПКС105). В местах максимального раздутия обнаружены сквозные продольные трещины протяженностью 0,25–0,50 м.

В табл. 4.5 приведены результаты измерения внутреннего диаметра обсадной колонны после перфорации, полученные с по-

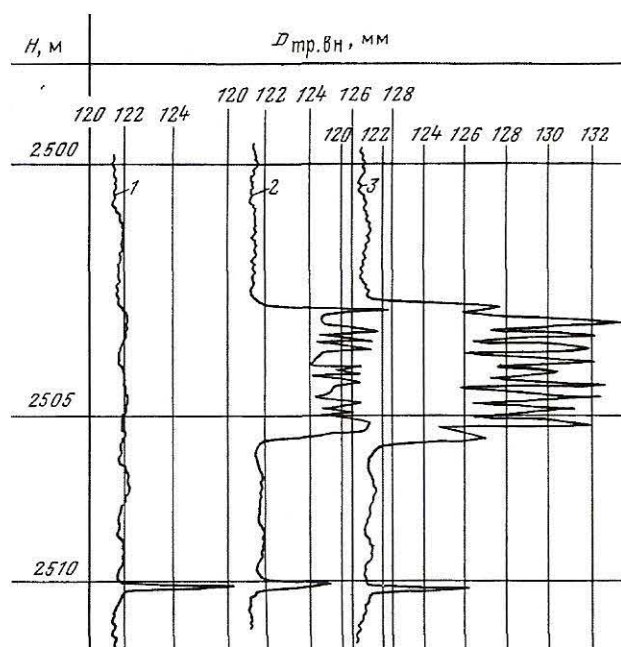


Рис. 4.27. Диаграммы изменения внутреннего диаметра $D_{тр.вн.}$ обсадной колонны при повторном перфорировании, зарегистрированные с помощью электро-механического нутромера (перфоратор ПКС105): 1 – до перфорации; 2 – после первого прострела; 3 – после второго прострела

Таблица 4.5

Деформация обсадной колонны при различных плотностях перфорации (перфоратор ПКС105)

Гидро-статическое давление $P_{г.}$, МПа	Плотность перфорации n , отв/м	Число спущенных зарядов	$\Delta D_{тр.вн.1}$, мм	$\Delta D_{тр.вн.2}$, мм	Группа прочности стали	Толщина стенки обсадной колонны, мм	Число спусков перфоратора
25	7,0	8	7	7	Е	12	1
25	7,0	18	8	7	Е	12	1
25	3,5	10	6	6	Е	12	1
25	7,0	18	11	11	Е	12	2
24	3,5	10	7	8	Д	11	1
24	3,5	10	6	6	Д	11	1
20	3,5	10	9	8	Д	10	1
20	3,5	10	9	9	Д	10	1
16	7,0	8	10	9	Д	10	1

Примечание. $\Delta D_{тр.вн.1}$ – увеличение усредненного внутреннего диаметра обсадной колонны, зарегистрированное электро-механическим нутромером; $\Delta D_{тр.вн.2}$ – то же, зарегистрированное индукционным комплексным прибором.

мощью комплекса электромеханических приборов. Как до перфорации, так и после нее не было обнаружено нарушения сцепления между обсадной колонной и цементным кольцом. После взрыва всех зарядов кумулятивных перфораторов в стенках колонны образовались отдельные трещины.

В той же скважине в интервале 1683–1685 м проведена перфорация корпусным перфоратором ПК103 с $n = 10$ отв/м. В середине интервала (2 м) отмечено расширение диаметра до 4 мм, что можно объяснить характером породы пласта (глины).

Факт сужения обсадной колонны после перфорации (перфораторы ПКС80, ПК85) нефтегазонасыщенного пласта отмечен с помощью комплекса приборов в скважине на месторождении Биби-Эйбат в районе г. Баку. Сужение колонны на 2,5–4,0 мм произошло в верхней и нижней частях пласта, а в центральной части – расширение до 5 мм. Подобный эффект иногда обнаруживают в некоторых скважинах – наблюдается непроходимость ствола в интервале перфорации.

При изучении влияния перфорации на обсадную колонну и затрубный цементный камень в скважинах глубиной 1200–1600 м на промыслах Башкортостана и Татарстана с помощью комплекса приборов установлено, что в случае формирования каналов корпусным перфоратором ПК103 с $n = 10$ отв/м зачастую происходит выравнивание смятой обсадной колонны. Вместе с тем обнаружены нарушения сцепления цемента с обсадной колонной, особенно при наличии каверн в пласте. Повышение плотности перфорации до 20 отв/м привело к резкому улучшению качества сцепления цемента с колонной. Во всех случаях при хорошем качестве цементирования перфорация аппаратом ПК103 с $n = 30$ отв/м не вызвала регистрируемых нарушений не только в интервале перфорации, но и за его пределами.

4.10. ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА ПЕРФОРАТОРА И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРФОРАЦИИ

При формировании технологии вторичного вскрытия пластов основное внимание уделяют выбору типоразмера перфоратора. Последний определяет необходимое геофизическое сопровождение и комплекс вспомогательного оборудования. На рис. 4.28 представлена схема выбора типоразмера перфоратора и формирования технологии вторичного вскрытия.

Для решения задачи, стоящей перед перфорацией с учетом характеристики объекта и техногенных изменений его ФЕС обосновывается методика вторичного вскрытия. Для ее реализации с учетом геолого-технических условий в скважине выбирают

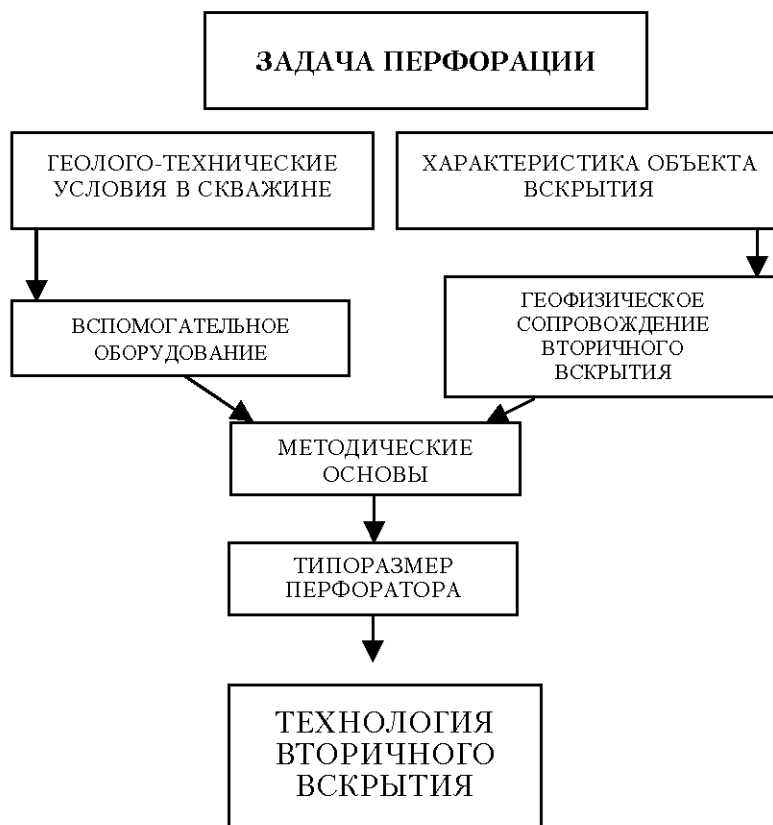


Рис. 4.28. Схема формирования технологии вторичного вскрытия пластов

типоразмер перфоратора. Предпочтение отдаётся по следующим показателям перфоратора:

- возможности спуска, инициирования срабатывания и привязки к геологическому разрезу в заданных конкретных геолого-технических условиях;
- термобаростойкости перфоратора;
- воздействию на конструкцию скважины;
- пробивной способности;
- возможности повышения плотности перфорации или расширения интервала без глушения скважины.

Естественно, технология вторичного вскрытия и перфорации в каждом регионе складывается годами и геофизические предприятия на основе собственного опыта устанавливают необходи-

мый комплекс перфораторов и вспомогательного оборудования. По мере перехода месторождений от одной стадии к другой возрастают и требования к технологии перфорации.

4.11. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ДОБЫВАЮЩИХ И ПРИЁМИСТОСТИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

Энергия взрыва может использоваться для увеличения подвижности флюида в прискважинной зоне пласта. Для этих целей применяются пороха, горюче-окислительные составы (ГОС) или топливно-окислительные составы (ТОС). Скорость горения их на порядки меньше скорости детонации и поэтому их можно сжигать в скважинах в больших количествах, не нанося урон конструкции скважины. Сравнительно медленное выделение энергии, тем не менее, может обеспечить создание в стволе скважины давления до 100 МПа и выше. Максимальное давление, которое необходимо получить в скважине, рассчитывается путём подбора одновременно сжигаемой массы пороха или ГОС в данных термобарических условиях скважины. Температура продуктов сгорания достигает 1000 °С и более. Таким образом, в зоне сжигания пороховых зарядов создаются экстремальные термобарические условия. Проникая через перфорационные каналы раскалённые газы высокого давления создают в породе трещины и очищают прискважинную зону от асфальтенов и других высоковязких соединений. Деформация пород в таких термобарических условиях способствует сохранению образовавшихся трещин в раскрытом состоянии.

Размеры образовавшейся зоны увеличенной подвижности флюида вокруг скважины достигают 7–10 м.

Базовым пороховым генератором давления является ПГДБК (пороховой генератор давления бескорпусный), разработанный Б.М. Беляевым и Р.А. Слиозбергом (табл. 4.6).

ПГДБК – представляет собой систему пороховых зарядов, имеющих центральные каналы. Внутри канала размещена опорная трубка из алюминиевого сплава. На концах трубки находятся штуцер и муфта для соединения зарядов в гирлянду необходимой длины. Замок у трубок обеспечивает герметичное соединение. Низ сборки трубок герметизируется заглушкой, верх – кабельной головкой особой конструкции. Боковая поверхность зарядов изолирована хлопчатобумажной тканью, пропитанной эпоксидной смолой. Гирлянда зарядов спускается в скважину на геофизическом кабеле. На первом этапе через геофизический

Таблица 4.6

Характеристики ПГДБК и аккумуляторов давления скважинных (АДС5 и АДС6)

Показатель	ПГДБК100	ПГДБК150	АДС5, АДС6
Наружный диаметр, мм	92	92	112
Минимальный внутренний диаметр, мм	118	118	130
Максимальное минимальное давление, МПа	80/5	80/5	50/3
Предельная температура, °С	100	150	100
Длина порохового заряда, мм	1000	1000	1200
Масса порохового заряда, кг	10	10	16 (АДС5) 14 (АДС6)
Максимальное число зарядов при одном спуске	10	10	12

кабель подаётся электрический импульс для воспламенения пиропатрона, который вместе с пусковыми воспламенителями находится в герметически изолированных трубках. Горение пиропатронов и пусковых воспламенителей через стенки трубок поджигают заряды. Фронт горения продвигается по заряду от поверхности внутреннего канала к внешней поверхности заряда. Постоянное увеличение площади горения обеспечивает нарастание давления и, соответственно, скорости горения. В итоге в ПГДБК сгорание зарядов протекает значительно быстрее, чем в других системах (АДС5, АДС6).

Основные компоненты ПГДБК (рис. 4.29): 1 – кабельная головка; 2 – пиропатрон; 3 – трубка из сплава алюминия; 4 – заряд пороховой; 5 – соединительный узел; 6 – нижняя заглушка.

В табл. 4.6 даны характеристики генераторов давления бескорпусных различной термостойкости (100 и 150 °С).

При обработке пластов ПГДБК необходимо учитывать эффекты, связанные с образованием большого количества высокотемпературных газов (1000 литров газа на 1 литр пороха), в среде которых сгорает 100–150 метров геофизического кабеля в скважине.

Кроме того, возможен выброс нескольких десятков метров кабеля из скважины.

Для предупреждения нежелательных эффектов основной кабель и его наконечник должны отстоять от кабельной головки ПГДБК не менее чем 150–200 метров. С этой целью между кабельным наконечником и головкой ПГДБК размещают «косу», то есть отрезок старого геофизического кабеля, который сгорит при срабатывании ПГДБК.

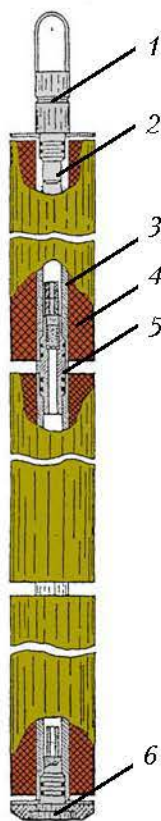


Рис. 4.29. Основные компоненты ПГДБК

Более сложная проблема – борьба с выбросом нескольких десятков метров кабеля с сильной деформацией его при формировании в скважине специфических волн.

Время нарастания давления до максимального значения в скважине при сжигании ПГДБК не превышает 1 с.

На рис. 4.30. приведён график изменения давления в скважине при срабатывании ПГД100. Начальное давление в скважине, равное пластовому, обозначено p_0 .

В настоящее время существует множество разработок пороховых генераторов, спускаемых в скважину на кабеле через НКТ. Одним из таких устройств является ПГД-42Т, разработанный специалистами ВНИПИВзрывгеофизики.

Малогабаритный термостойкий пороховой генератор ПГД-42Т способен создавать высокоскоростной импульсный разрыв пласта при малой массе зарядов (рис. 4.31). Это обеспечила новая конструкция системы воспламенения. Генератор может применяться при реализации комплексных технологий совместно с КО и ГКО.

Создание пороховых генераторов с регулируемым импульсом давления также относится к приоритетным направлениям работ ВНИПИВзрывгеофизики.

Технические характеристики ПГД-42Т: габарит перфоратора – 42 мм; предельное давление в скважине 100 МПа; предельная температура применения – 200 °С; масса одного заряда – 1 кг; максимальное число одновременно спускаемых зарядов – 20.

Отличительной особенностью таких генераторов является возможность программирования количества импульсов давления и формы этих импульсов за один спуск в интервал воздействия. На рис. 4.32 представлены изменения давления в скважине при обработке пласта пороховым генератором давления с регулируемым импульсом давления ПГД-42ТЦ. Генератор данного типа в зависимости от поставленной задачи может обеспечить как создание трещин в пласте, так и термообработку ПЗП с закачкой в пласт горячих носителей.

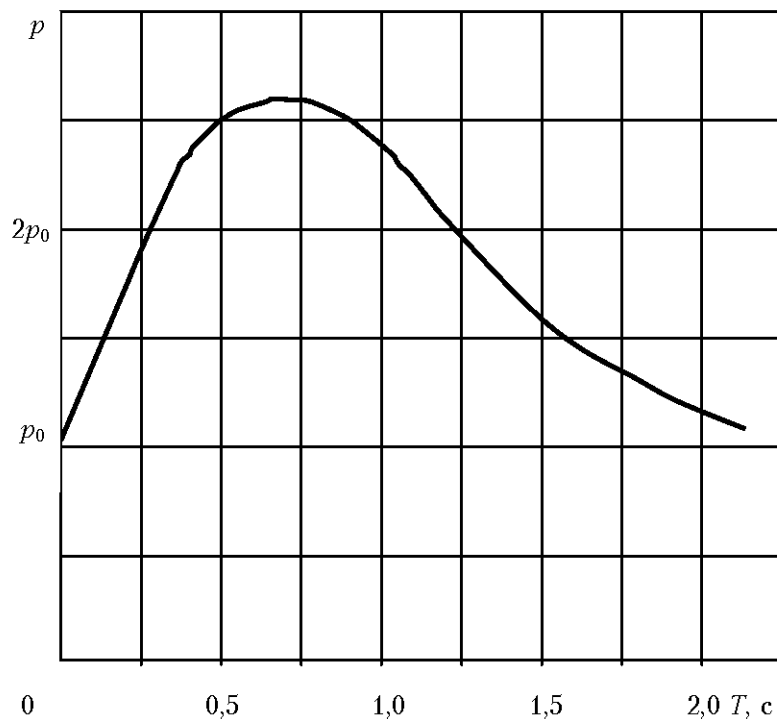


Рис. 4.30. График изменения давления в скважине при срабатывании ПДБК100 $p_0 = 30$ МПа, 7 зарядов

Технические параметры генератора: габарит – 42 мм; предельное давление применения – 100 МПа; предельная температура применения – 200 °С; масса одного заряда – 1 кг; длина заряда – 500 мм; число одновременно спускаемых зарядов – 15. На рис. 4.33 представлен сам генератор с преобразователем взрывных процессов.

Идея совмещения процесса перфорации с разрывом пласта пороховым генератором давления всегда казалась привлекательной по нескольким причинам. Во-первых, порода не успевает отрелаксировать после перфорации и в минералах присутствует высокая концентрация дефектов различного типа. Это должно способствовать развитию трещин и возникновению новых фильтрационных путей. Во-вторых, исключается попадание в перфорационные каналы большого количества коьматанта, осыпавшегося со стенок обсадных труб, снижающего эффективность последующего применения пороховых генераторов давления. Тем

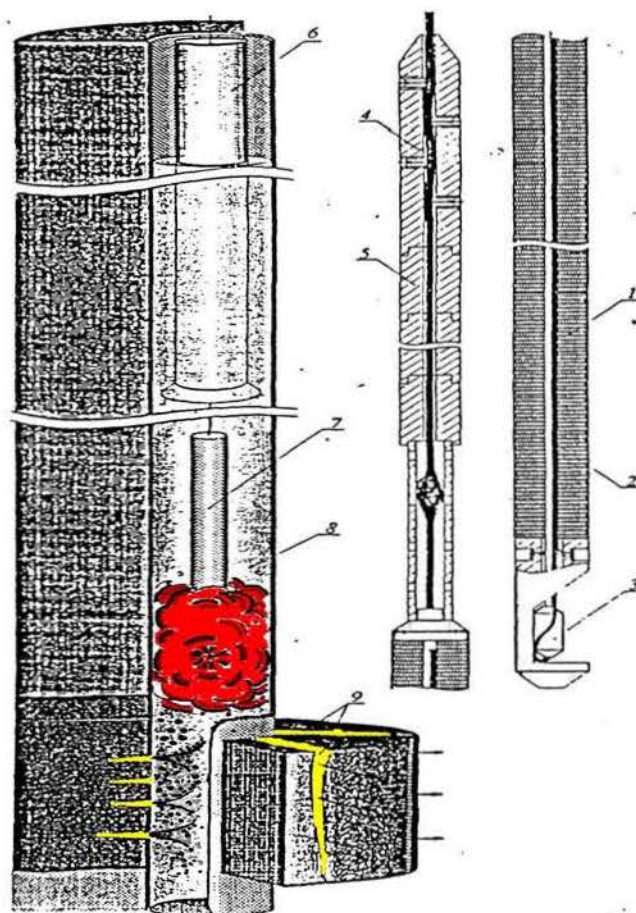


Рис. 4.31. Генератор давления ПГД-42Т:
1 – пороховой заряд; 2 – воспламенитель; 3 – взрывной патрон; 4 – геофизический кабель; 5 – груз; 6 – НКТ с воронкой; 7 – генератор; 8 – ОК; 9 – образованные трещины

более если между перфорацией и ПГД временной интервал составляет несколько часов. На рис. 4.34 представлен такой комплексный аппарат, совмещающий перфоратор с пороховым генератором давления. Имеется и негативная составляющая такой технологии. Она заключается в усилении воздействия на обсадную колонну. Как показано выше, возникающие при перфорации у пробитых отверстий трещины легко будут развиваться под действием газов высокого давления от сработавшего порохового

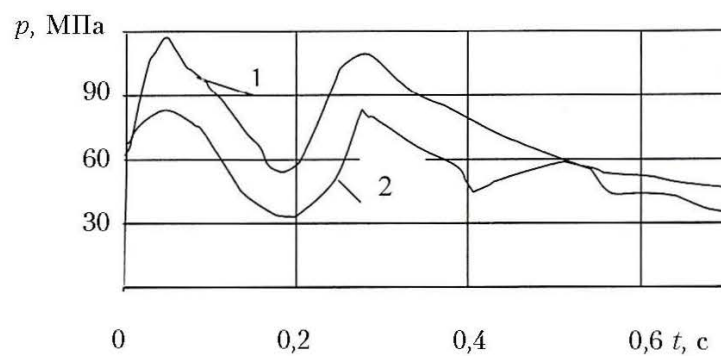


Рис. 4.32. Изменения давления в скважине при обработке пласта ПГД-42ТЦ при $p_0 = 40$ МПа:
1 – режим разрыва; 2 – режим термообработки

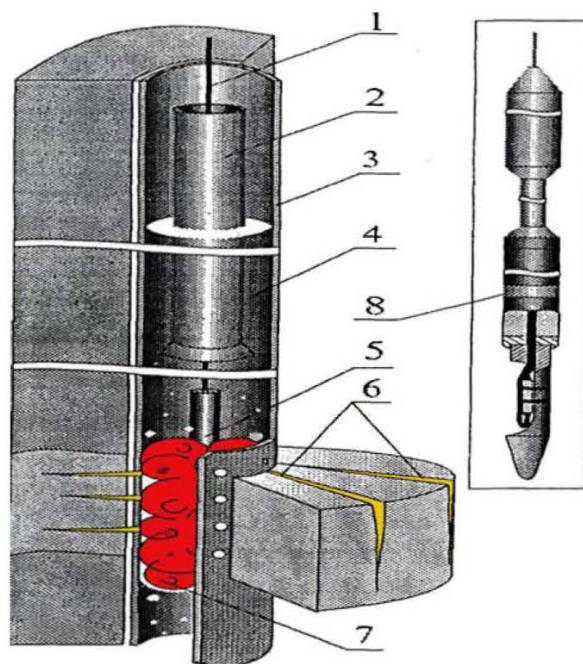


Рис. 4.33. Устройство и схема работы генератора ПГД-42ТЦ:
1 – каротажный кабель; 2 – НКТ; 3 – обсадная колонна; 4 – скважинная жидкость; 5 – генератор; 6 – трещины в пласте; 7 – продукты горения; 8 – преобразователь взрывных процессов

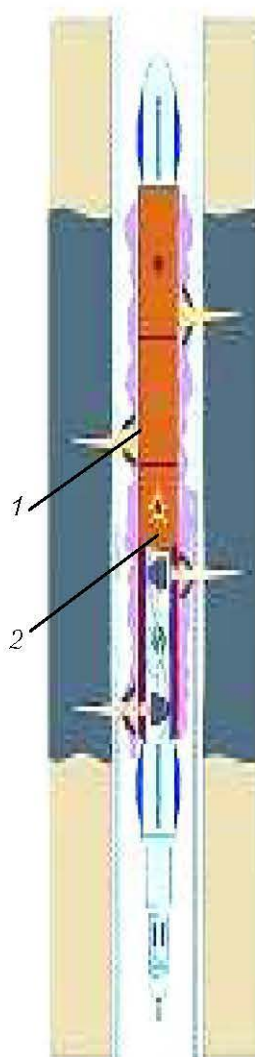


Рис. 4.34. Схема работы в скважине перфоратора-генератора комплексного:
1 – кумулятивный заряд; 2 – пороховой генератор давления

генератора. Поэтому технология может быть применена только в тех случаях, когда интервал перфорации обсажен прочными трубами с высокой ударной вязкостью, а перфоратор формирует чёткие круглые отверстия без микротрещин.

5

ЛИКВИДАЦИЯ АВАРИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАБОТЫ В СКВАЖИНАХ

Бурение глубоких скважин и, прежде всего, поисковых и разведочных скважин на нефть и газ сопряжено со сложными физическими процессами, протекающими в недрах земли в результате нарушения метастабильного напряжённо-деформированного состояния породы. Опережающее разрушение породы перед долотом, изменение свойств промывочной жидкости за счёт ухода в пласты дисперсионной среды, обвалообразование и залипание инструмента в скважине – всё это те факторы, с которыми приходится сталкиваться даже при строжайшем соблюдении технологической дисциплины бурения.

Ряд осложнений и даже аварий вызваны ограниченными возможностями методов неразрушающего контроля, которые не позволили обнаружить скрытые дефекты в бурильных трубах, замках и переводниках. Человеческий фактор в провоцировании аварий на скважинах занимает одно из последних мест.

Многолетний промысловый опыт показывает надёжность и технологичность работ в скважинах с использованием взрывных пакеров. Разобщение пластов и объектов внутри скважины, устранение негерметичности обсадной колонны, повышение качества изоляции затрубного и межтрубного пространства – все эти проблемы решают с помощью взрывных пакеров

5.1. ПРИМЕНЕНИЕ ВЗРЫВА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ОСЛОЖНЕНИЙ И АВАРИЙ ПРИ БУРЕНИИ

5.1.1. Торпеды кумулятивные осевые (ТКО)

В глубоких и сверхглубоких скважинах роль взрывных устройств при ликвидации осложнений и аварий часто становится особо значимой. Разрушение на мелкие фрагменты аварийных металлических конструкций, таких как долота или их элементы, а также клиньев и т.п. на забое глубоких и сверхглубоких скважин может быть осуществлено торпедами кумулятивными осевого действия (табл. 5.1). Торпеда (рис. 5.1) представляет собой

Таблица 5.1

Технические характеристики торпед ТКО

ТКО	Максималь- ный наруж- ный диаметр	Масса ВВ, кг	Предельные параметры применения	
			Температура, °С	Давление, МПа
200–800/120	200	8,2	120	80
120–600	120	2,7	120	60
T120-1000/200	120	3,7	200	100
T70-1000/200	70	0,85	200	100
T60-1500/230	60	0,6	230	150
T38-1500/230	38	0,15	230	150

кумулятивный заряд 1, помещённый в герметичный корпус 2. Иницирование производится с помощью взрывного патрона 3 при спуске торпеды на кабеле. Для улучшения контакта с объектом, подлежащим торпедированию, на кабель непосредственно над торпедой навешиваются грузы 4. Несмотря на грузы установка торпеды, спускаемой на кабеле, связана с рядом проблем. Во-первых, очень сложно установить торпеду вертикально. Во-вторых, несмотря на тщательные промывки забоя скважины, длительный период времени между промывкой и установкой торпеды на забое, из-за многочасового подъёма НКТ, забой будет закрыт осадком (часто многометровым), который торпеда не сможет преодолеть.

Поэтому предпочтение отдают спуску ТКО на трубах.

На рис. 5.2 представлено устройство УСТ для спуска на трубах в компоновке с головкой и тремя торпедами.

УСТ обеспечивает циркуляцию жидкости между внутренним объёмом бурильных труб и затрубьем в процессе спуска компоновки через каналы 1. Через эти же каналы ведётся промывка забоя скважины до посадки торпед на разрушаемый металл на забое. После установки торпеды в боевое положение в колонну бурильных труб сбрасывают обрезиненный стальной шар 2, который, попадая на седло, разобщает внутренний объём труб и затрубье. Одновременно шар опирается на шток накольного механизма 3. Сам накольный механизм имеет несколько степеней предохранения. Наличие чеки, рассчитанной на 400–600 Н предохраняет накольное устройство от случайных ударов по штоку упавших в скважину предметов. При срезанной чеке шар, движущийся по каналу УСТ, должен сжать ещё пружину для того чтобы накольник достиг устройства иницирования и произошло срабатывание торпеды. После максимального сжатия пружины шар проваливается ниже и через боковое окно уходит в затрубье. Теперь освобождённая пружина поднимает накольник над устройством иницирования. Рассмотренная система предохранения, конечно, не может обеспечить полную безопасность работ.

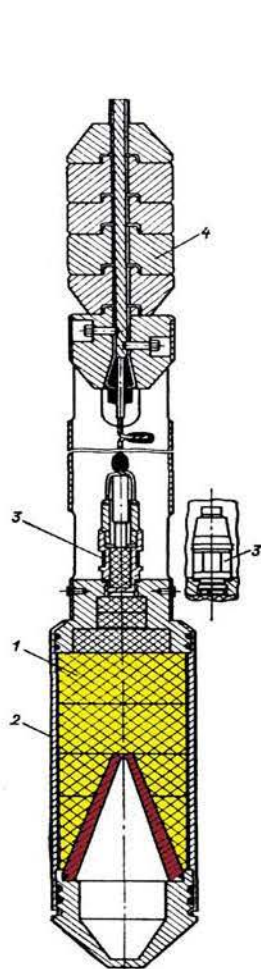


Рис. 5.1. Торпеда ТКО, спускаемая на кабеле

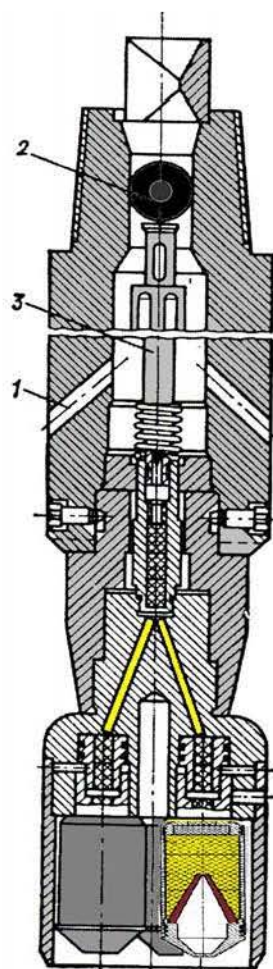


Рис. 5.2. Устройство для спуска трех торпед на трубах с головкой

Поэтому подъем торпеды после отказа или отсутствия информации о факте срабатывания (сигнал поглощен пластом) требует от всего персонала, ведущего работы, максимальной осторожности.

Применение ТКО в комплексе с импlosionными ловителями. Разрушенные металлические конструкции на забое скважины требуют подъема их на дневную поверхность. Для этих целей

также могут быть использованы взрывные устройства. Среди них – имплозийный ловитель ИЛ. Последний представляет собой трубу, верхняя часть которой оснащена головкой под кабельный наконечник, а нижняя часть закрыта герметичной мембраной, с закреплённым на ней взрывным патроном. Ниже мембраны установлено устройство под названием «щучья пасть». Давление в герметически закрытой трубе перед спуском в скважину равно атмосферному. После спуска в скважину ИЛ и установки его на забое с небольшим ослаблением натяжения геофизического кабеля взрывают патрон. Разность давлений между забойным и атмосферным в полости ИЛ приводит к затягиванию в полость трубы фрагментов металла. Задача «щучьей пасти» состоит в пропускании внутрь полости трубы крупных и мелких фрагментов металла и исключении выпадения их из полости трубы в процессе подъёма ИЛ на дневную поверхность.

На рис. 5.3 приведена последовательность операций при работе с комплексом ТКО–ИЛ. На первом этапе ИЛ, спущенном на

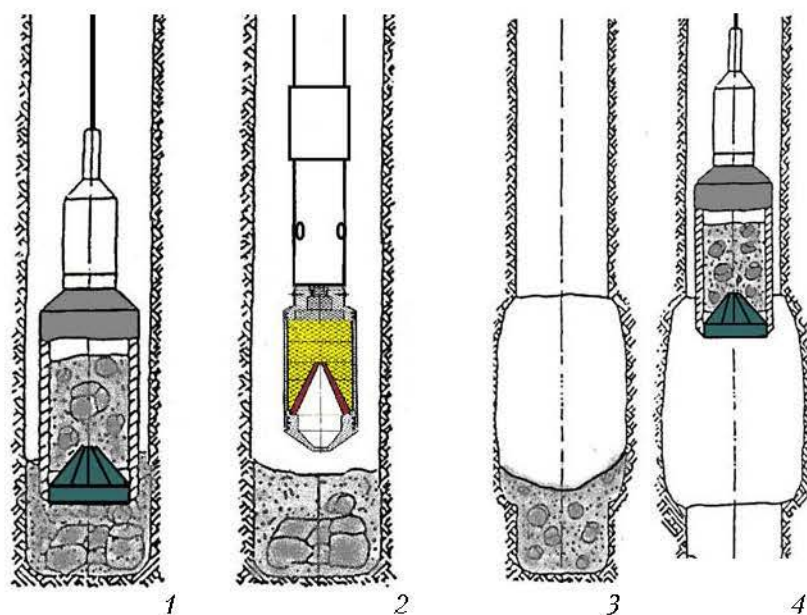


Рис. 5.3. Очистка забоя комплексом торпеда ТКО – имплозийный ловитель: 1 – очистка забоя от крупных фрагментов имплозийным ловителем (ИЛ), спущенным на кабеле; 2 – промывка забоя с допуском на забой ТКО, приведение в действие ТКО для разрушения металла на забое, промывка забоя от шлама породы; 3 – состояние забоя после разрушения металла и промывки от шлама породы; 4 – окончательная очистка забоя ИЛ

кабеле, забираются крупные фрагменты, которые могут пройти через щучью пасть. На втором этапе в скважину спускают на бурильных трубах ТКО. Осуществляя промывку с постоянным допуском труб в скважину, достигают посадки ТКО на крупные металлические детали (переводник, долото и т.п.). Сбрасывают в скважину шар и после достижения им посадочного места, повышают давление в колонне бурильных труб до срабатывания ТКО. Дополнительной промывкой удаляют из скважины осыпавшиеся со стенок труб всякого рода наслоения. На заключительном этапе с помощью ИЛ окончательно очищают забой. При работе с ИЛ необходимо учитывать реакцию ИЛ на втекание в полость трубы скважинной жидкости и ограничивать длину трубы, во избежание глубокого внедрения последней в забой под действием реактивной тяги.

5.1.2. БОРЬБА С ПРИХВАТАМИ БУРИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА В СКВАЖИНАХ

Прихват бурильного инструмента в скважине относится к достаточно серьёзным осложнениям, которые далеко не всегда можно ликвидировать без потери части пробуренного ствола или части бурильной колонны. При возникновении аварийной ситуации все неточности последующих технологических операций и отсутствие необходимой техники могут только усугубить складывающуюся ситуацию.

Бурильная колонна прихватывается в рабочем состоянии, которое характеризуется определённой эпюрой напряжений в стенках труб. В верхней части колонны действуют растягивающие напряжения, в нижней – сжимающие. На это сложное напряжённое состояние накладывается прихват.

При неуспешных попытках освободить инструмент путём расхаживания или воздействия на колонну низкочастотными колебаниями и т.п. принимают решение о системном подходе к ликвидации прихвата.

Определительские работы в скважине.

Прежде всего, необходимо выяснить причины и положение зон прихвата с одновременной оценкой состояния бурового раствора в колонне бурильных труб. Отсутствие циркуляции промывочной жидкости в скважине из-за прихвата бурового инструмента влечёт за собой, как правило, ещё и образование высоковязких пробок в бурильных трубах.

В такой ситуации первая стадия ликвидации прихвата должна состоять в снятии вертлюга и проведении шаблонирования по всей длине колонны бурильных труб. При обнаружении в колонне пробок или препятствий необходимо их ликвидировать, обес-

печив проходимость геофизических скважинных приборов и малогабаритных перфораторов по колонне бурильных труб. Для этого может потребоваться колтюбинговая установка. Эта стадия завершается восстановлением натяжения инструмента до значения, которое имело место в начале прихвата. На второй стадии необходимо определить размеры и положение зон прихвата, используя акустический цементомер и прихватоопределитель (ПО). Цементметрия поможет обнаружить зоны плотного контакта колонны бурильных труб с породой. ПО использует принцип размагничивания ферромагнетиков при их упругом деформировании. Для подтверждения положения зон прихвата с помощью ПО на колонне через каждые 4–5 или 9–10 метров необходимо поставить магнитные метки. При использовании ЛБТ метки ставят на замках. После постановки магнитных меток их записывают на диаграмму. Затем увеличивая натяжение колонны на 10–15 %, контролируют состояние магнитных меток. Глубина, до которой все магнитные метки стёрлись, соответствует неприхваченной части колонны. Как правило, эта глубина соответствует точке смены знака напряжений в колонне. Если натяжение колонны увеличить до значения полного её веса и все магнитные метки сотрутся до турбобура, то прихват может существовать только в зоне турбобура. В тех случаях, когда магнитные метки сохраняются значительно выше турбобура, приходится констатировать, что вся зона с сохранившимися магнитными метками до забоя может быть зоной прихвата.

Способы ликвидации прихвата.

1. Простреливание в стенке УБТ вспомогательных перфорационных каналов с помощью малогабаритных перфораторов ПКОС 38 конструкции П.В. Вольницкого.

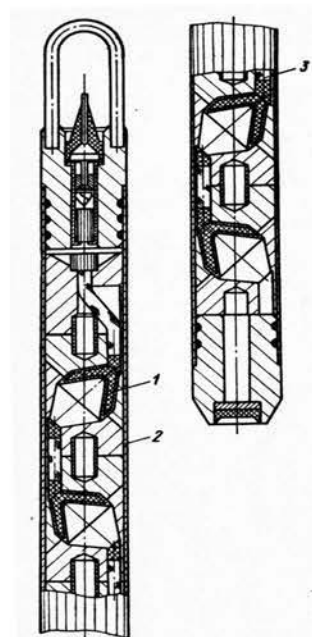
Через простреленные каналы осуществляется размыв жидкостью всей или части зоны прихвата. Малый габарит перфоратора ПКОС38 позволяет спускать его в бурильную колонну с диаметром прохода от 44 мм. Расположение осей зарядов под углом и запрессовка кумулятивных зарядов и детонационной цепи в стальные секции – всё это было направлено на достижение высокой пробивной способности при минимальных габаритах. Одновременно была решена задача обеспечения высокой проходимости в утяжелённых буровых растворах без дополнительных грузов. Схема перфоратора приведена на рис. 5.4.

2. Поэтапным многократным развинчиванием инструмента в месте (местах) прихвата, промывки вышележащей зоны и последующего свинчивания инструмента.

Более сложным, но часто и более продуктивным является способ многократного развинчивания инструмента с промывкой части зоны прихвата и последующего свинчивания.

Рис. 5.4. Схема перфоратора ПКОС 38

В тех случаях когда зона прихвата совпадает с положением турбобура, необходимо выполнить развинчивание турбобура с колонной бурильных труб в районе переводника. Начинают работы с натяжения колонны до величины, соответствующей весу колонны (до турбобура) в промывочной жидкости. При этом у турбобура будет находиться «свободная точка», в которой напряжения в колонне и в переводнике будут близки к нулю. Для исключения несанкционированного развинчивания замков проводят дополнительную затяжку их максимальным крутящим моментом $M_{\max}$. При этом надо учесть очень малую скорость распространения крутящего момента по колонне. Время на затяжку всех замков может составить несколько часов, в течение которых, по мере ухода крутящего момента к забою, необходимо восстанавливать на устье крутящий момент.



Теперь к колонне прикладывается момент, крутящий влево для создания «пружины». Величина этого момента не должна превышать $0,3 M_{\max}$. В период натяжения и закручивания колонны готовят торпеду из детонирующего шнура ТДШ или малогабаритную шашечную ТШТ.

Заряд для развинчивания труб определяется в соответствии с номограммами, представленными на рис. 5.5 (а, б, в).

В качестве примера выберем заряд для развинчивания УБТ в районе турбобура. Для этих целей необходимо воспользоваться номограммой 5.5, в) и соединив точку, соответствующую наружному диаметру трубы $d_{\text{тр}}$, с точкой, соответствующей толщине стенки трубы δ , получают на вспомогательной оси Z точку, которую соединяют с точкой на оси гидростатического давления $p = 50$ МПа на уровне переводника. В месте пересечения последней прямой со шкалой γ получают навеску заряда гексогена (в граммах на метр длины). В этом частном случае навеска равна 100 г на 1 м.

Для стальных труб и легкосплавных первым шагом является проведение синей линии, соединяющей точку соответствующую

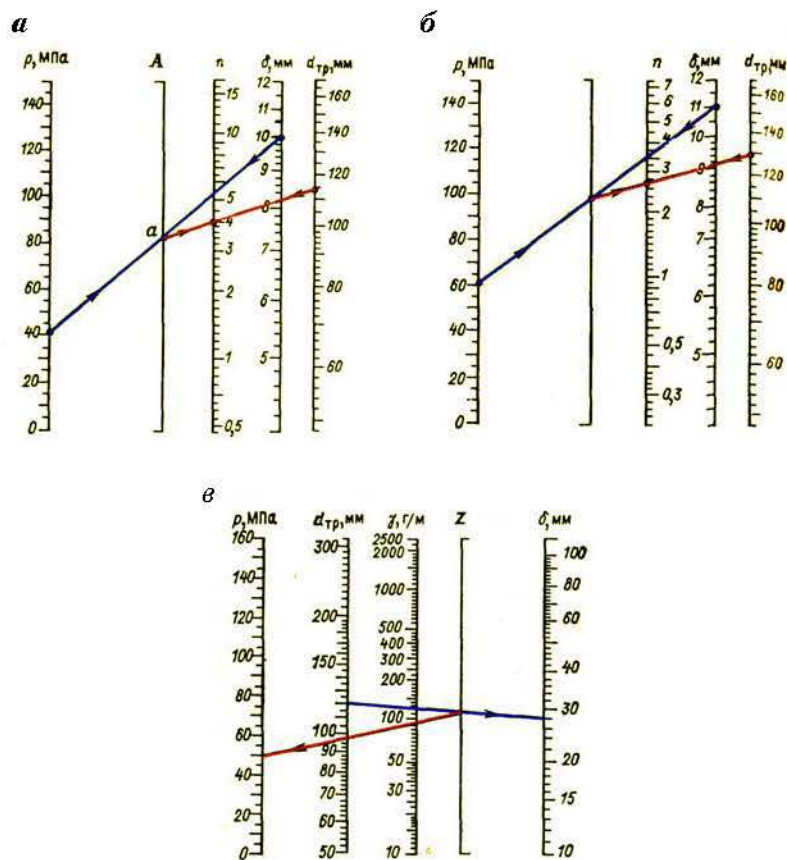


Рис. 5.5. Номограммы для определения зарядов для развинчивания труб:
а – стальных; б – легкосплавных; в – УБТ

гидростатическому давлению в интервале развинчивания, с точкой, соответствующей толщине стенки трубы. Полученную на вспомогательной шкале точку красной линией соединяем с точкой, соответствующей внешнему диаметру трубы. На пересечении красной линии со шкалой n получаем число ниток детонирующего шнура ДШВ, необходимое для развинчивания труб.

Шнур ДШВ содержит 12,5 г взрывчатого вещества ТЭНа на метр длины с энергией взрыва 5,86 МДж/кг. Пересчет на другие ВВ осуществляется исходя из условий равенства энергий зарядов.

Решив задачу по развинчиванию колонны бурильных труб с переводником турбобура, можно провести кислотную ванну, или

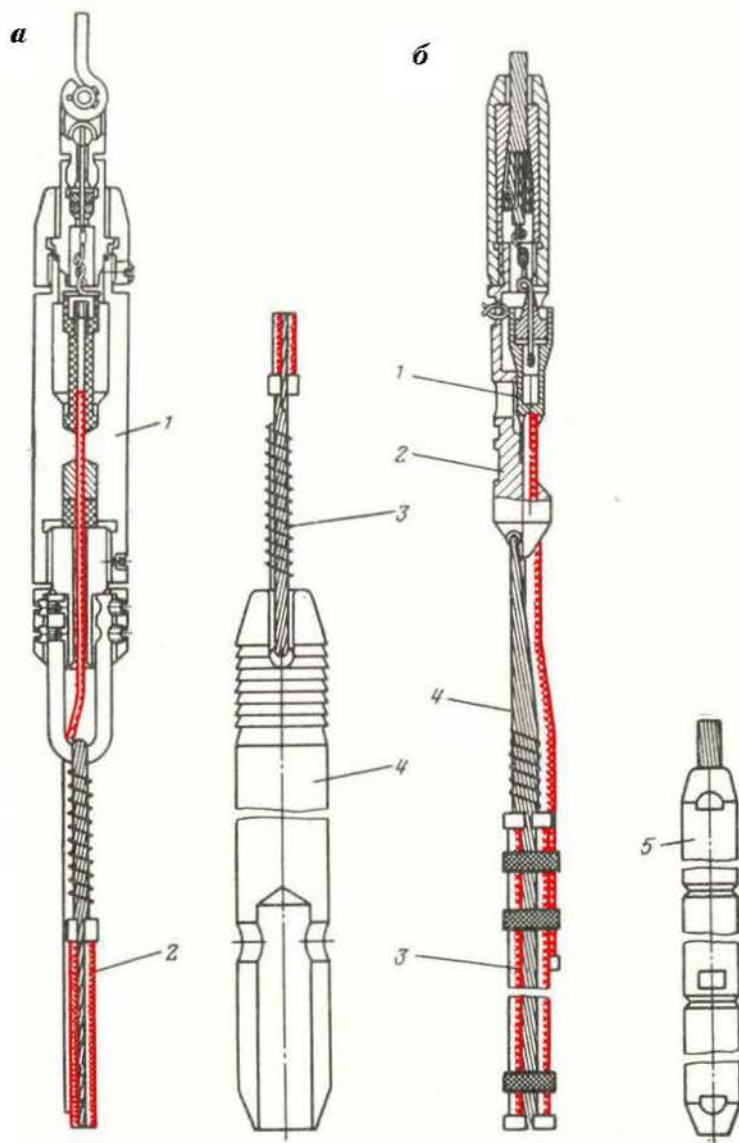


Рис. 5.6. Торпеды ТДШ:
 а – ТДШ50; б – ТДШ25

грязекислотную обработку, а затем после свинчивания колонны с переводником освободить турбобур.

Для развинчивания и встряхивания созданы и применяются торпеды из детонирующего шнура ТДШ и малогабаритные шапечные торпеды ТШТ. Торпеда ТДШ 50 многократного применения (рис. 5.6, а) состоит из головки 1, в которой находится узел инициирования, основного заряда 2 и одного или нескольких отрезков детонирующего шнура ДШВ, связанных в пучок и смонтированных на несущем стальном тросе 3. В нижней части крепят груз 4 специальной конструкции. Головка и груз имеют диаметр 5 см. В качестве средства инициирования применяют электродетонатор ЭД8 или ТЭД2. Для сохранения головки и повышения безопасности сборки в головку вводится только один шнур длиной 0,5 м. Через этот шнур детонация передаётся пучку шнуров. Головка рассчитана на многократное использование при давлениях до 50 МПа и температуре до 100 °С.

Малогабаритная торпеда ТДШ25 (рис. 5.6, б) состоит из заряда 3, собираемого из отрезков детонирующего шнура, взрывного патрона 1, держателя 2, троса 4 и груза 5. Во взрывном патроне размещают электродетонатор. Торпеда может быть спущена в трубы с малым проходным диаметром.

В табл. 5.2 приведены основные технические характеристики торпед ТДШ.

Для встряхивания и отвинчивания труб применяют серийно выпускаемые торпеды ТШТ. Это негерметичные торпеды. На рис. 5.7 представлено устройство такой торпеды. Груз находится над торпедой 1, что позволяет легко его извлекать после взрыва. Алюминиевый корпус 3 предохраняет от трения заряда торпеды о стенки труб и облегчает ликвидацию остатков путём разбухания их или растворения. Взрывной патрон 2 типа ПВГУ обеспечивает надёжное срабатывание торпеды. Заряд ВВ массой до 5 кг может обеспечить обрыв труб в аварийных ситуациях.

Таблица 5.2

Основные технические характеристики торпед ТДШ

Показатель	ТДШ25	ТДШ50	ТДШТ 50
Наружный диаметр, мм	25	50	50
Минимальный наружный диаметр буровой трубы, мм	73	102	102
Минимальный наружный диаметр НКТ, мм	48	73	73
Предельная температура применения, °С	80	80	200
Средства взрывания	ТЭД2	ЭД8 ТЭД2	ПВГУ4 ПВГУ5 ПВГУ250/1500

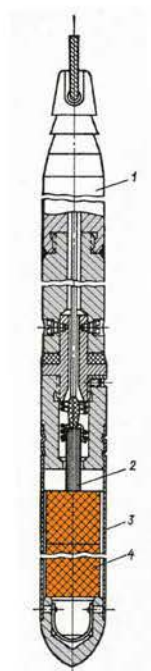
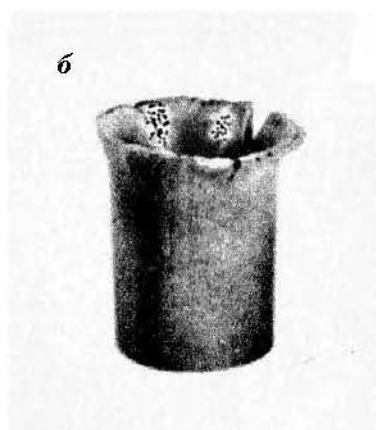
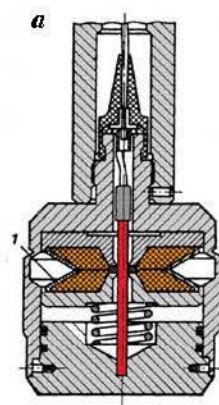


Рис. 5.7. Торпеда ТШТ

Рис. 5.8. Разрез кумулятивного трубореза (а) и перерезанная им труба (б):
1 – кольцевой кумулятивный заряд



В табл. 5.3 приведены технические характеристики некоторых фугасных торпед.

Фугасные торпеды ТШТ и ТШ снаряжаются непосредственно на скважине. Корпус торпеды, взрывной патрон и заряд привозят в отдельной таре. Патрон присоединяют к боевой цепи в последнюю очередь.

Таблица 5.3

Технические характеристики некоторых фугасных торпед

Максимальный наружный диаметр, мм	22,5	28,5	42	50
Диаметр заряда, мм	20	25	35	43
Масса заряда, кг	0,255	0,550	1,08	1,62
Минимальный наружный диаметр трубы, в которую может быть спущена торпеда, мм:				
НКТ	48	48	60	73
Бурильной	60	73	89	103
Обсадной	—	—	114	114
Замок бурильных труб, через который может быть спущена торпеда:				
ЗН	ЗН95	ЗН108	ЗН140	ЗН140
ЗШ	ЗШ108	ЗШ108	ЗШ108	ЗШ108

Таблица 5.4

Технические характеристики кумулятивных труборезов

Труборез	Наружный диаметр, мм	Масса заряда, г	Трубы		Термобаростойкость	
			Тип	Условный диаметр, мм	p_{max} , МПа	T_{max} , °C
ТРК45	45	10,5	НКТ	60	80	150
ТРК 55	55	22,6	НКТ	73	80	150
ТРК 68	68	36,8	НКТ	89	80	150
ТРК85	85	31,0	Обс.	114	80	150
ТРК90	90	81,0	Бур.	114	80	150
ТРК110	110	125,0	Бур.	140	50	100

В отдельных случаях разъединение колонны осуществляют перерезанием её стенок кольцевым кумулятивным труборезом (рис. 5.8). В табл. 5.4 приведены технические характеристики кумулятивных труборезов.

5.2. РАЗОБЩЕНИЕ ПЛАСТОВ И ИЗОЛЯЦИОННЫЕ РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ

Одна из главных задач строительства нефтяных и газовых скважин – обеспечить качественную изоляцию затрубья и межтрубья. При цементировании затрубья в одну ступень возникают проблемы с подъёмом цемента до устья, а также с исключением образования протяжённых каверн. Возникновение каверн, как правило, связано с наличием заколонных перетоков в период ожидания затвердевания цемента ОЗЦ. Большой разброс во времени загустевания цемента приводит к снижению противодавления на пласт и развитию заколонных перетоков. Таким образом, к моменту затвердевания цемента в нём уже существуют каналы, по которым пласты могут сообщаться между собой. Часто это осложняет эксплуатацию скважины или делает её невозможной.

5.2.1. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ В ЗАТРУБЬЕ

Для исключения кавернообразования в затрубье эффективной технологией является установка заколонного взрывного пакера. Заколонный взрывной пакер (рис. 5.9) представляет собой две соосно расположенные трубы из титана (немагнитного материала). Торцы труб герметично изолируются и представляют собой муфту и штуцер для соединения с обсадными трубами. Межтрубье содержит пороховой движитель, который по команде бу-

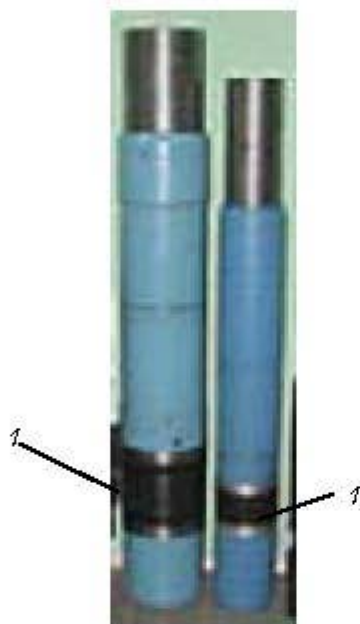


Рис. 5.9. Заколонный пакер:
1 – резиновая манжета



Рис. 5.10. Пакер ПВЦ:
1 – шпильки; 2 – резиновая манжета

дет приведён в действие, и пороховые газы высокого давления, которые деформируют резиновую манжету необратимо, прижав её к стенке скважины. Воспламенение порохового заряда осуществляется индуктором через трансформаторную связь. Технология работ состоит из нескольких операций.

После подготовки пакера к работе геофизический отряд доставляет его на скважину к моменту спуска обсадной колонны. В соответствии с заранее принятым решением о месте его установки (в зоне плотных пород и номинального диаметра ствола) пакер свинчивается с обсадными трубами в колонну и спускается в скважину. Перед началом цементирования на цементировочную головку устанавливается лубрикатор. Лубрикатор устанавливают на устье скважины при цементировании во избежание невозможности разрядки скважины из-за размыва обратного клапана.

После завершения закачки цемента в затрубье и посадки верхней пробки на стоп-кольцо через лубрикатор в скважину спускают индуктор с модулями термометра и ГК или НГК (в карбонатных разрезах). При достижении в скважине геофизиче-

скими приборами места установки пакера включается индуктор и за стенкой внутренней трубы происходит запуск движителя, не-обратимо сжимающего резиновую манжету. После срабатывания пакера проводится термометрия и РК для подтверждения факти-ческого положения пакера в геологическом разрезе.

Для создания изоляционных экранов путём закачки тампо-нажных материалов в пласт под давлением до 30 МПа создан и применяется пакер взрывной цементировочный ПВЦ (рис. 5.10) с наружным диаметром 110, 118, 135 мм (ПВЦ110, ПВЦ118, ПВЦ135). Используется соответственно в обсадных колоннах диаметром 117,7–124; 125,2–133; 144–152 мм при максимальном гидростатическом давлении 147 МПа и температуре 150 °С. При замене клапанного устройства может применяться в качестве штипсового пакера. Отличительной особенностью пакера являет-ся его работа без опоры на забой.

Первая стадия состоит в постановке пакера, спускаемого на геофизическом кабеле. После спуска и установки пакера в задан-ном месте электрическим импульсом поджигается пороховой зар-яд массой 120 г, давлением газов гильза камеры смещается от-носительно корпуса, осаживая плашки и прижимая манжету к стенке обсадной трубы. Скорость движения поршня регулируется гидравлическим тормозом, заполненным жидким маслом. После посадки пакерующей части разрывается шпилька, соединяющая камеру с пакерующей частью. Камера освобождается и может использоваться повторно многократно. На этом первая стадия работы завершается.

Для закачки цемента пакер соединяют со спускаемыми в скважину НКТ свободной посадкой специальной муфты на ко-нец штока пакера. При опрессовке пакера в скважине поданный с поверхности с жидкостью опрессовочный шарик закрывает от-верстие в клапанном устройстве, позволяя проверить герметич-ность соединения. Повышая давление до 7 МПа шарик продав-ливается и выходит через окно под пакер, открывая путь тампо-нажному раствору. По окончании продавливания цемента сраба-тывает клапан и перекрывает обратный ток тампонажного рас-твора.

Широкое применение на промыслах РФ и ближнего зарубе-жья получил взрывной пакер ВП. Прочное сцепление пакера с поверхностью обсадной колонны достигается за счёт больших пластических деформаций алюминиевого корпуса под действием пороховых газов высокого давления, образующихся при сгорании дымного ружейного пороха ДРП. На рис. 5.11 показан пакер ВП (в разрезе) до спуска его в колонну и после установки и разъе-динения пакера с утяжелителем. Разъединение происходит за счёт перемещения вверх до упора пробки, благодаря чему стальные

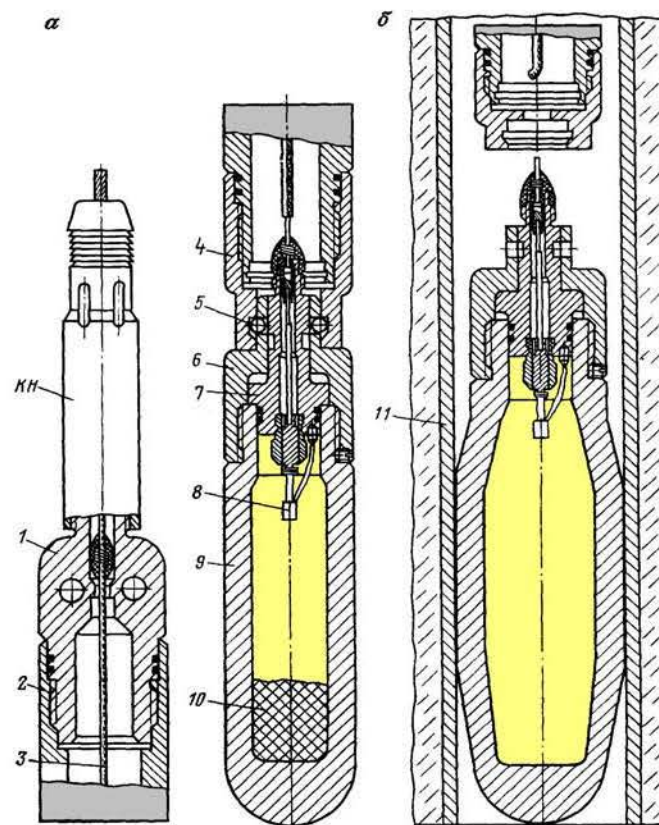


Рис. 5.11. Взрывной пакер ВП в обсадной колонне:
а – до установки; *б* – после установки в обсадной колонне. КН – кабельный наконечник; 1 – головка; 2 – утяжелитель; 3 – электропровод; 4 – переходник; 5 – фиксирующие шарики; 6 – головка пакера; 7 – пробка; 8 – электрозапал; 9 – корпус пакера; 10 – пороховой заряд; 11 – обсадная колонна

шарики 5 соединяющие пакер и утяжелитель, получают возможность выйти из зацепления и груз снимается с пакера. Для повышения надёжности разобращения пластов сверху на ВП выливают порцию цементного раствора.

Если расстояние между объектами составляет единицы метров, то для надёжного разобращения необходимо применять пакер типа ВППШ (рис. 5.12, табл. 5.5). Он состоит из пакерующей части и камеры, заряжаемой порохом и извлекаемой после установки пакера на дневную поверхность. Спускается на каротажном



Рис. 5.12. Пакер ВПШ

кабеле. После спуска в заданный интервал через геофизический кабель подаётся электрический импульс для воспламенения порохового заряда. Давлением газов поршень камеры передвигается относительно корпуса, впрессовывая в стенку колонны плашки и сжимая манжету. На конечном этапе рвётся шпилька, соединяющая камеру с пакерующей частью, и открывается канал для выхода газов в скважину. Камера используется многократно. Все взрывные пакеры могут быть разбурены, так как при их изготовлении применяются алюминиевые сплавы и чугун.

Таблица 5.5

Технические характеристики взрывных пакеров для мостов через НКТ с использованием специальных желонки

Пакер	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр обсадной (насосно-компрессорной) трубы, где применяется изделие, мм, минимальный/максимальный	Максимальные условия применения		Масса порохового заряда, кг, минимальная/максимальная	Примечание
			Температура, °С	Давление, МПа		
ВП88, ВП92, ВП102, ВП110, ВП118, ВП135	88–135	96,3/152	120	60	0,2/1	Внутренний диаметр обсадных труб для одного типоразмера меняется в пределах 2–8 мм
ВПШ82, ВПШ102, ПВЦ110, ПВЦ118, ПВЦ135	82–102	88/120	200	150	0,1	Максимально допустимое давление цементирования 30 МПа
	110–135	117,7/144	150	150	0,1	
ПВР48	48	62	120	30		

6

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОСТРЕЛОЧНО-ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ В СКВАЖИНАХ

6.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Работа с изделиями, содержащими взрывчатые материалы, сопряжена с повышенной опасностью непосредственно для профессиональных исполнителей, привлечённых соисполнителей, а также работников совершенно других специальностей, в руки которых может попасть не полностью сработавшее в скважине взрывное устройство. Высокая опасность состоит в том, что срабатывание даже небольшого количества взрывчатого вещества может нанести серьёзные телесные повреждения человеку и такое срабатывание наступает при ударе, тепловом импульсе или другом механическом воздействии на взрывчатое вещество. В разделе 1 вопросы такого плана рассмотрены достаточно детально.

Общие требования безопасности при проведении взрывных работ регламентируются «Едиными правилами безопасности при ведении взрывных работ», утвержденными Ростехнадзором и обязательными для министерств и ведомств страны. Органы Ростехнадзора осуществляют контроль над взрывными работами. Однако единые правила касаются преимущественно принципиальных положений, лежащих в основе обращения с взрывчатыми материалами. Подробнее специфика использования взрыва рассмотрена и оформлена в виде инструкций, методик, отраслевых стандартов, программ и других нормативных документов по прострелочно-взрывным работам в скважинах. Наконец, применительно к конкретному изделию или технологическому процессу вопросы безопасности с максимальной детальностью изложены в техническом описании и правилах эксплуатации изделия. В них наряду с общими указываются специальные, иногда очень индивидуальные меры безопасности при работе, вытекающие из особенностей конструкции или условий применения изделия (процесса).

В этой связи коснемся ответственности разработчиков, исполнителей и руководителей работ за обеспечение безопасности.

Конструкторы, создающие оборудование, или исследователи – авторы нового метода или технологии отвечают за безопасность созданных оборудования и методов их использования. Безопасность оборудования и процесса оценивается экспертными заключениями, которые дают лаборатории (институты) по технике безопасности, существующие в отрасли. Базовой лабораторией по безопасности прострелочно-взрывных работ в глубоких скважинах является лаборатория по технике безопасности института ВНИПИ взрывгеофизика. Перед постановкой на серийное производство оборудование проходит цикл испытаний, включая заключительные приемочные испытания, где еще раз оценивается его безопасность. При положительных результатах материал представляется Ростехнадзору, который издает журнальное постановление о допуске оборудования (изделия, метода, ВВ) к серийному производству и применению. Если в ходе эксплуатации произойдет авария и расследование установит, что она является следствием дефектов конструкции или процесса, разработчик понесет, в зависимости от тяжести случая, ответственность до уголовной включительно. Когда авария вызвана нарушением инструкции по эксплуатации или технологии процесса, документов, которыми должен руководствоваться исполнитель, включая самовольное внесение в них без согласованности с разработчиком изменений, то ответственность падает на нарушителей инструкций. Примерами нарушения может быть использование в конструкции торпеды, где корпус изготавливается из сплава алюминия, корпуса из стальной трубы, т.е. замена металла, не дающего искру при ударе, на дающий, повышающая опасность обращения с изделием. Нарушением технологии будет превышение скорости спуска и подъема изделия, которое может сопровождаться более сильными ударами изделия о неровности в стволе с увеличением вероятности повреждения и самосрабатывания заряда. Это простейшие примеры. Строгое выполнение инструкции по эксплуатации обязательно для обеспечения безопасного ведения работ с изделием.

Одной из гарантий безопасности является наличие в распоряжении исполнителей исправной, надежной в употреблении аппаратуры.

Аппаратура для прострелочных и взрывных работ должна удовлетворять требованиям отраслевых стандартов по безопасности труда и общесоюзного стандарта ГОСТ 12.2.003.74, в котором сформулированы общие требования к безопасности создаваемого оборудования любого назначения. Она должна гарантировать безаварийность для обслуживающего персонала при сборке, транспортировке, хранении и применении, удовлетворять санитарно-гигиеническим нормам, действующим в стране. Использо-

мые в ней ВМ должны быть допущены к применению Ростехнадзором.

Взрывчатые материалы, допущенные к геофизическим работам в скважинах, соответствуют по совместимости (опасности) четырём группам: В, С, D, G. В табл. 6.1 приводятся сведения о наименовании изделий, содержащих взрывчатые вещества и допущенных к применению в геофизике, а также группе совместимости (опасности), к которой каждое из них относится.

Конструкция прострелочно-взрывной аппаратуры должна обеспечивать установку и при необходимости извлечение из нее зарядов и средств взрывания без усилий и натяжения проводников, удобство очистки перед сборкой и удаления остатков ВМ после работы, свободный выход газов в скважину при взрыве. Конструкция должна позволять устанавливать при сборке последними, а при разборке удалять первыми взрывные патроны и

Таблица 6.1

Сведения о наименовании изделий, содержащих взрывчатые вещества и допущенных к применению в геофизике

№ п/п	Наименование изделий	Группа совместимости	Условия применения
1	Заряды к кумулятивным перфораторам, детонирующие шнуры	D	Вторичное вскрытие в нефтегазовых скважинах Ликвидация аварий при бурении.
2	Торпеды: кумулятивные осевого действия; фугасные торпеды; шашка ТКО70; ЗТШТ(в торпедах)	D	
3	Труборезы ТРК	D	
4	Головка взрывная гидромеханическая ВГМ73	D	Для перфораторов, спускаемых на НКТ
5	Устройство инициирования УИГС 89. Боевик, заряд А	D В	Для кумулятивных перфораторов, спускаемых на НКТ
6	Патроны взрывные: ПВГУ; ПГ-170; ПГ250; ПВПД165, 200, ПВПД-М, Н. Взрыватель ПКОС	В	Для приведения в действие перфораторов и торпед в скважинах
7	Пороховые генераторы и аккумуляторы давления ПГДиАДС; аппарат комплексный МКАВ	С	Для интенсификации притоков в нефтяных и газовых скважинах
8	Заряд пороховой для привода пакеров ЗВПШ	С	Разобщение пластов и изоляционные работы
9	Воспламенитель ППВ ПГДБК	С	Для воспламенения генераторов типа ПГДБК
10	Воспламенитель для топливных зарядов ВТЗ	С	Для интенсификации притоков в нефтяных и газовых скважинах
11	Патроны пиротехнические ПП9, ППТ-230	G	Для воспламенения генераторов типа ПГДБК

взрыватели. Оборудование должно пройти испытание на удар, иногда сбрасыванием на плиту, на тряску – транспортировкой по грунтовым дорогам и обеспечивать хранение изделия в нормальных складских условиях в течение гарантийного срока. Аппаратура должна также содержать конструктивные элементы, позволяющие извлекать ее из скважины в случае оставления. Для обеспечения безопасности нужна хорошая организация хранения и учета ВМ. Их хищение, утеря или использование не по назначению недопустимы.

Сочетание надежной охраны с хорошо поставленным учетом движения ВМ при приобретении, доставке и использовании – условия выполнения требований безопасности. Контроль на всех этапах, четкая организация дела гарантируют, что ВМ будут использованы только по назначению.

6.2. ХРАНЕНИЕ И УЧЁТ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ (ВМ)

По вопросам хранения и учета имеется ряд регламентирующих документов. Они также базируются на Единых правилах безопасности. Ознакомимся с требованиями, предъявляемыми ЕПБ к хранению и учету ВМ.

ВМ разных групп, как правило, должны храниться и перевозиться раздельно. Хранение ВМ осуществляется на складах, каждый из которых должен иметь паспорт. Склады подразделяются на базисные и расходные. Их устройство должно удовлетворять Инструкции по устройству складов ВМ. На базисном, где может быть любое число хранилищ, операции ограничены получением и передачей ВМ в заводской таре на расходные склады, и выдача их взрывникам не производится. Распаковка ВМ и предельные емкости хранилищ зависят от группы, к которой по степени опасности ВМ принадлежат. Хранилища могут быть поверхностными, полууглубленными, углубленными и подземными. Углубление хранилищ уменьшает опасные расстояния по действию воздушной волны при случайном взрыве, но способствует увеличению его сейсмического действия. Нужно иметь в виду, что опасные расстояния по воздушной волне, как правило, превышают расстояния по сейсмическому действию взрыва.

В расходных складах осуществляется выдача ВМ взрывникам и получение от них обратно неиспользованных ВМ. Так же, как и базисные, они могут быть поверхностными, полууглубленными, углубленными и подземными. Делятся на постоянные (срок службы более трех лет), временные (до трех лет) и кратковременные (до одного года). Для каждого предусмотрены свои нор-

мы хранения ВМ. Срок хранения исчисляется с момента завоза. К кратковременным относятся специально оборудованные автомобили и иные транспортные средства, где размещаются ВМ для взрывных работ, выполняемых на протяженных трассах (например, при сейсмической разведке). Их маршрут передвижения согласуется с органами милиции. На право хранения ВМ необходимо иметь разрешение органов милиции, куда руководитель организации направляет заявление с копией акта комиссии, в которую входят представители Ростехнадзора, милиции, пожарного надзора, о приемке склада. Хранение ВМ в сейфах в исследовательских и учебных организациях, размещаемых в отдельной комнате, ограничено 10 кг ВВ и 500 детонаторами. Хранение также требует соответствующих разрешений.

Заведовать складами ВМ разрешается лицам, имеющим право руководства взрывными работами или окончившим вузы и техникумы по специальности технология ВВ. Ими также могут быть сотрудники, имеющие право производства взрывных работ после прохождения специальной подготовки и получившие удостоверение установленной формы. Заведовать зарядной мастерской геофизического предприятия, где осуществляется подготовка и зарядка прострелочно-взрывной аппаратуры для выполнения работ в скважинах, разрешается лицам, имеющим Единую книжку взрывника – документ, обязательный для ведущего взрывные работы, при стаже работ в промышленной геофизике не менее года.

Порядок хранения и использования ВМ контролируется органами Ростехнадзора и милиции. Ростехнадзор определяет техническую необходимость проведения взрывных работ, обоснованность заявок на ВМ, в том числе и по условиям хранения (склад может быть неисправен или перегружен), проверяет наличие исполнителей, их квалификацию и соответствие выполняемой работе, соблюдение условий хранения и состояние ВМ. Милиция контролирует хранение и перевозку ВМ, обеспечение охраны на складе и при перевозке. В ходе проверок в зависимости от состояния дел контролирующие организации могут выносить любые решения, вплоть до закрытия склада и запрещения работ.

Для регистрации поступления и расхода ВМ существуют единые формы документов. Книга учета прихода и расхода ВМ учитывает движение ВМ на складе, книга учета выдачи и возврата ВМ контролирует расход ВМ взрывниками. Документом для передачи ВВ со склада на склад служит наряд-накладная, для выдачи взрывнику – наряд-путевка. Форма документов стандартная. Записи в книгах ведутся аккуратно, без подтирок, расход ВМ подсчитывается ежедневно. Взрывникам, не отчитавшимся за

расходование ВМ по предыдущей наряд-путевке, взрывчатые материалы не выдаются. Каждый выдаваемый заряд и средство взрывания имеют номера, записываемые при выдаче и сдаче изделий обратно, если они не израсходованы. Такая система учета уменьшает возможность бесконтрольного использования ВМ.

6.3. РАСЧЁТ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ

При организации хранения принимают меры к тому, чтобы случайный взрыв на складе не сопровождался повреждением всех его объектов и объектов, расположенных по соседству. Для этого при проектировании расчетным путем определяют безопасные расстояния между хранилищами по передаче детонации и по действию воздушной и сейсмической волн на объекты склада и сооружения, находящиеся в районе его размещения. Для расчета расстояния передачи детонации от хранилища с детонаторами (их всегда берут за активный заряд) к хранилищу ВВ предложена формула

$$r_n = 0,06\sqrt{n}, \quad (6.1)$$

где r_n – расстояние в метрах; n – число детонаторов. При расчетах расстояния передачи между хранилищами с бризантными ВВ кроме массы учитывают размер стеллажа или штабеля с ВВ. Расстояния по передаче можно уменьшить обваловав хранилище.

Детально вопрос о воздействии взрыва на соседние объекты рассмотрен в разделах 2.6.1 и 2.6.2.

При взрыве заряда на поверхности сейсмическое действие не учитывается. Радиус $r_{\min}$ (м) безопасного действия воздушной волны на человека определяется по формуле

$$r_{\min} = 15\sqrt[3]{G}, \quad (6.2)$$

где G – масса ВВ, кг. Формулы используют, когда необходимо оценить максимальное приближение к заряду. В обычных условиях рассчитанное расстояние увеличивают в 2–3 раза. Поражение металлическими осколками оболочки изделия при их разлете может иметь место на значительно больших расстояниях.

6.4. КОНТРОЛЬ ЗА СОСТОЯНИЕМ ВМ

Для обеспечения качества и безопасности прострелочно-взрывных работ изделия, содержащие ВМ, подвергаются конт-

ролю и испытаниям при поступлении на предприятие (входной контроль), в ходе хранения и по истечении гарантийного срока хранения. Это имеет большое значение, поскольку аварии могут быть связаны с дефектами ВМ. Существует Инструкция по проверке изделий из взрывчатых материалов для геофизических работ, согласованная с Ростехнадзором, регламентирующая порядок контроля. Входной контроль включает осмотр и проверку сохранности изделий, целостности пломб и тары, проверку сопротивления цепи у средств взрывания, наличия трещин и сколов у зарядов и др. В отдельных случаях проводятся испытания ВМ на содержание влаги, передачу детонации и безотказность взрывания. Для кумулятивных зарядов возможно определение глубины пробития. Результаты испытаний заносятся в журнал учета испытаний и оформляются актом. Контроль изделий проводится взрывниками или лаборантами под руководством заведующего складом. Как правило, при входном контроле осмотру подвергается незначительная часть изделий, но не менее 20–50 из проверяемой партии (число определяется инструкцией).

Гарантированный срок хранения изделий различен и меняется в широких пределах. После проведения дополнительных испытаний при положительных результатах для большинства изделий он может быть продлен на один-три года, при отрицательных – изделия подлежат уничтожению. При выполнении операций по контролю надо обращать внимание на сроки изготовления.

Уничтожение ВМ проводят, по письменному распоряжению руководства предприятием, взрыванием и сжиганием. Работы оформляются актом. Для уничтожения и испытания ВМ в удалении от склада оборудуют площадку, очищенную от горючих материалов, с укрытием для работающих. При сжигании ВВ на площадке размещают дорожками и ограничивают с учетом свойств вещества порцию сжигаемого за одну операцию ВМ. Электродетонаторы и взрывные патроны уничтожать сжиганием запрещено. Единые правила безопасности требуют уничтожать их взрывом в земле во избежание разбрасывания. После завершения работ нужно убедиться в том, что на площадке не осталось ВМ. При уничтожении их в районе скважины особое внимание следует уделить безопасности взрыва для окружающих: предусмотреть локализацию разлета осколков, проконтролировать удаление посторонних из зоны подрыва и исключить появление в ней случайных людей. Предпочтительней проводить уничтожение ВМ, если это позволяют условия работы, не в районе скважины, а на стационарной площадке для уничтожения ВМ, имеющейся у геофизического предприятия.

6.5. ОТКАЗЫ И ИХ ЛИКВИДАЦИЯ ПРИ ПРОСТРЕЛОЧНЫХ И ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ В СКВАЖИНАХ

Факт несрабатывания ПВА и особенно полностью разрушающихся или спускаемых на НК трубах перфораторов установить достаточно сложно и не всегда возможно по следующим причинам:

- некоторые пласты полностью поглощают звуковые волны;
- при работающем агрегате механические шумы полностью перекрывают сигнал от взрыва перфоратора;
- перфоратор может сработать частично.

Последний случай наиболее опасен при использовании полностью разрушающихся перфораторов. Геофизики привыкают к факту затаскивания после ПВР геофизическим кабелем алюминиевых осколков в НКТ. Поэтому отсутствие проходимости в НКТ и невозможность спуска в скважину термометра для определения фактического положения интервала перфорации не считается аварийной ситуацией. Однако, как показывает опыт, в НКТ может быть затянута отказавшая часть перфоратора. Далее НК труба попадёт на трубную базу и далее в печь для очистки от асфальто-смолистых соединений. Это реальная ситуация и её необходимо исключить путём контроля и выяснения причины непроходимости непосредственно на скважине.

Из-за отсутствия контроля за полнотой срабатывания перфораторов, спускаемых на НКТ, и отложенного подъёма НКТ в фонтанирующей нефтяной или любой газовой скважине, считать необходимым присутствие специалиста по ПВР на скважине в течение всего процесса СПО при очередном ремонте скважины. Отказавшие частично ПВА должны уничтожаться взрыванием или сжиганием.

Только сжиганием уничтожаются:

а) изделия групп совместимости «С» и «G» по ГОСТ 19433-88 (заряды из порохов или твёрдого ракетного топлива ЗПГД, заряды и пашки пулевых перфораторов, воспламенители типов ЭВПТ и ППВ, пиропатроны типа ППТ и др.) и изделия из дымного пороха (типа ЭВПШ) группы совместимости «Д»;

б) детонирующие шнуры всех типов (группы совместимости «Д»), замокшие или имеющие повреждения гидроизоляции.

Предпочтительным методом уничтожения средств инициирования, кумулятивных и фугасных бризантных зарядов ВВ является взрывание дополнительным фугасным или кумулятивным зарядом.

Ликвидация отказов, связанных с авариями и осложнениями при выполнении СПО с ПВА.

Ликвидация отказов при спуске ПВА на геофизическом кабеле в обсадную колонну.

Если исчерпаны все методы подъема ПВА, то после обрезания кабеля и удаления его из скважины, заряженный аппарат сбивают на забой или в зумпф бурильным инструментом или НКТ.

Ликвидация отказов при спуске ПВА на геофизическом кабеле через НКТ.

Оборвать кабель, определить положение головы аппарата и установить, находится ли она на замковом соединении или нет. Провести подъем НКТ без развинчивания замка, если голова аппарата находится около него и двухтрубную свечу переместить в место уничтожения ПВА методом разогрева труб.

При заклинивании перфоратора типа ПНКТ, отвинтить и поднять колонну НКТ из скважины совместно с головкой перфоратора, переходной муфтой, размещенными в них устройством инициирования и ударным механизмом, используя левую резьбу в соединении переходной муфты с корпусом перфоратора. С помощью НКТ продавить аппарат в зумпф.

Во всех случаях захоронения ПВА необходимо:

а) составить двухсторонний акт за подписью ответственных представителей геофизической и буровой (нефтедобывающей) организацией об оставлении в скважине ПВА с указанием вида и количественной характеристике его;

б) внести в дело скважины сведения о захоронении в ней ПВА;

в) в графе «Ликвидировано» отказов «Журнала регистрации отказов при взрывных работах», указать «захоронено».

6.6. ПЕРЕВОЗКА ВМ

Для выполнения взрывных работ в геофизическом производстве применяют не взрывчатые материалы, а изделия, их содержащие, которые доставляют к местам работ (технологические перевозки), главным образом, автомобильным транспортом, руководствуясь следующими нормативными документами:

– Правилами перевозки опасных грузов автомобильным транспортом (в части организационных вопросов). Утверждены Минтрансом РФ от 08.08.95 г. п. 73, зарегистрированы в Минюсте РФ 18.12.95 г. № 997.

– ПБ 13-407-01 – Едиными правилами безопасности при взрывных работах (в части организационных вопросов).

– Европейским соглашением о международной дорожной перевозке опасных грузов – ДОПОГ (т. 1 и т. 2, ООН, Нью-Йорк и Женева; в соответствии с ППРФ от 3 февраля 1994 г. № 76

Россия официально присоединилась к ДОПОГ 28.04.1994 г.) в части технических вопросов.

При использовании авиатранспорта (самолеты и вертолеты) необходимо руководствоваться «Техническими инструкциями по безопасной перевозке опасных грузов по воздуху», Дос 9284 AN/905, утвержденными Советом ИКАО и изданными по его решению.

Маршрут перевозки ВМ автотранспортом заранее должен быть согласован УВД всех областей и регионов, через которые пролегает маршрут.

Лицо, перевозящее ВМ, может быть или взрывником, или заведующим складом, или руководителем взрывных работ. При времени перевозки, превышающем 12 ч, его должно сопровождать не менее двух человек.

Автотранспортные средства, предназначенные для перевозки ВМ, обязаны быть исправными, оборудованными искрогасителями на глушителе, иметь средства пожаротушения и предупредительные знаки. При перевозке всех ВВ, кроме второй группы, скорость движения не должна превышать 60 км/ч. Исправность машины и ее пригодность для перевозки ВМ подтверждаются механиком автохозяйства записью в путевом листе: «Автомобиль проверен и пригоден для перевозки ВМ». При перевозке должна быть обеспечена охрана груза на всех этапах, включая и остановки на ночлег. Для промежуточных заправок автоперевозчикам запрещается въезд на территорию автозаправки. Заправка осуществляется с помощью канистр.

Доставка ВМ на близкие расстояния к месту работы разрешается без охраны, но под наблюдением взрывника с привлечением проинструктированных рабочих. С разрешения главного инженера или руководителя взрывных работ можно перевозить ВВ и СВ вместе при условии, что их количество не превышает определенную норму.

Чтобы обеспечить безопасность, зарядку прострелочно-взрывной аппаратуры осуществляют в специальных зарядных мастерских геофизического предприятия, в приспособленных для этого помещениях или передвижных зарядных мастерских. Работы выполняются на базе и непосредственно на скважине. На постоянные зарядные мастерские промыслово-геофизических предприятий существуют типовые проекты. При их проектировании соблюдают требование ЕПБ к помещениям, где выполняются работы с ВМ. Кроме постоянных, существуют и временные (с разрешением на срок до трех лет) зарядные мастерские. Требования к помещениям, где их размещают, проще, требования к оборудованию, режиму эксплуатации отличаются незначительно. Передвижные зарядные мастерские (лаборатории перфораторной

станции – ЛПС) предназначены для перевозки заряженной прострелочно-взрывной аппаратуры и небольших количеств ВМ к скважине, а также зарядки аппаратов непосредственно на месте работы. В качестве разового помещения для зарядки могут быть использованы культбудка, склады и другие сооружения при скважине, а в теплое время – навес, палатка и т.п. с обязательным приспособлением их для выполнения операций. Сюда входит очистка от мусора, установка вспомогательного оборудования, удаление из зоны лиц, не участвующих в проводимой работе. В отдельных случаях сборка изделия ведется непосредственно на мостках или даже в стволе скважины, поскольку размеры и конструкция изделия могут не позволить осуществить ее иначе.

6.7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ СКЛАДОВ

В целях пожарной безопасности склады обеспечиваются средствами пожаротушения, которые должны содержаться в полной готовности в течение всего времени их эксплуатации. Большинство складов оборудуется грозозащитой, которая специально рассчитывается и строится таким образом, что позволяет избежать случайного взрыва от молнии.

После рассмотрения общих вопросов, определяющих порядок хранения и обращения с ВМ, коснемся конкретных причин несчастных случаев при выполнении геофизических работ. Значительная часть из них не связана со взрывом. Это распространенные аварии на транспорте, халатность, приведшая, например, к замерзанию сотрудника в пургу или гибели при переправе через водную преграду и т.д. Ограничимся случаями, происшедшими непосредственно при прострелочно-взрывных работах.

6.8. ТРАВМАТИЗМ, СВЯЗАННЫЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВМ

Травматизм обычно носит тяжелый характер и часто бывает групповым. Подавляющее большинство аварий вызвано несоблюдением требований ЕПБ, а не дефектами применяемой аппаратуры.

Несчастные случаи при уничтожении ВМ на месте работы чаще всего происходят при сжигании последних, когда операцию выполняют без принятия должных мер безопасности, не учитывая возможность перехода горения ВВ в детонацию, форму сжигаемого заряда, безопасные расстояния для выполняющего опера-

цию. Известны случаи попадания в сжигаемое ВВ средств взрывания. В результате – травмирование людей при взрыве ударной волной или разлетающимися элементами оболочки заряда, или кусками грунта. Чтобы избежать этого, нужно строго выполнять правила уничтожения ВМ (предпочтительнее взрывом) и, если условия работы и состояние ВМ позволяют транспортировать их, осуществлять уничтожение на специально приспособленных площадках при складе. Встречаются случаи травматизма при срабатывании прострелочно-взрывной аппаратуры от источников тока, утечек, наводок или даже прямой подачи тока в боевую цепь. Чтобы избежать этого, надо тщательно контролировать состояние электрооборудования на скважине и геофизического оборудования, качество заземления, последовательность монтажа взрывной цепи (от заряда к источнику тока) при выполнении работы. С невыполнением последнего требования также связан ряд тяжелых несчастных случаев.

Как уже неоднократно подчеркивалось, число посторонних лиц, пострадавших при случайных взрывах, значительно. Нужно внимательно следить за удалением их из района работы. Те, кто по характеру выполняемых обязанностей принимают в них участие (например, лебедчик буровой при работах по взрывному развинчиванию труб), должны быть проинструктированы по вопросам техники безопасности с определением круга обязанностей. Нарушение инструкции по эксплуатации – удары по оборудованию, несущему заряды ВВ, работы с открытым огнем, замена расположения в перфораторе средств взрывания, небрежная засыпка пороховых зарядов в камеры перфораторов, грунтоносков и других устройств с оставлением частиц пороха на трущихся поверхностях – эти и иные ошибки также могут быть и были причиной несчастных случаев у геофизиков. Путь их устранения – повышение дисциплины исполнения, строгое соблюдение инструкций по эксплуатации, чем, к сожалению, иногда пренебрегают. Еще один источник травматизма – использование для проверки электрических цепей и средств взрывания самодельных приборов, что категорически запрещается ЕПБ. Даже работая с допущенными проверочными приборами, полезно принимать меры к тому, чтобы случайный взрыв средства взрывания не травмировал проверяющего. Последнее достигается размещением между испытателем и проверяемым средством преграды, локализующей разлет оболочки СВ, например экрана или прочной стенки трубы, в которую в этом случае помещают проверяемое СВ. Обеспечение необходимыми приборами и строгий контроль за действиями взрывников исключают подобные случаи. Можно привести и другие примеры, но общую картину травматизма при работах с ВМ в геофизике они изменяют мало.

Рассмотренные случаи относятся к наиболее часто встречающимся в практике прострелочно-взрывных работ. Как видно из сказанного, в подавляющем большинстве причина их — невыполнение требований ЕПБ и инструкций по эксплуатации оборудования, которыми должны руководствоваться исполнители работ. Их можно было избежать.

6.9. АВАРИЙНОСТЬ ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ НА СКВАЖИНАХ

Кратко остановимся на аварийности при прострелочно-взрывных работах. Причина ее: 1) плохая подготовка скважины заказчиком, 2) чисто технические причины, выявившиеся при выполнении работы, и 3) ошибки, допущенные геофизиками. К первым относятся неисправность колонны, наличие в стволе цементной корки или посторонних предметов, приводящих к заклиниванию аппаратуры при спуске и выстреле, и ряд других дефектов. Путь устранения — контроль состояния и тщательная подготовка скважины к работе. Вторые — обрыв кабеля при срабатывании аппарата в результате заклинивания кабеля в трещинах труб, заклинивание прострелочно-взрывной аппаратуры в результате повреждений элементов конструкции скважины, неоправданно большие повреждения колонны и цементного кольца. И наконец, третьи — прямые ошибки: плохая заделка кабеля и оставление аппарата, применение шаблонов и аппаратов, не соответствующих условиям скважины, дефекты используемого прострелочно-взрывного оборудования, приводящие, например, к его разгерметизации, ошибки при спусках, приводящие к завязыванию узлов на кабеле, перетягивание аппаратов через блок и др. Тщательное ознакомление с документацией по скважине, проверка состояния используемого оборудования перед выездом и на скважине, проверка состояния скважины позволяют сократить число и этих аварий, все еще встречающихся при выполнении геофизических работ.

Следует отметить влияние квалификации взрывника на частоту несчастных случаев, происходящих с ним. Хотя пример взят из практики других взрывных работ, тем не менее, полученные статистические данные заслуживают внимания и близки к картине, наблюдаемой у геофизиков. Преобладающее число несчастных случаев приходится на лиц с минимальным сроком (один-два года) работы, после чего снижается и снова возрастает при длительном стаже работы. Объяснение: на начальном этапе сказываются дефекты подготовки и, как следствие, прямые ошибки при выполнении работы, на втором — излишняя самоуверенность

и, как следствие, небрежность. Поэтому повышение качества обучения взрывников, так же как и периодические инструктажи с ненавязчивым, но квалифицированным напоминанием об условиях безопасного использования взрывной аппаратуры, обязательный разбор несчастных случаев, имевших место в отрасли, и их причин, доведение результатов расследования до сотрудников, несомненно, будут способствовать повышению безопасности ведения прострелочно-взрывных работ.

Несколько слов о мерах, которые нужно предпринять, если несчастный случай произошел. Немедленно окажите помощь пострадавшим и примите необходимые меры безопасности для остального персонала. Если есть возможность – сохраните обстановку, при которой имел место несчастный случай, для последующего детального расследования его причин. Известите о случившемся руководство вашей организации, инженера по технике безопасности, инспектора месткома по технике безопасности, которые приступят к расследованию. При тяжелых случаях уровень расследования повышается, о нем извещаются по степени подчиненности организации министерства, технические инспекторы организаций Ростехнадзора, если несчастный случай связан с ВМ. По результатам расследований составляют акт установленной формы. В акте даются предложения по устранению причин, которые могли бы привести к повторению несчастного случая на предприятии. С учетом результатов расследования определяются виновники и издается приказ, а с персоналом предприятия проводится внеочередной инструктаж по вопросам техники безопасности.

6.10. ОФОРМЛЕНИЕ ПРОСТРЕЛОЧНО-ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Большое значение имеет правильное оформление документов на прострелочные-взрывные работы (ПВР), выполняемые в глубоких скважинах. Некоторые стороны вопроса уже были рассмотрены ранее. Работы начинаются с приема заказа на ПВР геофизическим предприятием. Заказ регистрируется в журнале поступления и выполнения заявок на ПВР. Записываются заказчик, дата поступления заказа, месторасположение скважины, заявленный вид работы, тип и размер аппарата, число зарядов к нему, характеристики интервала работ в скважине – глубина, гидростатическое давление, температура, диаметр колонны (скважины), величина интервала, в котором будут проводиться работы. В отдельной графе указываются осложнения в скважине. Регистрируются фамилии передавшего и принявшего заказ, по-

мер партии, которой поручен выезд на скважину, время выезда и результат выполнения заказа. Операции непосредственно на скважинах ведут по техническому проекту, составленному по типовой форме. Кроме перечня работ, сведений о скважине, данных о снаряжении, транспортировке и хранении стреляющей аппаратуры и ВМ, а также используемом геофизическом оборудовании, в проекте указывается их последовательность. В заключение приводятся результаты работ. Последнее подписывают как геофизики, так и заказчик. Получение ВМ взрывником при выезде на скважину осуществляется по наряду-путевке.

По приезде на скважину до начала работ представителями заказчика составляется и подписывается акт о ее готовности для производства ПВР. В акте приводятся данные по скважине, ее оборудованию, состоянию электросети. В отдельном разделе помещают сведения о результатах контрольного шаблонирования и проверки готовности спуско-подъемного оборудования на скважине, подписываемые начальником геофизического отряда (партии) и представителем заказчика. Они же составляют и подписывают акт о промере кабеля при ПВР.

Выполненные ПВР актируются с указанием результатов работ на скважине. Если произошла авария, то комиссией в составе начальника отряда (партии) и представителя заказчика составляется акт с описанием аварии, указанием ее причин и виновников, а также принятых мер по ликвидации. При необходимости в районе работ ВМ и ПВА уничтожают, приняв меры по обеспечению безопасности операции для окружающих. Результаты уничтожения также актируются с указанием причин, вызвавших необходимость их уничтожения, и способа уничтожения. Акт подписывается начальником отряда (партии) и взрывником (мастером-взрывником). Все указанные документы имеют утвержденную форму и большей частью заполняются в форме ответов на сформулированные в них вопросы.

Порядок работ с ВМ, описанный в главе 8, ЕПБ, а также в предыдущих главах, дает первое представление о требованиях к организации прострелочно-взрывных работ на геофизическом предприятии. Тем же, кому придется непосредственно вести или руководить работами, надлежит еще раз обратиться к ЕПБ и соответствующим инструкциям для более детального их изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашканд М.И., Замахаев В.С. Способ вскрытия пласта при депрессии. А.С. 152 0917, 1990.
2. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва, 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Физматгиз, 1975.
3. Бриджмен. Физика высоких давлений. – ОНТИ, НКТП, 1935.
4. Вицени Е.М. Кумулятивные перфораторы, применяемые в нефтяных и газовых скважинах. – М.: Недра, 1971.
5. Вскрытие пласта кумулятивными перфораторами в условиях превышения пластового давления над забойным/Л.Я. Фридляндер, В.С. Замахаев, Н.И. Гушин, В.М. Куртинов. – Нефтяное хозяйство, 1978. – № 3. – С. 16–18.
6. Гайворонский И.Н. Методика определения гидродинамической эффективности перфораторов. – В кн.: Бурение, эксплуатация, транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1970. – С. 13–18.
7. Гайворонский И.Н. Оценка качества вскрытия пластов по промысловым данным//Нефтепромысловое дело. – 1976. – № 8. – С. 17–19.
8. Гайворонский И.Н., Замахаев В.С. Стратегия выбора технологии вторичного вскрытия пластов и интенсификации притоков: тезисы Международной конференции по геофизическим исследованиям скважин, 8–11 сентября 1998 г.
9. Гайворонский И.Н., Замахаев В.С. Повышение качества заканчивания горизонтальных скважин с использованием взрывных технологий: тезисы 3-его Международного семинара «Горизонтальные скважины», 2000.
10. Гайворонский И.Н., Замахаев В.С. и др. Техническая инструкция по прострелочным и взрывным работам в скважинах МИНЭНЕРГО. – М.: Недра, 2002.
11. Гайворонский И.Н., Замахаев В.С., Леоненко Г.Н. Коллекторы нефти и газа Западной Сибири. Их вскрытие и освоение. – М.: Геоинформмарк, 2000.
12. Григорян Н.Г. Экспериментальные исследования действия взрыва кумулятивных зарядов на корпус перфоратора. – В кн.: Геофизические работы в скважинах. – М.: Недра, 1964. – С. 34–61.
13. Григорян Н.Г. Деформации корпуса кумулятивного перфоратора в жидкой среде//Прикладная геофизика. – Вып. 43. – М.: Недра, 1965. – С. 139–162.
14. Григорян Н.Г., Гайворонский И.Н. Влияние условий в скважине на эффективность перфорации//Нефтепромысловое дело. – 1971. – № 7. – С. 20–24.
15. Григорян Н.Г., Чихладзе Н.С. Исследование влияния гидростатического и горного давлений на эффективность действия зарядов корпусных кумулятивных перфораторов типа ПК//Нефтепромысловое дело. – 1971. – № 9. – С. 6–10.
16. Григорян Н.Г., Замахаев В.С. Техническая инструкция по ПВР в скважинах. – М.: Недра, 1978.
17. Григорян Н.Г., Замахаев В.С. Вскрытие нефтегазовых пластов стреляющими перфораторами. – М.: Недра, 1982.
18. Замахаев В.С. Исследование эффективности вскрытия пласта при применении повторной перфорации//Сб. «Нефть и газ». – МИНХиГП им. И.М. Губкина, 1974.
19. Замахаев В.С., Тах А.В. Причины невысокого выноса керна из продуктивных отложений и возможности их устранения//Бурение газовых и газоконденсатных скважин. – № 51. – 1978.
20. Замахаев В.С., Кончаков В.Н. К вопросу оценки продуктивности пласта в разведочных скважинах//Сб. Прострелочно-взрывные и импульсные виды работ в скважине. – М.: ВИЭМС, 1989.
21. Замахаев В.С., Мамлеев Р.Ш. Стандарт Главтюменнефтегаза. Выбор типоразмера и плотности перфорации в зависимости от геолого-промысловых характеристики объектов разработки. – Тюмень, 1984.

22. Замахеев В.С., Ильясов Е.П. Освоение скважин на месторождениях Западной Сибири//Сб. научных трудов ВНИКрНефть, 1986.
23. Замахеев В.С., Ильясов Е.П. Инструкция по освоению и исследованию скважин на месторождениях Западной Сибири. РД 39-2-1217-84, 1984.
24. Замахеев В.С., Ильясов Е.П., Рогожин Д.И. Методическое руководство для первичного освоения эксплуатационных скважин после бурения их в различных геолого-технических условиях. Тюмень РД 39- 0147009-513-85, 1985.
25. Замахеев В.С., Федорцов В.К., Кончаков В.Н. Оптимизация условий интенсификации притоков нефти из гранулярных коллекторов//Сб. Пути повышения эффективности использования скважин на месторождениях Западной Сибири. – Вып. 66. – Тюмень, 1985.
26. Замахеев В.С. Влияние качества вскрытия на продуктивность низкопроницаемых коллекторов Западной Сибири//Сб. Прострелочно-взрывные и импульсные работы в скважинах, 1991.
27. Замахеев В.С., Матвеев А.А. Влияние импульсного ударного и взрывного воздействия на дилатансионные свойства песчаников и алевролитов//Сб. Трудов 8 Всесоюзного совещания по физическим свойствам пород при высоких давлениях и температуре, 1990.
28. Замахеев В.С., Матвеев А.А. Изменение пористости и проницаемости в области дилатансии в терригенных коллекторах Западной Сибири//Сб. Трудов 8 Всесоюзного совещания по физическим свойствам пород при высоких давлениях и температуре, 1990.
29. Замахеев В.С., Кончаков В.Н. Инструкция по вскрытию пластов стреляющими перфораторами в разведочных обсаженных скважинах. – МИНГЕО, 1987.
30. Замахеев В.С., Колобов М.А. Эмиссионные явления при механическом разрушении осадочных пород глубокого залегания. Тезисы докладов XI Всесоюзного симпозиума по механохимии и механоэmissionsии твердых тел, 1990.
31. Замахеев В.С., Кончаков В.Н. К вопросу вторичного вскрытия пластов-коллекторов: тезисы Международной конференции по геофизическим исследованиям скважин, 8-11 сентября 1998 г.
32. Замахеев В.С. К вопросу о геофизическом сопровождении прострелочных работ в скважинах//Каротажник. – № 74, 2000.
33. Замахеев В.С. Переходные процессы в пластах при первичном вскрытии и их влияние на освоение скважин//Сб. Бурение. – № 2 (прилож. к журналу «Нефть и капитал»), 2001.
34. Замахеев В.С., Стрижов И.Н. Упруго-грузовой режим разработки залежей углеводородов//Нефтяное хозяйство. – № 8. – 2004.
35. Замахеев В.С., Телегин В.С. Импульсно-волновая технология восстановления продуктивности добывающих и приёмистости нагнетательных скважин//«НефтеСервис», совместный проект «Технологии ТЭК» и «OFS Market reporter». – № 4. – 2008.
36. Замахеев В.С., Федорцов В.К. Практические указания испытания поисковых и разведочных скважин на нефть и газ. – ЕАГО, 1991.
37. Замахеев В.С., Поздняков А.Б., Василевский В.Л. Способ выявления участков повышенной нефтегазоотдачи продуктивного пласта. А.С. 693326, 1979.
38. Замахеев В.С., Василевский В.Л., Стажанный Я.Т., Бакин В.Е. Способ оценки продуктивности пласта. А.С. 1122032, 1980.
39. Замахеев В.С., Иванов А.Н., Кончаков В.Н. Кернадержатель для изучения процессов фильтрации в горных породах. А.С. 145 6844, 1989.
40. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. – Изд-во АН СССР, 1946.
41. Изучение влияния перфорации на колонну и цементное кольцо акустическим и радиометрическим методами/В.Д. Кучернюк, П.А. Прямов, Т.М. Семенова, Д.А. Бернштейн//Бурение, 1970. – № 10. – С. 34-37.
42. Кириллов Ф.А. Сейсмический эффект взрывов//Труды сейсмологического института. – СИАИ. – № 116. – 1946.
43. Коттрелл А. Теория дислокаций. – Мир, 1970.
44. Коул Р. Подводные взрывы. – ИИЛ, 1950.
45. Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам в скважинах, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982.
46. Ландау Л.Д. Об ударных волнах на больших расстояниях от места их возникновения. – ПММ. – Т. 9. – Вып. 4, 1945.

47. Левин Е.А., Ловля С.А. Экспериментальное исследование разрушения труб взрывом в жидкости под давлением//Докл. АН СССР. – Т. 174. – № 5. – 1967.
48. Покровский Г.И., Федоров И.С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. – М.: Госстройиздат, 1957.
49. Попов Л.К., Бойчевский В.А., Шлеин А.Т. Дефектомер для обсадных колонн//Геофизическая аппаратура, вып. 67. – Л.: Недра, 1979. – С. 146–149.
50. Промысловые исследования обсадных колонн в скважинах/М.М. Загиров, Д.А. Бернштейн, И.Г. Юсупов, Т.М. Семенова//Нефтяное хозяйство. – 1972. – № 6. – С. 52–55.
51. Садовский М.А. Сейсмический эффект взрывов//Доклад на конференции спецвзрывпрома. – СИАИ. – М.: Гостехиздат, 1939.
52. Санасарян Н.С. Влияние гидростатического давления на параметры подводного взрыва. – В кн.: Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах. – М.: Недра, 1969. – С. 70–85.
53. Санасарян Н.С. К вопросу о проникновении кумулятивной струи в преграду//Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. – 1975. – № 6. – С. 151–154.
54. Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах. – М.: Недра, 1969.
55. Термостойкость взрывчатых веществ в условиях глубоких скважин. – М.: Недра, 1981.
56. Физика быстропротекающих процессов. – Т. 1-3. – М.: Мир, 1971.
57. Финогенов И.С., Волошко Г.Н. Влияние высокой температуры и давления на изменение механических свойств при вдавливании//Труды ГрозНИИ. – 1963. – Вып. 16. – С. 67–72.
58. Фридляндер Л.Я. Вскрытие пласта кумулятивной перфорацией в условиях превышения пластового давления над забойным//Нефтяное хозяйство, 1978.
59. Шемякин Е.И., Маркова К.И. Распространение нестационарных возмущений в жидкости, находящейся в контакте с упругим полупространством. – ПММ. – Т. 21. – Вып. 1. – 1957.
60. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – М.: Судпромгиз, 1961.
61. Bell W.T., Shore J.B. Lab studies show why and how gun perforators damage casing//Oil and Gas J., 1965. – Vol. 63. – № 24. – P. 100–108.
62. Bell W.T., Brieger E.F., Harrigan J.W. Laboratory flow characteristics of gun perforations//J. Petrol. Technol., 1972. – Vol. 24. – № 9. – P. 1095–1103.

● ПРИЛОЖЕНИЕ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

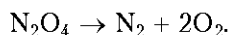
Раздел 1. Физические основы взрыва.

1.1. Общая характеристика взрывчатых веществ.

Чем отличаются бризантные вещества от инициирующих?

Что такое кислородный баланс?

Задача. Рассчитать кислородный баланс при распаде четырёхоксида азота.



1.2. Чувствительность ВВ к внешним воздействиям.

Что такое инициирующий импульс?

Определяется ли инициирующий импульс только энергией удара?

Что такое период индукции при нагревании взрывчатого вещества?

Как определить величину энергии активации?

Кривая чувствительности инициирующих веществ к удару, её смысл.

Как оценить чувствительность к удару бризантных веществ?

Задача а. Рассчитать величину максимальных напряжений, возникающих во взрывчатом веществе при ударе (на копре) бойка массой 2,5 кг, падающего с высоты 0,5 м.

Как зависит дальность передачи детонации от плотности пассивного заряда?

Что такое термическое разложение ВВ?

Задача б. Провести расчёт изменения предельной температуры применения ВВ, считая, что допустимое распавшееся количество ВВ не превысит 2 %, при увеличении времени выдержки ВВ (при предельной температуре) с 6 ч до 3-х сут. ВВ имеет следующие характеристики: энергия активации 200 кДж/моль, $\lg k_0$ (логарифм предэкспонента) равен 13 с⁻¹, универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ кДж (°K)⁻¹ кмоль⁻¹.

1.3. Элементарная теория ударных волн.

Через какие параметры можно выразить давление на фронте ударной волны?

Как записывается уравнение Гюгонио для ударной волны?

Задача. Рассчитать, во сколько раз увеличится плотность газа при сжатии его сильной ударной волной $P_2/P_1 \rightarrow \infty$. Принять $C_p/C_v = 1,4$.

Как записывается уравнение Михельсона?

Что такое точка Жуге?

Чем отличается адиабата ударной волны от адиабаты детонационной волны?

Что такое акустический парадокс?

Закон Снеллиуса для преломлённой ударной волны.

Сформулировать понятия предельного и критического диаметра ВВ.

Как повлиять на предельный и критический диаметры?

1.4. Методика экспериментального наблюдения взрывных процессов.

Метод Дотриша.

Оптические методы наблюдения быстротекущих процессов.

Как определяют скорость детонации на сверхскоростном фоторегистраторе?

Как перейти к покадровой съёмке процесса от линейной развёртки?

Раздел 2. Действие взрыва на окружающие среды.

2.1. Что такое фугасность? Методы практического определения фугасности.

2.2. Бризантность. Как её оценить?

2.3. Кумулятивный эффект.

Что такое пест?

Задача. Определить глубину пробитого канала при длине растягивающейся струи 50 см и соотношении плотностей струи и преграды 0,8.

2.5. Взрыв в воде на большой глубине.

Порядок расчёта давления в ударной волне в функции расстояния и времени.

2.6.1. Действие взрыва в воздухе.

Когда действие взрыва можно считать импульсивным и когда условным статическим действием?

Взрыв на выброс.

Последовательность расчёта воздействия сейсмозрывной волны.

Раздел 3. Преобразования ФЕС пород, вызванные бурени-

ем скважины, вторичным вскрытием стреляющими перфораторами.

Понятие дилатансии породы.

Понятие процесса облитерации.

3.2. Как проводится оценка влияния адсорбции на запасённую энергию в скелете породы?

3.4. Скин-эффект.

Какие гидродинамические исследования нужны для расчета скин-эффекта?

Раздел 4. Техника и технология вторичного вскрытия пластов стреляющими перфораторами.

4.1. Методы вскрытия объектов и пластов.

4.6. Таксономия типов перфораторов и условия их применения.

4.7. Какое необходимо оборудование для вскрытия пластов на депрессии перфораторами, спускаемыми на кабеле?

Какое необходимо дополнительное оборудование для вскрытия пластов на депрессии перфораторами, спускаемыми на насосно-компрессорных трубах?

4.8. Цель геофизического сопровождения вторичного вскрытия пластов.

Необходимый комплекс аппаратуры для геофизического сопровождения.

4.9. Распространение ударных волн в скважине.

Задача. В полностью заполненной водой скважине распространяется ударная волна экспоненциального профиля с постоянной ударной волной θ .

Определить толщину слоя жидкости, который будет выброшен из скважины.

4.11. Пороховые генераторы давления.

Устройство ПГДБК.

Основы технологии применения.

Малогабаритные пороховые генераторы давления с программируемым импульсом.

Раздел 5. Ликвидация аварий и специальные работы в скважинах.

5.1. Торпеды ТКО и совместная работа их с имплозийным ловителем. Техника и технология работ.

5.2. Способы ликвидации прихватов.

Развинчивание труб и использование номограмм для подбора торпеды. Перфорация УБТ. Применение труборезов.

Взрывные пакеры. Технология работ с взрывными заколонными пакерами.

Раздел 6. Техника безопасности при прострелочно-взрывных работах в скважине.

Каким документом регламентируются общие требования безопасности при проведении взрывных работ в РФ?

Какими видами транспорта можно перевозить ВВ от изготовителя изделий на геофизические предприятия?

Виды складов ВВ.

Какими приборами можно проверять электрическую боевую линию?

Порядок ликвидации отказов.

Порядок уничтожения отказавших ВМ.

● ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Активная часть кумулятивного заряда 73
Акустический парадокс 46
Активный заряд 28, 30, 31
Адиабаты
– Пуассона 43
– Гюгонно 43
- Баллистика
– внутренняя 80
– внешняя 81
Баллиститы 11
Бризантность взрывчатых веществ 67
- Взрыв
– камуфлетный 87
– на выброс 89
Взрывчатые вещества
– бризантные 9, 10
– инициирующие 10
– термостойкие 36
Волна разрежения 48, 61
Воронка нормального выброса 89
Воспламенение 78
Вскрытие пласта 145
- Газообразование 8
Гексоген 11
Горение 78
- Депрессия 146
Детонация 9
Детонация через влияние 27
Диаметр ВВ
– предельный 49
– критический 49
Дилатансия породы 98
- Единичная разрывная функция нулевого порядка 84
- Жуте точка 44
- Задержка вспышки 16
Зажжение 78
Закон
– Аррениуса 15
– Снеллиуса 46
Закон действия масс 34
- Копёр 20
- Кордиты 11
Коэффициент увеличения прибора 56
Кумулятивный заряд 158
Кумулятивная облицовка 73
Кумулятивные перфораторы 150
Кумулятивная струя 75
Кумулятивный фокус 72
Кумулятивный эффект 70
- Ламе упругие постоянные 91
Ловитель имплозийный 206
- Метательные взрывчатые вещества или пороха 11
Метод встряхивания 212
Метод
– Гопкинсона 61
– Дотриша 53
Методы определения температуры вспышки 18
- Облитерация 119
- Пакер взрывной 217
Пассивный заряд 28, 30, 31
Патрон взрывной 152
Передача детонации 28
Период индукции 16
Пест 75
Плотность заряжания 81
Показатель Горна 91
Пороха
– бездымные 11
– термостойкие 11
– пироксилиновые 11
Пороховой генератор давления 196
Предел чувствительности
– верхний 21
– нижний 21
Предэкспонент 36
Прихват 208
Прихватоопределитель 208
Пуассона коэффициент 96
Пулевые перфораторы 163
- Разобшение пластов 214
Растры 60
Репрессия 146
- Свинцовая бомба 66

Сенсибилизатор 25
Сила пороха 80
Скорость
– массовая 47
– детонации 9
Скоростной фоторегистратор 58
Средства взрывания 150
Стехиометрические вещества 11

Температура вспышки 19
Торпеда кумулятивная 205
Торпеды
– ТШТ 215
– ТДШ 213
Труборез кумулятивный 214
Ударная волна 37

Ударная волна экспоненциального
профиля 61
Удельная поверхность пороха 81

Физическая адсорбция 104
Флегматизация 25

Хемосорбция 105

Шнур детонирующий 154
Штемпельный приборчик 22, 27

Электродетонатор 151
Экссудация 14
Энергия активации 16

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Физические основы взрыва	7
1.1. Общая характеристика взрывчатых веществ	8
1.1.1. Явление взрыва	8
1.1.2. Классификация взрывных процессов	10
1.1.3. Классификация взрывчатых веществ	11
1.1.4. Кислородный баланс	13
1.1.5. Выводы	14
1.2. Чувствительность взрывчатых веществ к внешним воздействиям	15
1.2.1. Начальный или инициирующий импульс	15
1.2.2. Чувствительность ВВ к тепловым импульсам	17
1.2.3. Чувствительность ВВ к удару	22
1.2.4. Зависимость чувствительности ВВ от различных факторов	26
1.2.5. Передача детонации через влияние	29
1.2.6. Термическое разложение взрывчатых веществ	36
1.3. Элементарная теория ударных волн	38
1.3.1. Основные представления	38
1.3.2. Гидродинамическая теория плоской ударной волны	40
1.3.3. Гидродинамическая теория детонационной волны	45
1.3.4. Отражение от абсолютно жёсткой стенки слабых ударных волн. Акустический парадокс	47
1.3.5. Отражение и преломление слабых ударных волн	48
1.3.6. Предельный и критический диаметры ВВ	50
1.4. Методика экспериментального наблюдения взрывных процессов	53
1.4.1. Хронографические методы измерения скорости детонации	54
1.4.2. Оптические методы наблюдения быстропротекающих процессов	56
1.4.3. Определение давления и импульса ударных волн, распространяющихся в воздухе или жидкостях	62
2. Действие взрыва на окружающие среды	67
2.1. Работоспособность или фугасность ВВ	67
2.1.1. Теоретическая оценка работоспособности ВВ	67
2.1.2. Экспериментальная оценка фугасности	68
2.2. Бризантность ВВ	69
2.2.1. Теоретическая оценка бризантности	69
2.2.2. Экспериментальная оценка бризантности	70
2.3. Кумулятивный эффект	72
2.3.1. Общие представления об эффекте	72
2.3.2. Процесс формирования кумулятивной струи и её устойчивость	74
2.3.3. Проникание кумулятивной струи в однородную преграду	78
2.4. Горение порохов	79
2.4.1. Факторы, влияющие на скорость горения	80
2.4.2. Проникание пуль в преграду	82
2.5. Взрыв в воде на большой глубине	85
2.6. Разрушительное действие воздушных и подземных взрывов	88
2.6.1. Действие взрыва в воздухе	89
2.6.2. Действие подземного взрыва	90

3. Преобразования ФЕС пород, вызванные бурением скважины, вторичным вскрытием стреляющими перфораторами.....	96
3.1. Преобразование ФЕС пласта при вскрытии бурением.....	97
3.1.1. Переход породы в новое напряженно-деформированное состояние.....	97
3.1.2. Экспериментальные исследования процесса дилатансии.....	100
3.2. Преобразование ФЕС породы-коллектора, вызванное адсорбцией флюидов.....	106
3.2.1. Общие представления об адсорбции.....	106
3.2.2. Теоретическая оценка влияния адсорбции на запасенную энергию в скелете породы.....	110
3.2.3. Стендовые исследования факторов, влияющих на подвижность флюидов в пластовых условиях.....	111
3.2.4. Кольматация пород с взрывным воздействием.....	123
3.2.5. Тепломассоперенос в породах при воздействии на них взрыва.....	127
3.2.6. Анализ процессов кольматации со взрывом.....	131
3.3. Анализ термоаномалий, получаемых в скважинах после выстрела перфоратора.....	132
3.3.1. Причины термоаномалий, возникающих в скважине после вторичного вскрытия пластов стреляющими перфораторами.....	132
3.4. Оценка эффективности работ по вскрытию пласта и интенсификации притоков.....	138
4. Техника и технология вторичного вскрытия пластов стреляющими перфораторами.....	142
4.1. Вскрываемые объекты и применяемые методы.....	142
4.1.1. Основные положения.....	142
4.1.2. Задачи, которые могут быть решены с помощью перфорации в эксплуатационных, поисковых и разведочных скважинах.....	143
4.2. Классификация геолого-технических условий в скважинах.....	144
4.3. Характеристика объектов, вскрываемых перфорацией.....	146
4.4. Методы вскрытия объектов и пластов стреляющими перфораторами.....	147
4.4.1. Метод вскрытия при депрессии.....	148
4.4.2. Метод вскрытия при репрессии.....	148
4.4.3. Метод вскрытия при равновесии.....	149
4.5. Методические основы вскрытия пластов при решении задач разведки и разработки месторождений.....	149
4.5.1. Рекомендуемые методики вторичного вскрытия объектов в поисковых и разведочных скважинах.....	149
4.5.2. Методика вскрытия пласта в эксплуатационных и нагнетательных скважинах.....	151
4.6. Таксономия типов перфораторов и условия их применения.....	151
4.6.1. Средства воспламенения и взрывания.....	152
4.6.2. Типы перфораторов.....	159
4.7. Вспомогательное оборудование при взрывных работах.....	165
4.8. Геофизическое сопровождение вторичного вскрытия.....	168
4.8.1. Контроль за спуском в скважину перфоратора на кабеле.....	169
4.8.2. Привязка интервалов перфорации к геологическому разрезу.....	169
4.8.3. Определение фактического положения интервала перфорации.....	172
4.9. Воздействие взрыва на конструкцию скважины.....	174
4.9.1. Теоретические и стендовые исследования.....	174
4.9.2. Распространение ударных волн в скважине.....	186
4.9.3. Исследования в реальных скважинах.....	191
4.10. Выбор типоразмера перфоратора и технологии перфорации.....	196
4.11. Техника и технология повышения продуктивности добывающих и приемистости нагнетательных скважин.....	198
5. Ликвидация аварий и специальные работы в скважинах.....	205
5.1. Применение взрыва для ликвидации осложнений и аварий при бурении.....	205

5.1.1. Торпеды кумулятивные осевые (ТКО).....	205
5.1.2. Борьба с прихватами бурильного инструмента в скважинах.....	209
5.2. Разобшение пластов и изоляционные работы с использованием взрывных устройств	216
5.2.1. Повышение качества изоляции в затрубье.....	216
6. Техника безопасности при прострелочно-взрывных работах в сква- жинах.....	221
6.1. Общие вопросы безопасности.....	221
6.2. Хранение и учет взрывчатых материалов (ВМ).....	224
6.3. Расчет безопасных расстояний.....	226
6.4. Контроль за состоянием ВМ.....	226
6.5. Отказы и их ликвидация при прострелочных и взрывных работах в скважинах.....	228
6.6. Перевозка ВМ.....	229
6.7. Обеспечение пожаробезопасности складов	231
6.8. Травматизм, связанный с использованием ВМ.....	231
6.9. Аварийность при взрывных работах на скважинах.....	233
6.10. Оформление прострелочно-взрывных работ.....	234
Список литературы.....	236
Приложение. Контрольные вопросы и задачи.....	239
Предметный указатель	243

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Замахаяев Виктор Сергеевич
Мартынов Виктор Георгиевич

ВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ В СКВАЖИНАХ

Редактор издательства *Т.К. Рубинская*
Технический редактор *Г.В. Лехова*
Корректор *Е.М. Федорова*
Компьютерная верстка *Л.П. Ушанкина, Ю.А. Титова*

Подписано в печать . Формат 60×90 ¹/₁₆. Гарнитура «Петербург». Печать
офсетная. Печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 16,5. Тираж экз. Заказ

Оригинал-макет издания подготовлен ООО «Издательский дом Недра»

125047, Москва, пл. Тверская застава, 3
E-mail: biblioteka@nedrainform.ru

ISBN 978-5-8365-0366-6

