

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

**Оптимизация в геологоразведочном производстве**

Учебно-методическое пособие  
для практических занятий

*Электронное издание*

Красноярск  
СФУ  
2013

УДК 622.24(07)

ББК 33-1я73

О-627

Рецензент: кандидат технических наук, доцент А.Л.Неверов

Составитель: Нескоромных Вячеслав Васильевич

**О-627 Оптимизация** в геологоразведочном производстве: учеб.-метод. пособие для практических занятий [Электронный ресурс] / сост. В. В. Нескоромных. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – Систем. требования: РС не ниже класса Pentium I; 128 Mb RAM; Windows 98/XP/7; Adobe Reader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.

*Приведено основное содержание дисциплины в виде проектно-расчетных и работ с основами теории; учебно-методический материал; литературные источники для их выполнения.*

*Учебно-методическое пособие предназначено для студентов по направлению подготовки (специальности) 130102 «Технология геологической разведки», специализация 130102.65.03 «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых».*

УДК 622.24(07)

ББК 33-1я73

© Сибирский  
федеральный  
университет, 2013

Электронное учебное издание

Подготовлено к публикации ИЦ БИК СФУ

Подписано в свет 1.11.2013 г. Заказ 3271.  
Тиражируется на машиночитаемых носителях.

Издательский центр  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391)206-21-49. E-mail [rio@sfu-kras.ru](mailto:rio@sfu-kras.ru)  
<http://rio.sfu-kras.ru>

## Практическая работа № 1

### Преобразование опытных данных (графических и табличных) в данные в соответствии с планом полного факторного эксперимента для их обработки и построения моделей

Объем работы – 2 ч.

**Цель работы:** Получить навыки обработки данных, представленных в виде графиков и таблиц в данные приемлемые для их обработки методами планирования экспериментальных работ и поиска оптимальных условий.

Используя данные, представленные в виде графиков на рис. 1.21 и 1.22 учебного пособия [1] по дисциплине «Оптимизация в геологоразведочном производстве», провести их конвертацию в данные, приемлемые для обработки по методу планирования экспериментальных работ – полный факторный эксперимент.

Факторный эксперимент считается полным, если в нем учтены все возможные комбинации на двух или трех уровнях [1,2]. *Уровнями* называются некоторые количественные или качественные соотношения фактора. Общее число опытов при реализации всех комбинаций факторов выражается следующей зависимостью:

$$N = 2^k, \quad (1)$$

где  $k$  – число рассматриваемых факторов.

Под факторами, применительно к буровому процессу, понимают те или иные параметры влияющие на результативность процесса. Например, это могут параметры режима бурения, такие как осевая нагрузка, частота вращения, количество промывочной жидкости при опытном исследовании влияния этих факторов на механическую скорость бурения.

Составляется план экспериментальных работ в виде табл. 1, в котором указываются факторы, уровни варьирования факторами и очередность опытов.

Рассмотрим решение на примере обработки данных по механической скорости бурения.

В качестве факторов выбраны осевое усилие  $P_{oc}$  и частота вращения  $\omega$ . Поскольку выделено два влияющих фактора, значит, для получения результата нужно провести 4 опыта (см. формулу(1)).

На первом этапе обработки данных необходимо определить максимальные и минимальные значения факторов, которые будут преобразованы в закодированные значения – минимальные -1, максимальные в +1.

Для решения задачи определения верхнего и нижнего уровня и интервала варьирования факторами рассмотрим следующий пример из учебного пособия (пример 3 из 6 главы) [1].

Таблица 1

План экспериментальных работ бурения алмазной коронкой

Номер опыта	Значения факторов в кодовых обозначениях				Интервалы варьирования и уровень факторов	Осевая нагрузка, кН	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
	$V_0$	$P_{oc}$	$\omega$	$P_{oc} \cdot \omega$			
1	+	+	+	+	Основной уровень		
2	+	+	-	-	Интервал варьирования		
3	+	-	-	+	Нижний уровень – (-1)		
4	+	-	-	+	Верхний уровень – (+1)		
					Кодовое обозначение	$P_{oc}$	$\omega$

**Пример.** Ставится эксперимент по исследованию влияния добавок полиактиламида на вязкость бурового раствора. Для исследования выбираются возможные значения добавок полиакриламида в пределах от 0,01% до 0,2% от объема бурового раствора. Таким образом, факторное пространство в данном случае ограничено пределом 0,01-0,2%. Поэтому значению 0,01% будет соответствовать число в закодированном выражении равное -1, а значению 0,2% +1, нулевое значение будет равно  $(0,01\%+0,2\%)/2 = 0,105\%$ . Интервал варьирования фактором  $\varepsilon$  будет равен, например,  $\Delta C = (0,2\%-0,105\%)=0,095\%$ .

По формуле (6.2) определим значения факторов в закодированном выражении. Например, дозировка реагента равна 0,15%. По формуле определяем кодированное значение, которое составит:  $(0,15\%-0,105\%)/0,095\%=0,47$ . Если содержание полиакриламида равно 0,05%, то в закодированном выражении это будет равно:  $(0,05-0,105\%)/0,095=-0,58$ .

В качестве отклика (значения, получаемые в результате действия факторов) будут фиксироваться значения механической скорости бурения –  $v_m$  (рис.1.21, а, б из учебного пособия [1]) однослойной и импрегнированной алмазными коронками, затраты мощности на бурение  $N_6$  (рис.1.22, а, б из учебного пособия [1]) и соотношение  $\frac{N_6}{v_6}$ .

Последний отклик может быть получен путем деления соответствующих откликов, полученных с графиков на рис.1.21 и 1.22 из учебного пособия [1].

## План и результаты экспериментальных работ

Номер опыта	Значения факторов в кодовых обозначениях				Значения откликов		
	$V_0$	$P_{oc}$	$\omega$	$P_{oc} \omega$	$v_m$ , см/мин	$N_b$ , кВт	$\frac{N_b}{v_b}$ , кВт·мин/см
1	+	+	+	+			
2	+	+	-	-			
3	+	-	-	+			
4	+	-	-	+			

Для записи полученных в процессе эксперимента данных, готовится таблица 2, в которую в процессе эксперимента записываются отклики – значения механической скорости бурения  $v_m$ , затраты мощности на бурение  $N_b$  и энергоёмкость бурения  $\frac{N_b}{v_b}$ .

### Практическая работа № 2

#### Методика определения оптимальных параметров режима и условий бурения скважин

Объем работы – 2 ч.

**Цель работы:** Изучить методику определения оптимальных параметров режима бурения алмазным инструментом и рассчитать прогнозируемый ресурс алмазной коронки.

Рассматриваемая методика предполагает выполнение следующих действий:

1. Определяют оптимальные значения параметров режима бурения по критерию  $v_m \rightarrow \max$  в пределах заданных величин.

2. Вычисляют оптимальные значения механических скоростей и параметров режима бурения по критерию  $\frac{N_b}{v_m} \Rightarrow \min$ . При этом полагаем, что выбранные значения механических скоростей и параметры режима бурения позволят обеспечить максимальный или близкий к нему ресурс бурового инструмента.

3. Результаты анализа по критериям  $v_m \rightarrow \max$  и  $\frac{N_b}{v_m} \Rightarrow \min$  сравнивают и определяют прогнозируемый ресурс коронки в соответствии с указанными

критериями, а также со значением расхода алмазов для конкретных условий бурения. Во-первых, определяется ожидаемый ресурс алмазной коронки (соответствует выбору по критерию  $\frac{N_{\delta}}{v_m} \Rightarrow \min$ ); во-вторых, прогнозируют ресурс коронки, который можно получить, применяя форсированные режимы бурения, выбранные по критерию  $v_m \rightarrow \max$ , и, соответственно, высокую механическую скорость бурения, но несколько пониженный ресурс коронки.

Например, известно, что расход алмазов без учета рекуперации зависит от физико-механических свойств горных пород, качества и количества алмазов в коронке, эксплуатационных характеристик коронки и качества её изготовления. Можно придерживаться следующих значений расхода алмазов, (кар./м) в зависимости от категории горных пород по буримости:

VI	VII	VIII	IX	X	XI, XII
0,1–0,15	0,15–0,3	0,3–0,4	0,4–0,65	0,65–0,8	0,8–1,2

При бурении трещиноватых пород расход алмазов может возрасти на 30–50 %.

Таким образом, имея значение массы алмазов, размещенных в коронке  $G$ , и принимая величину предполагаемого расхода алмазов  $q$ , можно определить прогнозируемую проходку на коронку при соответствии параметров режима бурения критерию  $\frac{N_{\delta}}{v_m} \Rightarrow \min : L = \frac{G}{q}$ .

**Пример.** Категория горных пород по буримости X, породы трещиноватые, следовательно,  $q = 0,7 \cdot 1,5 = 1,05$  карат/м. Если коронка имеет массу алмазов 20 кар., то прогнозируемый ресурс коронки составит:  $20 \text{ кар.} / 1,05 \text{ кар./м} = 19 \text{ м}$ .

4. В дальнейшем, используя одну из формул для расчета стоимости бурения 1 м скважины, и полученные в соответствии с критериями оптимизации  $v_m \rightarrow \max$  и  $\frac{N_{\delta}}{v_m}$  значения оптимальных механических скоростей и ресурса коронки, а также другие данные для расчета, производится определение стоимости 1 м скважины, а по минимуму этой величины выясняется, какие параметры процесса бурения скважины будут более оптимальными.

#### ***Стоимость одного метра бурения скважины.***

Использование стоимостных критериев представляется наиболее желательным при оптимизации процесса бурения, поскольку эти критерии наиболее полно отражают производственный процесс.

Экономическая оценка эффективности бурения оценивается стоимостью одного метра пробуренной скважины. Этот критерий является и интегральным, объединяющим как технические, так и стоимостные критерии, и в то же время локальным, так как отражает только часть затрат на проходку скважины в определенном интервале горных пород, определенным типом инструмента, при определенных параметрах режима бурения.

Зависимость общего вида для расчета стоимости бурения одного метра скважины  $C_m$  имеет следующий вид:

$$C_m = \frac{C_{cm}}{T} \left( \frac{1}{v_m} + \frac{T - T_{\sigma}}{l_p} \right) + \frac{Ц}{L}, \quad (2)$$

где  $C_{cm}$  – стоимость станко-смены, руб.;

$T$  – длительность станко-смены, ч;

$v_m$  – механическая скорость бурения, м/ч;

$T_{\sigma}$  – время, затраченное непосредственно на углубление ствола скважины, ч;

$l_p$  – длина рейсовой проходки, м;

$Ц$  – стоимость бурового инструмента, руб.;

$L$  – проходка буровым инструментом (ресурс инструмента), м.

При построении экономико-технологической модели процесса разведочного бурения функция цели должна формулироваться как нахождение минимальной стоимости одного метра скважины, т. е.  $C_m \rightarrow \min$ .

При бурении снарядом без съёмного кернаприемника требуется подъем всей бурильной колонны из скважины для извлечения керна, что еще более снижает долю времени  $T_{\sigma}$ . В этом случае разность  $(T - T_{\sigma})$  в формуле (2) следует представить в виде суммы затрат времени на проведение спуско-подъемной операции при определенной глубине скважины  $H - t_1$  и затрат времени на замену изношенной буровой коронки и извлечение керна, отнесенных к одному метру бурения –  $t_2$ . Время  $t_1$  зависит от глубины скважины  $H$  и среднего времени спуска-подъема 1 м бурильной колонны  $K$  и может, таким образом, определяться из выражения  $t_1 = (2 \cdot H \cdot K)$ .

С учетом полученного выражения, формула (2) для случая колонкового бурения без съёмного кернаприемника примет следующий вид:

$$C_m = \frac{C_{cm}}{T} \left( \frac{1}{v_m} + \frac{2HK + t_2}{l_p} \right) + \frac{Ц}{L}. \quad (3)$$

При колонковом бурении ССК при реализации рейса требуется выполнять подъем и последующий спуск кернаприемника для извлечения керна. Операции подъема кернаприемника с керном и спуска порожнего кернаприемника в колонну составляют цикл бурения ССК, тогда как рейсовая проходка – интервал бурения от спуска до подъема всей бурильной колонны из скважины для извлечения керна и (или) замены изношенного бурового инструмента. Таким образом, необходимость реализации рейса является неотъемлемой частью любого бурового процесса независимо от глубины скважины и других условий, а для завершения проходки скважины нужно сделать, по крайней мере, один полный рейс, тогда как цикл может выполняться только при использовании в бурении скважин комплексов ССК.

**Рейсовая проходка** – углубка скважины на интервале от спуска бурильной колонны в скважину до подъема колонны из скважины в связи с необходимостью извлечения керна из колонковой трубы или замены изношенного бурового инструмента.

**Проходка за цикл** – углубка скважины при бурении ССК на интервале от спуска керноприемника в скважину до извлечения заполненного керном керноприемника из скважины.

Время на спуск-подъем керноприемника  $t_3$  можно определить по формуле  $t_3 = 2C \cdot H + t_4$ , где  $C$  – время на спуск-подъем одного метра троса с керноприемником, ч/м;

$t_4$  – время на извлечение керна и смену керноприемника, ч.

С учетом затрат времени на спуск-подъем керноприемника формула (2) для расчета стоимости одного метра бурения ССК будет выглядеть следующим образом:

$$C_{.m} = \frac{C_{cm}}{T} \left( \frac{1}{v_{.m}} + \frac{2HK + t_2}{l_p} + \frac{2C \times H + t_4}{l_y} \right) + \frac{Ц}{L}, \quad (4)$$

где  $l_y$  – проходка за цикл, м.

При бескерновом бурении длина рейсовой проходки равна общей проходке буровым инструментом, а, учитывая, что отбор керна не производится, зависимость (2) можно представить в виде

$$C_{.m} = \frac{C_{cm}}{T} \left( \frac{1}{v_{.m}} + \frac{2KH + t_2}{L} \right) + \frac{Ц}{L}. \quad (5)$$

Из зависимостей (2)–(5) следует, что стоимость метра бурения определяется такими параметрами, как механическая скорость бурения, стоимость бурового инструмента и его ресурс, затраты времени на вспомогательные операции. Для снижения стоимости метра скважины следует повышать механическую скорость бурения, рейсовую проходку и проходку за цикл и время бурения, сокращая затраты производительного времени на вспомогательные операции. Существенно влияют на стоимость метра затраты на буровой инструмент.

При бурении ССК в случае если используются достаточно стойкие коронки, за счет применения съемного керноприемника при бурении на глубину 1 500 м доля времени чистого бурения составляет 70–75 %, в отличие от бурения «классического», при котором эта доля может быть не более 40–50 %.

В случае, если проходка на коронку при бурении ССК составляет 30 м, а длина керноприемника 2 м, то при равных значениях механических скоростей бурения применение ССК будет экономически выгодно даже при

незначительной глубине скважины, при условии, что стоимость породоразрушающего инструмента будет оптимальной.

Анализ формул для расчета стоимости бурения показывает, что огромное значение имеет стоимость породоразрушающего инструмента. При этом важно соответствие стоимости станко-смены и стоимости инструмента. Так например, если стоимость станко-смены невелика, то использование дорогостоящего бурового инструмента начинает составлять основную часть затрат, следовательно, использование такого инструмента не целесообразно. Такая ситуация возможна в том случае, если на недорогом отечественном оборудовании при малой доле затрат на заработную плату будут использоваться алмазные коронки зарубежных компаний, стоимость которых может составлять 300–800 дол. США. В этом случае составляющая затрат на инструмент будет значительно превышать остальные затраты, что скажется на рентабельности.

**Пример.** При бурении на месторождении используются двухшарошечные долота типа ДДА-59 и трехшарошечные долота типа ЗШ-59К-ЦА. При равной стоимости 3000 руб. за долото они показывают различную механическую скорость – 12 и 9 м/ч и ресурс – 9 и 12 м соответственно. Стоимость станко-смены продолжительностью 8 ч – 32 000 руб. Время бурения в общем балансе затрат времени на производство работ – 50 %.

Рассчитаем стоимость одного метра бурения скважины долотом ДДА-59:

$$C_{.м} = \frac{32000}{8} \left( \frac{1}{12} + \frac{8-4}{9} \right) + \frac{3000}{9} = 2\,525 \text{ руб.}$$

Аналогично вычислим стоимость метра бурения трехшарошечными долотами. В этом случае стоимость метра бурения составит 2 010 руб.

Для повышения эффективности бурения долотами ДДА произведена их модернизация путем размещения двух гидромониторных насадок (работы выполнены Иркутским отделением ВИТР). Стоимость долот, получивших обозначение ДДА-С, повысилась до 3 500 руб. Испытания показали рост механической скорости на 20 % (14 м/ч) и проходки на долото на 40 % (12 м).

Стоимость метра бурения долотом ДДА-С составила 1 897 руб., что подтвердило эффективность модернизации долот ДДА-С в сравнении со стандартным инструментом.

**Пример.** При бурении на месторождении применяют ССК-76. Длина керноприемника равна 4,5 м, что ограничивает значение проходки за цикл  $l_{ц} = 4,5$  м. При бурении ССК ресурс буровой коронки  $L = 50$  м, ее стоимость  $Ц = 5\,000$  руб.,  $l_p = L$ . Механическая скорость бурения 4,5 м/ч. При стоимости станко-смены 32 000 руб., длительности смены 8 ч, глубине скважины  $H = 1\,000$  м, времени  $C = 0,2 \cdot 10^{-3}$  ч/м,  $K = 2 \cdot 10^{-3}$  ч/м,  $t_2 = 0,2$  ч,  $t_4 = 0$  (применение второго керноприемника), стоимость 1 м скважины будет равна

$$C_{.м} = \frac{32000}{8} \left( \frac{1}{4,5} + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,2}{50} + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} + 0}{4,5} \right) + \frac{5000}{50} = 1\,672 \text{руб.}$$

Ограничение длины рейсовой проходки до 2,5 м в связи с заклиниванием и истиранием керна при бурении трещиноватых пород привело к повышению непроизводительных затрат, ресурса инструмента до 40 м и механической скорости бурения до 4 м/ч, что следующим образом отразилось на повышении стоимости метра:

$$C_{.м} = \frac{32000}{8} \left( \frac{1}{4,0} + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,2}{40} + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} + 0}{2,5} \right) + \frac{5000}{40} = 2\,185 \text{руб.}$$

Таким образом, влияние рейсовой проходки и ресурса бурового инструмента наиболее значительны при формировании затрат на бурение.

При бурении скважины буровым снарядом без съемного керноприемника произойдет рост затрат времени на проведение спуско-подъемных операций и снижение доли времени на углубку скважины  $T_6$ .

При бурении неглубоких скважин (до 200–250 м), при прочих равных условиях, в сравнении с КССК или ССК, это не приведет к значительному росту стоимости метра бурения, но может отразиться на качестве керна и, соответственно, на стоимости бурения, если, например, для повышения сохранности керна при бурении потребуется несколько ограничить длину рейсовой проходки.

При проходке более глубоких скважин (более 250–300 м) затраты на бурение снарядом со съемным керноприемником будут значительно ниже даже при большей длине керноприемной части одинарного колонкового набора без керноприемника. Например, при длине колонковой трубы 6 м и остальных условиях расчета, принятых выше для случая бурения КССК, расчет по формуле (3) показывает, что стоимость 1 м бурения будет равна

$$C_{.м} = \frac{32000}{8} \left( \frac{1}{4,5} + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,2}{6} \right) + \frac{5000}{50} = 3\,780 \text{руб.}$$

Если для повышения сохранности керна в колонковой трубе потребуется ограничить длину рейсовой проходки, это приведет к еще более значительному росту стоимости метра бурения. Например, если длина рейсовой проходки будет равна рейсу при бурении КССК – 4,5 м, то стоимость одного метра бурения составит

$$C_{.м} = \frac{32000}{8} \left( \frac{1}{4,5} + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,2}{4,5} \right) + \frac{5000}{50} = 4\,700 \text{руб.}$$

При последних расчетах не учтено то обстоятельство, что при проведении спуско-подъемных операций, особенно в наклонных и искривленных скважинах, снижается ресурс бурового снаряда и дорогостоящего бурового инструмента вследствие изнашивания о стенки скважины при подъеме и спуске.

Опыт буровых работ показывает, что изнашивание буровых коронок и долот, расширителей, калибраторов в процессе спуска-подъема в глубоких скважинах может быть очень велико и снижает ресурс инструмента до 10 %.

Другим важным обстоятельством, повышающим эффект от применения снарядов со съемным керноприемником, является то, что при спуско-подъемных операциях перепады давления промывочной жидкости, вызванные перемещением снаряда, вызывают разрушение стенок скважины и их обваливание, соответственно, сокращение спуско-подъемных операций способствует сохранению ствола скважины без каких либо дополнительных технологических операций. По этим причинам расчетная стоимость метра бурения снарядом без съемного керноприемника может быть еще выше.

Оптимизацию стоимости всей скважины на основе расчета стоимостного критерия  $C_m$  можно осуществить, разбив скважину по интервалам глубин и оптимизировав параметр  $C_m$  для каждого интервала, а затем, рассчитав стоимость бурения каждого интервала и приняв параметр  $C_m$  как среднее, после чего произвести суммирование затрат на бурение различных интервалов ствола скважины. При этом, чем точнее и детальнее будут выделены интервалы ствола скважины, тем более точным будет конечный результат.

### Практическая работа № 3

#### Расчет стоимости одного метра бурения скважины с учетом затрат на обеспечение проектного направления скважины

Объем работы – 2 ч.

**Цель работы:** Изучить методику расчета стоимости метра бурения скважины с учетом затрат на направленное бурение.

Оптимизация технологии направленного бурения может осуществляться расчетом стоимости 1 м скважины, пробуренной с использованием тех или иных технических средств и технологий.

Стоимость метра без учета затрат на направленное бурение, компоновки и истирающие материалы  $C_m$  определяется по зависимости (2).

Учитывая, что в общем виде  $C_m$  можно вычислить по формуле:

$$C_m = \frac{C_{ст}}{П}, \quad (6)$$

где  $\Pi$  – производительность бурения за одну станко-смену, м, рассчитаем

$$\Pi = \frac{T(1 - K_{TO})}{\left( \frac{1}{v_m} + \frac{T_{СПО} + T_{ПН} + T_{ВС}}{l_p} \right)}, \quad (7)$$

где  $T$  – длительность станко-смены, ч;

$K_{TO}$  – коэффициент, учитывающий затраты времени на техническое обслуживание бурового оборудования;

$v_m$  – механическая скорость бурения, м/ч;

$T_{СПО}$  – время на проведение спуско-подъемных операций, кратное одному рейсу, ч;

$T_{ПН}$  – время на перекрепление шпинделя (для станков со шпиндельным вращателем) и наращивание бурильной колонны, кратных одному рейсу, ч;

$T_{ВС}$  – время на вспомогательные операции и специальные работы, связанные со спецификой применяемой технологии направленного бурения, кратных одному рейсу, ч.

$l_p$  – рейсовая проходка, м.

Представим стоимость метра скважины с учетом затрат на направленное бурение, истирающие материалы и компоновки в следующем виде:

$$C_H = \frac{C_{СТ} + C_O \pm C_{И} + C_e + C_y}{\Pi - \Delta\Pi_O}, \quad (8)$$

где  $C_O$  – затраты на постановку отклонителей, отнесенные к затратам на одну станко-смену, руб.;

$C_{И}$  – затраты на истираемые материалы и компоновки, отнесенные к затратам на одну станко-смену, руб.;

$C_e$  – затраты на разработку методики учета закономерностей естественного искривления, отнесенные к затратам на одну станко-смену, руб.;

$C_y$  – затраты на бурение интервалов увеличения или уменьшения длины стволов скважин, вследствие их заложения с упреждением по типовым кривым, отнесенные к затратам на одну станко-смену, руб.;

$\Delta\Pi_O$  – потери производительности, связанные с направленным бурением за одну станко-смену, м.

Затраты  $C_O$  определим по зависимости:

$$C_O = N_O(A_1 + A_2 + A_3 + A_4), \quad (9)$$

где  $N_O$  – число постановок отклонителей, отнесенное к одной станко-смене;

$A_1, A_2, A_3, A_4$  – затраты, соответственно, на цикл искусственного искривления при наборе кривизны по количеству станко-смен, на амортизацию технических средств и аварийные работы, вызванные резкими изменениями угловых параметров скважины, поломками отклонителей, руб.

Число необходимых постановок отклонителей определим с учетом следующих параметров:

$$N_o = \frac{(i_e - i_d) \Pi (1 - P_e)}{\delta K_c K_m}, \quad (10)$$

где  $i_e$  – интенсивность естественного искривления скважины, град/м;

$i_d$  – допустимая интенсивность искривления, определяемая из возможного предельного отклонения забоя скважины, град/м;

$P_e$  – достоверность полученной типовой кривой, доли ед.;

$\delta$  – угол набора кривизны за цикл искусственного искривления, град.;

$K_c$  – коэффициент снижения интенсивности естественного искривления при использовании компоновки или технологии в сравнении с базовыми условиями;

$K_m$  – коэффициент точности искусственного искривления, доли ед.

Допустимая интенсивность искривления  $i_d$ , определяемая исходя из области допустимых значений отклонений забоя скважины (рис. 1), может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$i_d = \frac{\operatorname{arctg} \frac{A}{L_{\text{скв}}}}{L_{\text{скв}}}, \quad (11)$$

если расчет производится на всю глубину скважины  $L_{\text{скв}}$ , или по зависимости

$$i_d = \frac{\operatorname{arctg} \frac{A}{L_1}}{L_1}, \quad (12)$$

если расчет производится для интервала глубины скважины  $L_1$ .

Как следует из приведенных зависимостей (11), (12), с уменьшением интервала глубины скважины допустимое значение  $i_d$  увеличивается, поэтому, число необходимых постановок отклонителя для выполнения геологического задания будет ниже.

При расчете по формуле (10) следует принимать разность  $(i_e - i_d) = 1$ , если  $i_d \geq i_e$ .

Приведенная схема (рис. 1) и расчеты (зависимости (6), (12)) соответствуют варианту бурения наклонной скважины в условиях

естественного искривления. Другие варианты направленного бурения и расчет необходимого числа постановок отклонителей могут производиться иначе, например, без учета интенсивности естественного искривления. В этом случае число постановок отклонителя для бурения криволинейного интервала можно определить через соотношение

$$N_0 = \frac{\Sigma\delta}{l_p i}, \quad (13)$$

где  $\Sigma\delta$  – угол набора кривизны при бурении интервала скважины, град.;

$l_p$  – углубка с набором кривизны за один цикл искусственного искривления, м;

$i$  – интенсивность искривления отклонителем, град./м.

При определении затрат  $A_1$  исходим из того, что одновременно с набором кривизны происходит и углубка скважины:

$$A_1 = \frac{C_{CT}}{T} \left( T_{Ц} - \frac{l_{Ц}}{v_m} \right), \quad (14)$$

где  $T_{Ц}$  – продолжительность цикла искусственного искривления, ч;

$l_{Ц}$  – углубка скважины за цикл искусственного искривления, м.

Стоимость амортизации специальных технических средств, требуемых при искусственном искривлении, выражается формулой

$$A_2 = \frac{Ц_О t_О}{R_О} + \frac{Ц_К t_К}{R_К} + \frac{Ц_Р t_Р}{R_Р} + \frac{Ц_Н t_Н}{R_Н} + \frac{Ц_И t_И}{R_И}, \quad (15)$$

где  $Ц_О, Ц_К, Ц_Р, Ц_Н, Ц_И$  – соответственно стоимость отклонителя, снаряда для проработки искривления, ориентатора, породоразрушающих инструментов для реализации искусственного искривления и бурения без искривления интервала углубки за цикл, руб.;

$t_О, t_К, t_Р, t_Н, t_И$  – время работы вышеуказанных технических средств и инструментов за цикл искривления, ч;

$R_О, R_К, R_Р, R_Н, R_И$  – ресурс вышеуказанных технических средств и инструментов, ч.

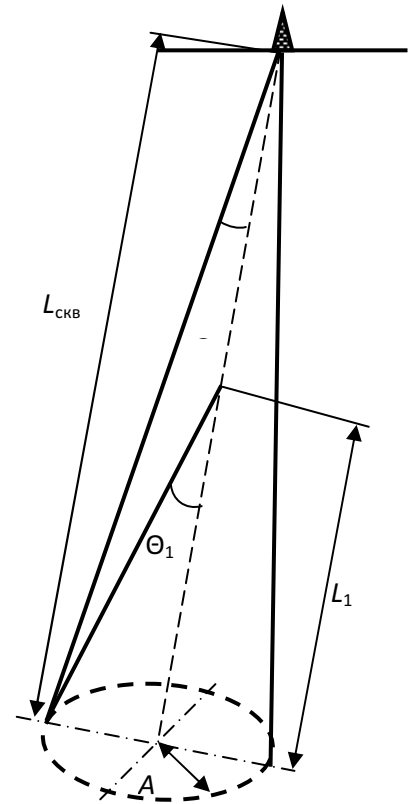


Рис. 1. Схема для расчета варианта допустимых отклонений забоя скважины

Составляющую затрат  $A_3$  определим из формулы:

$$A_3 = \frac{C_{CT} \cdot t_{л} \cdot k \cdot n_c \cdot N_o \cdot l_{II}}{T \cdot 100}, \quad (16)$$

где  $t_{л}$  – среднее время ликвидации обрыва, ч;

$k$  – коэффициент, учитывающий рост числа обрывов на 100 м бурения с искусственным искривлением по сравнению с бурением без искривления;

$n_c$  – среднестатистическое число обрывов бурильных труб при бурении без искривления на 100 м.

Затраты на ликвидацию аварий с отклонителями можно рассчитать при помощи коэффициента безаварийности  $K_B$ . Исходя из вероятности поломки отклонителя и затрат времени на ликвидацию аварии  $t_a$ , получим

$$A_4 = \frac{C_{CT} \cdot N_o \cdot t_a (1 - K_B)}{T}. \quad (17)$$

Стоимость породоразрушающих инструментов и компоновок определим из соотношения стоимости и ресурса новых и базовых технических средств и инструментов, отнесенных к производительности:

$$C_{II} = \Pi \left( \frac{Ц_{II}^H}{L_{II}^H} - \frac{Ц_{II}^B}{L_{II}^B} \right) + \left( \frac{Ц_R^H}{L_R^H} - \frac{Ц_R^B}{L_R^B} \right), \quad (18)$$

где  $Ц_{II}^H, Ц_{II}^B, Ц_K^H, Ц_K^B$  – соответственно, стоимость новых и базовых породоразрушающего инструмента и буровой компоновки, руб.;

$L_{II}^H, L_{II}^B, L_K^H, L_K^B$  – ресурс новых и базовых породоразрушающего инструмента и буровой компоновки, м.

Затраты на разработку методики учета закономерностей естественного искривления, отнесенные к одной станко-смене, получим по зависимости:

$$C_e = \frac{D_e \Pi}{S_e}, \quad (19)$$

где  $D_e$  – затраты на разработку методики по учету закономерностей естественного искривления и расчет «типовой» кривой, руб.;

$S_e$  – объем бурения, выполненный при использовании «типовой» кривой, разработанной на соответствующие затраты, м.

При заложении скважины с упреждением по «типовым» кривым, как правило, наблюдается удлинение стволов скважин против проектных значений. Затраты на бурение таких интервалов определяются по формуле:

$$C_y = \frac{C(L_\phi - L_{np})}{\Pi}, \quad (20)$$

где  $L_\phi$  и  $L_{np}$  – фактический и проектный объемы бурения для решения геологической задачи, м.

Потери производительности  $\Delta\Pi_o$ , вследствие выполнения работ по направленному бурению, рассчитывают по зависимости:

$$\Delta\Pi_o = N_o \left( \frac{T_{ц} + T_{и}}{\frac{1}{v_m} + \frac{T_{СПО} + T_{ПН} + T_{ВС}}{l_p}} - l_{ц} \right), \quad (21)$$

где  $T_{и}$  – время на проведение инклинометрии, ч.

С учетом зависимости (21) производительность буровых работ с применением каких-либо технологий направленного бурения можно определить из формулы:

$$\Pi - \Delta\Pi_o = \frac{T_c(1 - K_{ТО}) - (T_{ц} + T_{и})N_o}{\frac{1}{v_m} + \frac{T_{СПО} + T_{ПН} + T_{ВС}}{l_p}} + l_{ц}N_o. \quad (22)$$

Зависимости (10)–(20), при включении их в формулу (22) дают возможность рассчитать стоимость метра для любого способа бурения с применением различных технологий и технических средств направленного бурения. Для оценки эффективности двух или более различных технологий, методов и технических средств направленного бурения необходимо провести расчеты по зависимости (22) для каждого из рассматриваемых случаев, а наиболее эффективную технологию или техническое средство выявить по минимуму величины  $C_H$ .

Как следует из анализа зависимости (22), наполненной входящими параметрами, глубокий минимум значения  $C_H$  возможен при выполнении следующих условий:

- бурение скважин по «типовым» кривым, полученным с максимальной возможной достоверностью и наибольшим распространением по объему бурения;

- использование для проходки скважин компоновок, обладающих высокой стабилизирующей способностью при минимальной их стоимости и максимальном ресурсе, а также повышающих основные показатели бурения – механическую скорость и рейсовую проходку;

- использование для искусственного искривления недорогих технических средств и инструментов, способных реализовать кривизну ствола с высокой точностью, степенью надежности и в минимальные сроки;

– применение новых методов управления направлением и кривизной скважин непосредственно в процессе бурения, например, за счет ориентируемого направленного дополнительного породоразрушающего воздействия на забой и (или) стенку скважины.

Приведенные условия получения минимума  $C_H$  являются интегральными, так как включают сумму разнообразных параметров и факторов, и в целом отражают все основные тенденции совершенствования технологий и технических средств направленного бурения, и позволяют оценить их эффективность в стоимостном выражении.

Сравнительная оценка технологий и методов направленного бурения показывает, что экономически невыгодно для проведения скважин по заданным трассам применение только отклонителей. Тем более невыгодно, чем выше производительность буровых работ и интенсивность естественного искривления. В такой ситуации резко снижается эффективность современных высокоскоростных технологий бурения. При этом наглядно проявляется экономичность технологических методов управления процессом естественного искривления скважин. Очевидно, что оптимальным будет решение, при котором активно используются методы снижения интенсивности и учет закономерностей естественного искривления при различных способах и технологиях бурения в сочетании с методами искусственной корректировки направления скважин. Причем первые призваны существенно или в основном снизить искривление скважин, а вторые – гарантированно обеспечить подсечение залежей полезных ископаемых и других геологических структур в заданных точках, в том числе при бурении многоствольных скважин.

Стоимости метра бурения с применением средств и технологий направленного бурения  $C_H$  и без применения технологий и средств направленного бурения  $C_{Об}$  могут рассчитываться по приведенной выше методике.

**Пример.** Рассчитать стоимость метра скважины, пробуренной в условиях естественного искривления с использованием технических средств направленного бурения.

По формуле (7) определим производительность за 8-часовую смену при средней механической скорости бурения 3 м/ч и рейсовой проходке 6 м:

$$П = \frac{8(1 - 0,02)}{\left(\frac{1}{3} + \frac{3 + 0,5 + 0,5}{6}\right)} = 6,76 \text{ м/смену.}$$

При скорости 5 и 7 м/ч производительность составит 9,05 и 9,68 м соответственно.

Для определения затрат на направленное бурение найдем число необходимых постановок отклонителя в расчете на одну станко-смену при проходке скважины глубиной 700 м по заданной траектории (формула (10)).

С этой целью рассчитываем  $i_d$  при  $A = 5$  м по формуле (12):

$$i_d = (\arctg 5/800)/800 = 0,0004 \text{ град./м.}$$

Интенсивность естественного искривления составляет 0,03 град./м,  $K_c = 1$  (компоновки, снижающие искривление не используются), а коэффициент точности искривления  $K_m = 0,8$ . Угол набора кривизны за одну постановку отклонителя  $\delta = 3^\circ$ , «типовая» кривая при проектировании скважин не используется, поэтому  $P_e = 0$ .

$$N_0 = \frac{(0,03 - 0,0004) \cdot 6,76}{3 \cdot 0,8} = 0,083.$$

Результаты расчетов при различных значениях механической скорости бурения и интенсивности естественного искривления приведены в табл.

$i_e$ , град/100 м	$v_m$ , М/ч		
	3	5	7
3	0,083	0,116	0,119
4	0,111	0,15	0,16
5	0,14	0,19	0,2

Затраты на цикл искусственного искривления, в соответствии с формулой (9) будут равны: при  $v_m = 3$  м/ч  $A_1 = \frac{30000}{8} \left( 5 - \frac{3}{5} \right) = 15\ 000$  руб., при  $v_m = 5$  м/ч  $A_1 = 16\ 500$  руб.,  $v_m = 7$  м/ч – 17 137 руб.

Стоимость амортизации специальных технических средств направленного бурения в соответствии с формулой (15) составит

$$A_2 = \frac{20000 \cdot 3}{200} + \frac{5000 \cdot 1}{50} + \frac{5000 \cdot 1}{200} + \frac{2000 \cdot 4}{4} = 2425 \text{ руб.}$$

Составляющую затрат  $A_3$ , при интенсивности естественного искривления 3 град./100 м и механической скорости бурения 3 м/ч определим по формуле (16):

$$A_3 = \frac{30000 \cdot 8 \cdot 1,1 \cdot 0,3 \cdot 0,083 \cdot 3}{8 \times 100} = 24,65 \text{ руб.}$$

Затраты на ликвидацию аварий с отклонителями, при интенсивности естественного искривления 3 град./100 м и механической скорости бурения 3 м/ч, вычислим по формуле (17):

$$A_4 = \frac{30000 \cdot 0,083 \cdot 8(1-0,2)}{8} = 1\,992 \text{ руб.}$$

Результаты расчетов при различных значениях механической скорости бурения и интенсивности естественного искривления приведены в табл., в которой значения параметров приведены в виде дроби  $A_3/A_4$ .

$i_e$ , град/100 м	$v_m$ , м/ч		
	3	5	7
3	24,65/1 992	34,45/2 784	35,34/2 856
4	32,97/2 664	44,55/3 600	47,52/3 840
5	41,58/3 360	56,43/4 560	59,4/4 800

Стоимость истирающих материалов не определяется, так как специальных буровых компоновок и инструментов не используется.

Потери производительности вследствие работ по направленному бурению в соответствии с формулой (21) будут равны:

$$\Delta \Pi_o = 0,083 \left( \frac{5+1}{\frac{1}{3} + \frac{3+0,5+0,5}{6}} - 3 \right) = 0,18 \text{ м.}$$

Результаты поведенных расчетов приведены в табл.

$i_e$ , град/100 м	$v_m$ , м/ч		
	3	5	7
3	0,18	0,33	0,38
4	0,24	0,42	0,51
5	0,3	0,54	0,64

В соответствии с формулой (9) затраты на работы по искривлению при интенсивности естественного искривления 3 град./100 м и механической скорости бурения 3 м/ч составят

$$C_o = 0,083 \cdot (15\,000 + 2\,425 + 24,65 + 1\,992) = 1\,614 \text{ руб.}$$

Остальные результаты расчетов приведены в табл.

$i_e$ , град/100 м	$v_m$ , м/ч		
	3	5	7
3	1 614	2 522	2 672
4	2 233	3 385	3 752
5	2 916	4 473	4 884

Стоимость метра скважины, пробуренной с использованием технических средств искусственного искривления при интенсивности естественного искривления 3 град./100 м и механической скорости бурения 3 м/ч будет равна (формула (8)):

$$C_n = \frac{30000 + 1614}{6,76 - 0,18} = 4\,804,5 \text{руб.}$$

При расчете учтено, что затраты  $C_{из}$ ,  $C_y$  и  $C_e$  равны нулю. Остальные результаты расчетов приведены в табл.

$i_e$ , град/100 м	$v_m$ , м/ч		
	3	5	7
3	4 804	3 730	3 513
4	4 948	3 868	3 681
5	5 095	4 051	3 859

Полученные результаты расчета проиллюстрированы графиками на рис. 2.

Если же при бурении разведочных скважин использовать методику проектирования трасс скважин по «типовым» кривым с учетом закономерностей естественного искривления, то затраты на бурение скважин в условиях естественного искривления будут существенно меньше (линии 4,5,6 на рис. 2). Расчет сделан для случая, когда «типовая» кривая получена с достоверностью 80 %, что позволило снизить число постановок отклонителей  $N_o$  на 80 %, уменьшить затраты  $A_3$  и  $A_4$  и, соответственно, затраты, связанные с использованием отклонителей. При этом стоимость затрат на разработку методики учета закономерностей естественного искривления принята 500 тыс. руб. при общем объеме бурения 50 тыс. м, а удлинение трассы скважины, полученной как «типовая» кривая, составило 50 м.

Из данного анализа следует, что методика проектирования трасс скважин по «типовым» кривым эффективна, но может оправдать затраты на её разработку только при определенном объеме буровых работ. С помощью приведенной методики расчета такой объем можно установить.

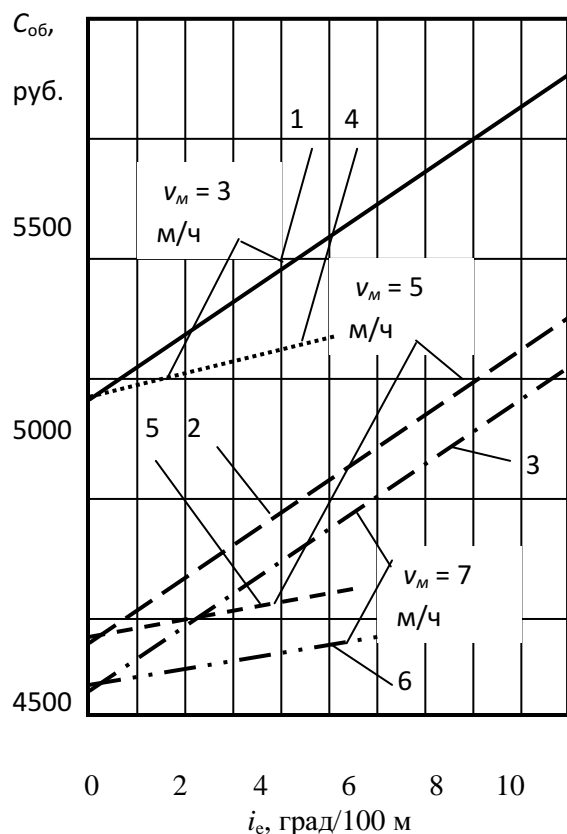


Рис. 2. Зависимость стоимости метра бурения от интенсивности естественного искривления при различных значениях механической скорости бурения при устранении отклонения скважины только отклонителями – линии 1, 2, 3; с применением методики проектирования трасс скважин с учетом закономерностей естественного искривления при достоверности «типовой» кривой 80 % – линии 4, 5, 6

Таким образом, при повышении интенсивности естественного искривления стоимость 1 м бурения с применением таких технических средств направленного бурения, как отклонители, существенно возрастает.

Очевидно, для снижения затрат следует использовать средства снижения интенсивности естественного искривления, а также проводить работы по анализу закономерностей естественного искривления и проектировать скважины с учетом выявленных закономерностей, что существенно снизит затраты на бурение скважин в условиях естественного их искривления.

## Практическая работа № 4

### Расчет моделей процесса бурения по методике полного факторного эксперимента. Графическая интерпретация моделей и их анализ

Объем работы - 4 ч.

**Цель работы:** Изучить метод обработки данных по методике полного факторного эксперимента и выполнить анализ данных бурения с целью поиска оптимальных условий.

Для выполнения работы будут использованы данные обработки результатов экспериментальных работ, полученные в работе №1. Для построения моделей используем данные приведенные в таблицах 1 и 2 и в соответствии с разделом 6.3 учебного пособия [1] выполним расчет моделей.

По данным бурения однослойными и импрегнированными коронками осуществим поиск оптимальных условий бурения (рациональной частоты вращения и осевой нагрузки) по критериям оптимизации  $v_m \rightarrow \max$  и  $\frac{N_{\bar{b}}}{v_m} \rightarrow \min$

Представленные на рис. 1.21 и 1.22 учебного пособия [1] данные обработаны методом полного факторного эксперимента (ПФЭ) вида  $N_{\text{оп}} = 2^k$ , где  $N_{\text{оп}}$  – число опытов;  $k$  – количество влияющих факторов (в данном случае будет равен 2, так как влияющие факторы осевая нагрузка и частота вращения).

В результате обработки данных могут быть получены модели, отражающие влияние факторов – осевого усилия  $P_{\text{ос}}$  и частоты вращения  $\omega$  на механическую скорость бурения  $v_m$  и энергоемкость разрушения породы  $\frac{N_{\bar{b}}}{v_m}$  для бурения однослойной коронкой диорита и импрегнированной коронкой кварцита:

$$v_m = 3,89 + 1,66 P_{\text{ос}} + 3,2 \omega + 1,24 P_{\text{ос}} \omega ;$$

$$v_m = 4,55 + 2,18 P_{\text{ос}} + 3,8 \omega + 1,68 P_{\text{ос}} \omega ;$$

$$\frac{N_{\bar{b}}}{v_m} = 0,82 + 0,04 P_{\text{ос}} - 0,032 \omega - 0,013 P_{\text{ос}} \omega ;$$

$$\frac{N_{\bar{b}}}{v_m} = 0,79 - 0,23 P_{\text{ос}} + 0,068 \omega - 0,154 P_{\text{ос}} \omega .$$

Пример графической интерпретации уравнений дан на рис. 1.23 учебного пособия [1].

Анализ графиков на рис. 1.23 показывает, что для однослойной коронки максимальное значение механической скорости бурения (область I на рис. 1.23, а) не совпадает с минимальным значением критерия

$\frac{N_{\sigma}}{v_m}$  (область III на рис. 1.23, в). Минимальные значения энергоемкости бурения  $\frac{N_{\sigma}}{v_m}$  получены при  $P_{oc} = 400$  даН и  $\omega = 725$  мин<sup>-1</sup>. Механическая скорость бурения при данных режимах параметрах будет равна 4,5 см/мин, следовательно, вероятно получение максимального ресурса коронки.

При максимальной скорости бурения 9 см/мин,  $P_{oc} = 1\,400$  даН и  $\omega = 725$  мин<sup>-1</sup> показатель  $\frac{N_{\sigma}}{v_m} = 0,82$ . В этом случае величина показателя  $\frac{N_{\sigma}}{v_m}$  в 1,06 раза больше показателя 0,77, значит, ресурс коронки будет снижен на 6 %.

Таким образом, в пределах рассмотренных условий бурения однослойной коронкой имеем два варианта для сравнения:

- 1)  $v_m = 5$  см/мин или 3 м/ч и максимальный ресурс коронки, например, 15 м;
- 2)  $v_m = 9$  см/мин или 5,4 м/ч и сниженный на 6 % ресурс коронки – 14,1 м.

По формуле (1.37) [1] следует рассчитать стоимость 1 м бурения скважины при следующих данных: стоимость станко-смены работы бурового агрегата  $C_{см} = 24\,000$  руб., длительность станко-смены  $T = 8$  ч, время бурения 4 ч, т. е.  $(T - T_0) = 4$  ч, проходка за рейс 6 м, стоимость коронки  $C = 3\,000$  руб.

При таких данных по первому варианту стоимость 1 м бурения скважины составит 3 170 руб., а по второму – 2 748 руб., т. е. в данном случае наиболее экономично бурить на более высокой (в пределах полученных значений) скорости при максимальных частоте вращения и осевой нагрузке.

Таким образом, в рассматриваемом случае бурение следует вести при осевом усилии 1 400 даН и частоте вращения 725 мин<sup>-1</sup>, что будет экономически выгодно. При этом параметры режима бурения можно существенно повышать, добиваясь более высокой скорости бурения.

Для импрегнированной коронки области максимальных значений механической скорости бурения и минимального значения критерия  $\frac{N_{\sigma}}{v_m}$  совпали (области II и IV на рис. 1.23, б, г [1]). Это значит, что обработка коронки при максимальных значениях осевого усилия и частоты вращения обеспечат и максимальный ресурс инструмента, а эффективность бурения будет высока. При этом, учитывая полученные значения критериев, имеется некоторый резерв повышения параметров режима и механической скорости бурения.

Придерживаясь последовательности изложения рассмотренного примера, следует провести обработку данных в соответствии с вариантом, предложенным для выполнения и выполнить анализ полученных данных.

## Практическая работа № 5

### Расчет моделей по методике полного факторного эксперимента для поиска оптимальных условий и параметров режима бурения по критерию рациональной углубки за один оборот инструмента на забое $h_{об}$

Объем работы – 4 ч.

**Цель работы:** Изучить метод обработки данных по методике полного факторного эксперимента и выполнить анализ данных бурения с целью поиска оптимальных условий по критерию углубки за один оборот и провести сравнительный анализ с критерием управления процессом бурения по индексу  $RPI$ .

Оценим соответствие критерия управления процессом бурения, основанного на реализации заданной углубки за один оборот коронки на забое, представленного в виде показателя  $RPI$ , равного отношению  $1/h_{об}$ , где  $h_{об}$  – углубка за один оборот, см/мин.

Углубка за один оборот  $h_{об}$ , мм/об, функционально выражается в простейшем виде следующим образом:

$$h_{об} = \frac{v_m}{\omega},$$

где  $v_m$  – механическая скорость бурения, мм/мин;

$\omega$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>.

Величина углубки за оборот является комплексным показателем, позволяющим косвенно рассматривать и оценивать физические процессы, происходящие на забое, в частности, реакцию породы на внедрение резца, а также поведение коронки, в том числе под воздействием таких управляемых параметров бурения, как осевая нагрузка, частота вращения инструмента в зависимости от физико-механических свойств породы и величины износа резцов.

Теоретические положения критерия  $h_{об}$  – углубка за один оборот, даны в второй главе учебного пособия [1]. Предлагается изучить материал по этому вопросу и далее следуя примеру анализа критерия  $h_{об}$  (рис.1.24) выполнить работу.

В результате обработки данных могут быть получены модели, отражающие влияние факторов – осевого усилия  $P_{ос}$  и частоты вращения  $\omega$  на углубку за оборот при бурении однослойной и импрегнированной коронками:

$$h_o = 0,0097 + 0,0051P + 0,0002\omega - 0,00095P\omega;$$

$$h_u = 0,011 + 0,0062P + 0,0022\omega - 0,00088P\omega.$$

Графическая интерпретация уравнений представлена на рис. 1.24 учебного пособия [1].

Из графиков следует, что углубка за оборот повышается в основном по мере роста осевого усилия. При бурении однослойной коронкой оптимальная углубка за оборот по критерию  $RPI$  сначала реализуется за счет повышения частоты вращения, а затем – вследствие роста осевого усилия и частоты вращения (см. рис. 1.23, а).

При бурении импрегнированной коронкой оптимальная углубка за оборот по критерию  $RPI$  достигается путем снижения осевого усилия по мере роста частоты вращения (см. рис. 1.24, б).

Оптимальным условиям бурения по критерию  $RPI = 80–100$  (области V и VI на рис. 1.24, а, б) соответствуют следующие значения механических скоростей: 6–7,5 см/мин для однослойных коронок, (см. рис. 1.23, а); 5,5–7 см/мин для импрегнированных коронок (см. рис. 1.23, б).

Данные значения скоростей существенно меньше максимально полученных, особенно для импрегнированной коронки, и не соответствуют оптимальным условиям бурения, выбранным по критерию минимальной энергоемкости.

Так, для однослойной коронки, несмотря на умеренные значения механической скорости, критерий  $\frac{N_{\sigma}}{v_m}$ , гарантирующий высокий ресурс коронки, будет не самым оптимальным – 0,81, в сравнение с достигнутым – 0,77.

Следуя приведенному примеру, необходимо получить модели процесса, его графическую интерпретацию и провести анализ процесса бурения по углубке за один оборот и индексу  $RPI$ , проведя сравнительный анализ этих критериев.

## Практическая работа № 6

### Расчет оптимального значения осевого усилия по критерию рациональной углубки за один оборот инструмента на забое $h_{об}$

Объем работы – 2 ч.

**Цель работы:** Изучить метод определения оптимальных параметров режима бурения.

Рассмотрим возможность определения оптимальных параметров режима бурения по моделям процесса бурения, основанных на критерии оптимальной углубки за один оборот инструмента на забое скважины.

Если математическую модель углубки представить в общем виде:

$$h_{об} = A + B \cdot P_{oc} + C \cdot \omega + D \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

то выражение для расчета осевого усилия  $P_{oc}$  при заданной углубке за один оборот  $h_{об}$  будет выглядеть следующим образом:

$$P_{oc} = \frac{h_{об} - A - C \cdot \omega}{B + D \cdot \omega}. \quad (23)$$

Таким образом, выбирая величину частоты вращения  $\omega$  при заданной величине углубки за один оборот  $h_{об}$ , можно определить соответствующую этой заданной углубке и выбранной частоте вращения величину оптимальной осевой нагрузки.

Задача существенно усложняется, если в качестве третьего влияющего на процесс бурения фактора рассмотреть количество подаваемой промывочной жидкости  $Q$ . В этом случае модель будет выглядеть следующим образом:

$$h_{об} = A + B \cdot P_{oc} + C \cdot \omega + F \cdot Q + D \cdot P_{oc} \cdot \omega \cdot Q.$$

Построение представленных моделей и решение уравнений с целью определения  $P_{oc}$  при реализации методики управления процессом бурения следует производить на компьютере, управляющем процессом бурения в режиме оперативного диалога с мгновенной оценкой скорости бурения и углубки за один оборот.

Например, если задать углубку за один оборот коронки  $h_{об} = 0,01$  см/об. и установить частоту вращения  $\omega = 398$  мин<sup>-1</sup> (в закодированном по методике полного факторного эксперимента обозначении частота равна 0), то из уравнения (23) путем подстановки принятых значений параметров можно определить оптимальную для данных условий осевую нагрузку:

$$P_{oc} = \frac{0,01 - 0,0097}{0,0051} = 0,059, \text{ что соответствует величине } P_{oc} = 930 \text{ даН.}$$

Для импрегнированной коронки подобные условия позволяют рассчитать иное значение осевой нагрузки:

$$P_{oc} = \frac{0,01 - 0,011}{0,0062} = -0,161, \text{ что соответствует осевой нагрузке } 819 \text{ даН.}$$

Таким образом, рассмотрена методика выбора оптимальных параметров бурения по заданной углубке за один оборот при сопоставлении и комплексной оценке таких критериев, как механическая скорость, энергоёмкость и стоимость 1 м бурения.

При выполнении работы, следуя представленному выше примеру, произвести расчет оптимального значения осевого усилия на буровой инструмент используя полученные модели.

## Практическая работа № 7

### Обработка статистических экспериментальных данных методом наименьших квадратов

Объем работы - 2 ч.

**Цель работы:** Изучить метод обработки статистических экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Построить линейную регрессионную модель, показывающую зависимость механической скорости бурения  $y_i$ , м/ч от осевой нагрузки  $P_{oc}$ , кН используя раздел 6.2 учебного пособия [1].

В результате проведения эксперимента получены следующие значения механической скорости при различных значениях осевой нагрузки (табл.3). При проведении эксперимента удалось получить 10 наблюдений значений скорости бурения  $n = 10$ .

Таблица 3

*Результаты измерений значений скорости бурения при изменении осевой нагрузки на инструмент*

$X_i = P_{oc}$ , кН	$y_i$ , м/ч		
0,8	1,4	1,5	1,5
1,1	2,0	1,9	нет измерения
1,3	2,4	2,3	нет измерения
1,5	2,8	2,7	2,75

С помощью обработки данных по методу наименьших квадратов определены значения коэффициентов линейной модели и получено уравнение эмпирической линии регрессии:

$$y = -0,077 + 1,9x.$$

После получения численных оценок параметров по уравнению регрессии можно вычислить для каждого значения  $x_i$  (1, 2, ...,  $n$ ) величины  $y_i$ , называемые предсказанными или расчетными значениями переменной  $y$ . Для реального процесса бурения это справедливо при неизменных условиях: не меняется горная порода, нет или весьма незначителен износ коронки и т.д.

Оценка точности метода наименьших квадратов производится по методике, представленной в работе [6]. Этот раздел расчета рекомендуется выполнить в процессе самостоятельной работы студента.

Важно отметить, что обработка данных по методике наименьшего квадрата в виде специальной компьютерной программы представлена в электронной системе расчетов Excel for Windows. Данной программой Студенты могут воспользоваться данной программой и выполнить необходимые расчеты на компьютере.

## Практическая работа № 8

### Поиск оптимальных условий методами полного факторного эксперимента и случайного баланса

Объем работы – 2 ч.

**Цель работы:** Изучить методы планирования и проведения экспериментальных работ с применением методик полного факторного эксперимента и случайного баланса.

Применение полного факторного эксперимента для анализа процесса бурения горных пород алмазной коронкой при проведении экспериментальных работ.

Составляется план экспериментальных работ в виде табл. 4, в котором указываются факторы, уровни варьирования факторами и очередность проведения опытов.

Таблица 4

*План экспериментальных работ бурения алмазной коронкой*

Номер опыта	Значения факторов в кодовых обозначениях				Интервалы варьирования и уровень факторов	Осевая нагрузка, кН	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
	$V_o$	$P_{oc}$	$\omega$	$P_{oc} \cdot \omega$			
1	+	+	+	+	Основной уровень	10	435
2	+	+	-	-	Интервал варьирования	5	215
3	+	-	-	+	Нижний уровень	5	280
4	+	-	-	+	Верхний уровень	15	710
5	+	-	+	-	Кодовое обозначение	$P_{oc}$	$\omega$

В качестве факторов выбраны осевое усилие  $P_{oc}$  и частота вращения  $\omega$ , а количество промывочной жидкости фиксировалось на определенном постоянном уровне, применив третью скорость насоса НБ-3-120/40, что составило 30 л/мин. Поскольку выделено два влияющих фактора, значит, для получения результата нужно провести 4 опыта, и еще один опыт должен быть проверочным для расчета критериев адекватности и сходимости результатов опытных работ.

В качестве отклика будет фиксироваться время бурения интервала горной породы 1, 2 или 3 см в зависимости от величины механической скорости. Например, если скорость бурения будет невысокой – 1–5 м/ч, интервал может быть минимальным – 1 см; при более высокой скорости интервал бурения увеличивается до 2 см, а при скорости бурения 10–15 м/ч рекомендуемый интервал бурения составляет 5 см. Для получения достоверной информации следует на постоянных режимах бурения пробурить 3 интервала, а время бурения определить как среднее значение.

Для записи полученных в процессе эксперимента данных, готовится таблица 6.6, в которую в процессе эксперимента записываются отклики – время бурения интервала  $T$  и величина интервала, а также рассчитанные впоследствии значения механической скорости бурения  $v_m$ .

Скорость бурения по среднему значению времени  $T_{cp}$  бурения интервала  $l$  рассчитывается по формуле:

$$v_m = \frac{36l}{T_{cp}}$$

Для анализа модели процесса бурения уравнение регрессии воспроизводят в виде графиков равных скоростей в поле квадрата с вершинами  $(-P_{oc}; -\omega)$ ,  $(-P_{oc}; +\omega)$ ,  $(+P_{oc}; -\omega)$  – см. рис. 3.

Графики скоростей строят с шагом 1 или 2 м/ч.

Таблица 5

План и результаты экспериментальных работ

Номер опыта	Значения факторов в кодовых обозначениях				Значения откликов – $T$ – время бурения интервала, с/длина интервала, см				Механическая скорость бурения, м/ч $v_m$
	$B_o$	$P_{oc}$	$\omega$	$P_{oc} \omega$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_{cp}$	
1	+	+	+	+					
2	+	+	–	–					
3	+	–	–	+					
4	+	–	–	+					
5	+	–	+	–					

График на рис. 3 строится следующим образом. Принимается конкретное значение отклика  $v_m$  в пределах значений, полученных при эксперименте, затем задается величина  $P_{oc}$  и рассчитывается  $\omega$ .

Например, модель имеет вид

$$v_m = 2,5 + 2 \cdot P_{oc} + 1,5 \cdot \omega + 0,5 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Принимаем  $v_m = 2$  м/ч и  $P_{oc} = 0$ , что позволяет рассчитать  $\omega = -0,33$ . Таким образом, на графике имеем точку на изолинии 2 м/ч с координатами  $P_{oc} = 0$  и  $\omega = -0,33$ .

Для более детального анализа процесса разрушения породы при бурении строятся графики зависимости углубки за один оборот инструмента на забое от осевой нагрузки при трех значениях частоты вращения. Для этого на графике рис. 3 выбираются 3 значения частоты вращения min, med, max, и для точек пересечений с кривыми  $v_m$  определяются значения  $P_{oc}$ .

Углубка за один оборот инструмента на забое рассчитывается по формуле:

$$h_o = \frac{v_m}{60\omega},$$

где  $\omega$  – частота вращения инструмента,  $\text{мин}^{-1}$ .

$v_m$  – механическая скорость бурения, м/ч.

По результатам расчета  $h_o$ , при соответствующем на графике (рис. 3) значении  $P_{oc}$ , строится график  $h_o = f(P_{oc})$  (рис.4). Каждый график строится на основании 2–5 точек, полученных с графиков на рис. 3 на вертикалях min, med, max, соответствующих различным значениям частоты вращения. Последнее необходимо с целью установления точной аналитической зависимости углубки за один оборот от осевой нагрузки.

Для шарошечного долота углубка за один оборот рассчитывается с использованием частоты вращения шарошек долота:

$$\omega_{ш} = \omega \cdot \frac{R_c}{r_{ш} \cdot \sin\beta},$$

где  $R_c$  – радиус скважины, м;

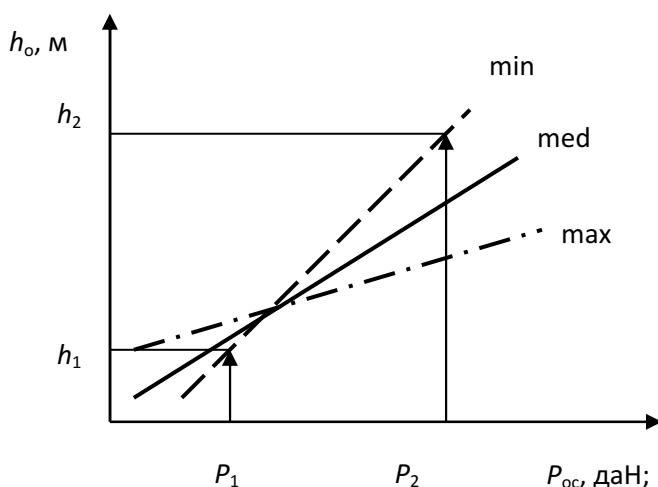
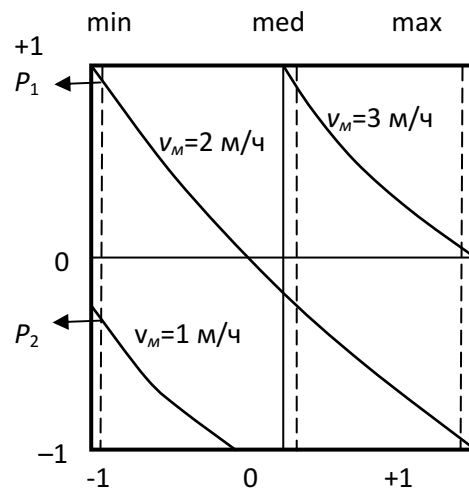


Рис. 4. Зависимость углубки за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения инструмента



Частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$

Рис.3. Графическая интерпретация математических моделей на отклик

$v_m$

$r_{ш}$  – радиус шарошки по среднему венцу, м;

$\omega$  – частота вращения долота,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$\beta$  – угол наклона оси шарошки по отношению к забою, град.

Построим график  $h_o = f(P_{oc})$ . Для этого выбираем минимальную (min)  $\omega = 230 \text{ мин}^{-1}$ . Если верхний уровень  $\omega$  равен, например, 1 000, а нижний – 200  $\text{мин}^{-1}$ , т. е. 1 000  $\text{мин}^{-1}$  соответствует (+1) в кодовом обозначении, а  $\omega =$

200 мин<sup>-1</sup> – (-1), то в этом случае на графике рис. 6.6  $\omega = 230$  мин<sup>-1</sup> будет соответствовать значению  $-0,925$ . Проводим вертикальную линию с целью определения пересечений с кривыми  $v_m$  (таких пересечений должно быть не менее 3) и находим значения осевой нагрузки  $P_{oc}$  в натуральных величинах (используя уровни данного фактора) для каждого случая пересечения с графиком  $v_m$ , при одном значении  $\omega$  (значения  $P_1, P_2$  на рис.3). Далее рассчитывается значение углубки за один оборот и строим график  $h_o = f(P_{oc})$  по соответствующим  $v_m$  значениям осевой нагрузки.

Анализ графиков, полученных при проведении работ по методике полного факторного эксперимента, позволяет выделить основные характеристики процесса разрушения пород при бурении.

Примеры графиков, подобных представленным на рис. 4, и их анализ, даны в первой главе (см. рис. 1.10 и 1.11) учебного пособия [1].

## Практическая работа № 9

### Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов

Объем работы - 2 ч.

**Цель работы:** Изучить аппроксимацию экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Имеются данные о зависимости вертикальной выталкивающей силы, действующей на резец типа PDC с передним отрицательным углом  $R_B$  (рис. 5) от линейной скорости перемещения резца. Данные приведены в табл. и на графике. Усилие  $R_B$  направлено в противоположную осевому усилию  $P_{oc}$

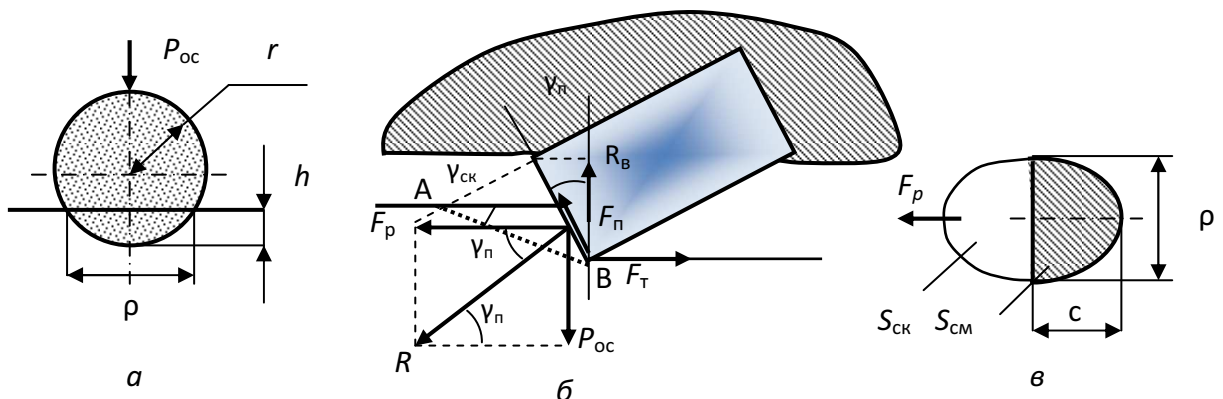


Рис. 5 . Схема к анализу процесса-резания скалывания породы резцом PDC: *a* – вид на резец спереди; *б* – вид на резец сбоку; *в* – форма и размеры площадок смятия и скалывания породы резцом PDC цилиндрической формы

сторону и может определяться по зависимости:

$$R_B = F_p \sin \gamma_n \cos \gamma_{п.}$$

В результате действия усилия  $R_B$  величина осевой нагрузки на резец снижается, что влияет на глубину резания-скалывания горной породы.

По имеющимся данным необходимо получить уравнение, которое бы позволяло рассчитывать значения усилия  $R_B$  при различных значениях скорости резания-скалывания породы  $v_{л}$ .

Таблица 6

Данные для аппроксимации зависимости методом наименьших квадратов

$y$ ( $R_B$ , кН)	$x$ ( $v_{л}$ , м/с)	$x^2$	$x^3$	$x^4$	$yx$	$yx^2$
0,25	0,057	0,003249	0,000185	0,000011	0,01425	0,00081
0,39	0,34	0,1156	0,0393	0,01336	0,1326	0,0451
0,66	0,79	0,6241	0,493	0,3895	0,5214	0,412
1,18	1,58	2,4964	3,944	6,232	1,8644	2,946
2,03	2,35	5,5225	12,98	30,5	4,77	11,21
$\Sigma$ 5,12	$\Sigma$ 4,51	$\Sigma$ 8,76	$\Sigma$ 17,456	$\Sigma$ 37,135	$\Sigma$ 7,3	$\Sigma$ 14,6146

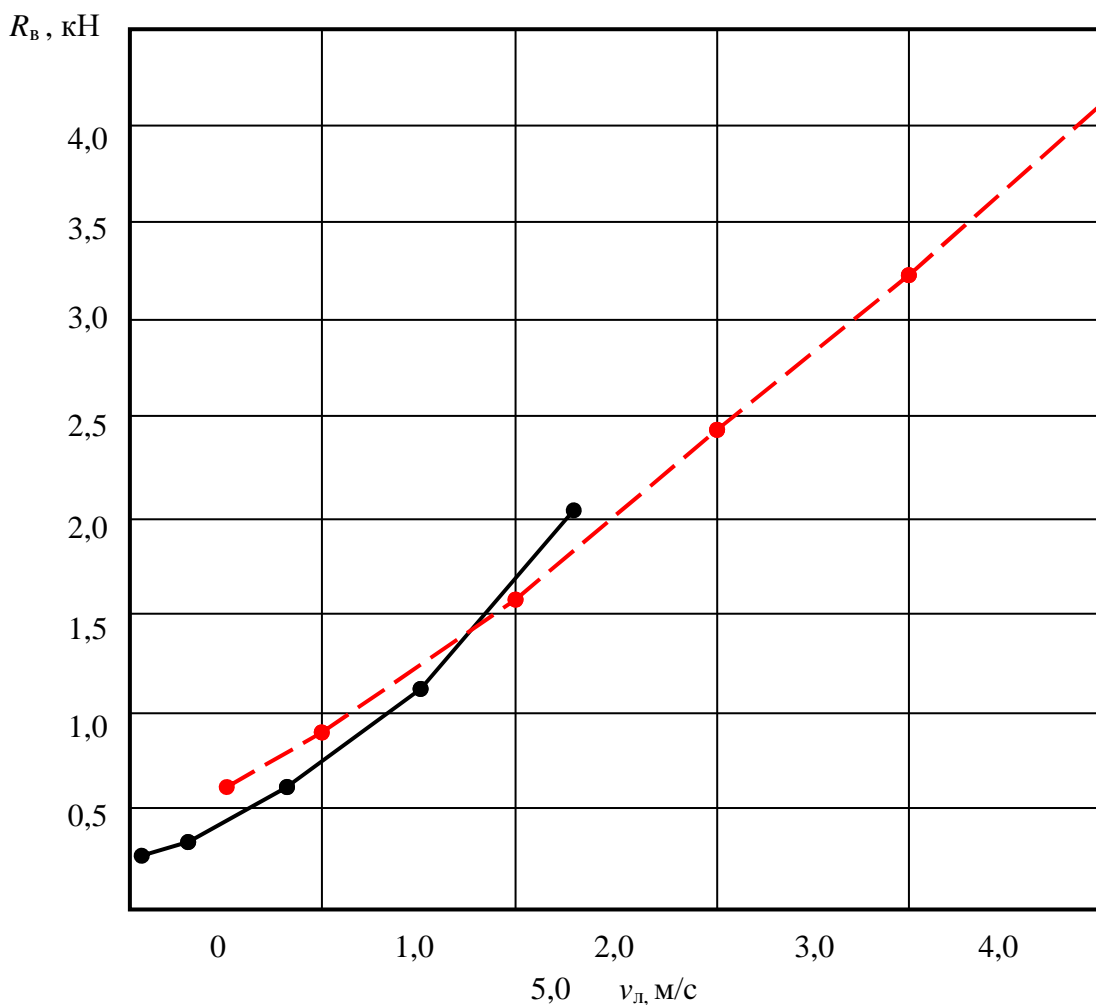


Рис. 6. Зависимость усилия  $R_B$  от скорости резания-скалывания породы резцом типа PDC  $v_{л}$ : сплошная линия – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимирующая кривая

В соответствии с данными табл. 6 получены следующие уравнения.

$$\left. \begin{aligned} an + bx + cx^2 &= y; \\ ax + bx^2 + cx^3 &= yx; \\ ax^2 + bx^3 + cx^4 &= yx^2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $n$  – число экспериментальных данных.

$$\left. \begin{aligned} a \cdot 5 + b \cdot 5,12 + c \cdot 8,76 &= 4,51; \\ a \cdot 5,12 + b \cdot 8,76 + c \cdot 17,76 &= 7,3 \\ a \cdot 8,76 + b \cdot 17,46 + c \cdot 37,135 &= 14,62. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$a = \frac{\begin{array}{ccc} 4,51 & 5,12 & 8,76 \\ 7,3 & 8,76 & 17,46 \\ 8,76 & 17,46 & 37,13 \end{array}}{\begin{array}{ccc} 5 & 5,12 & 8,76 \\ 5,12 & 8,76 & 17,46 \\ 8,76 & 17,46 & 37,13 \end{array}} = \frac{4,51 \cdot 8,76 \cdot 37,13 + 7,3 \cdot 17,46 \cdot 8,76 + 14,62 \cdot 17,46 \cdot 5,12 - 14,62 \cdot 8,76 \cdot 8,76 - 17,46 \cdot 17,46 \cdot 4,51 - 7,3 \cdot 5,12 \cdot 37,13}{0,258}$$

Для определения неизвестных величин в уравнениях (2) следует составить определитель. Для определения значения  $a$  определитель будет выглядеть следующим образом:

Рассчитав значение  $a$  по уравнениям (2) определяем значения  $b$  и  $c$ , которые будут равны:  $b = 0,664$ ,  $c = 0,021$ .

Итоговое уравнение для расчета величины  $R_B$  будет выглядеть следующим образом:

$$R_B = 0,258 + 0,664 v_{л} + 0,021 v_{л}^2.$$

Например, если  $v_{л} = 1$ , то  $R_B = 0,9$ ;  $v_{л} = 2$ , то  $R_B = 1,6$ ;  $v_{л} = 3$ , то  $R_B = 2,44$ ;  $v_{л} = 4$ , то  $R_B = 3,28$ ;  $v_{л} = 5$ , то  $R_B = 4,1$ .

Расчетная линия зависимости усилия  $R_B$  от линейной скорости приведена на рис.6.

## Библиографический список

1. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве: учебное пособие/ В.В.Нескоромных – Красноярск: Изд-во СФУ, 2013. 264 с.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П.Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В.Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Блинов Г.А. Алмазосберегающая технология бурения/ Г.А. Блинов, В.И. Васильев, М.Г. Глазов [и др.] – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
4. Блинов Г.А. Техника и технология высокоскоростного бурения/ Г.А. Блинов, О.А. Буркин, О.А. Володин [и др.] – М.: Недра, 1982. – 408 с.
5. Воздвиженский Б.И. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения/ Б.И.Воздвиженский, Г.А. Воробьев, Л.К. Горшков [и др.] – М.: Недра, 1990. – 208 с.
6. Ганджумян Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении/ Р.А. Ганджумян. – М.: Недра, 1990. – 218 с.
7. Кардыш В.Г. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин/ В.Г. Кардыш, Б.В. Мурзаков, А.С. Окмянский. – М.: Недра, 1984. – 201 с.
8. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения/ Е.А.Козловский, Р.Х. Гафиятуллин – М.: Недра, 1975. – 303 с.
9. Козловский Е.А. Автоматизация геолого-разведочного бурения/ Е.А.Козловский. – М.: Недра, 1977. – 215 с.
10. Корнилов Н.И. Технология бурения скважин алмазным инструментом при высоких скоростях вращения/ Н.И.Корнилов, Г.А. Блинов, П.Н. Курочкин. – М.: Недра, 1978. – 237 с.
11. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии: учеб. пособие/ В.В.Нескоромных. – Красноярск: Изд. СФУ, 2012. – 324 с.
12. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие/ В.В.Нескоромных. – Красноярск: Изд. СФУ, 2012. – 297 с.
13. Нескоромных В.В. Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые: учеб. пособие/ В.В. Нескоромных. – Красноярск: Изд. СФУ, 2012. – 294 с.
14. Нескоромных В.В. Методологические и правовые основы инженерного творчества: учеб. пособие/ В.В. Нескоромных. – Иркутск: Изд. ИрГТУ, 2005. – 134 с.
15. Рогинский В.М. Повышение эффективности проходки горизонтальных выработок/ В.М.Рогинский. – М.: Недра, 1978. – 150 с.

## Оглавление

Практическая работа № 1. Преобразование опытных данных (графических и табличных) в данные в соответствии с планом полного факторного эксперимента для их обработки и построения моделей	3
Практическая работа № 2. Методика определения оптимальных параметров режима и условий бурения скважин	5
Практическая работа № 3. Расчет стоимости одного метра бурения скважины с учетом затрат на обеспечение проектного направления скважины	11
Практическая работа № 4. Расчет моделей процесса бурения по методике полного факторного эксперимента. Графическая интерпретация моделей и их анализ	22
Практическая работа № 5. Расчет моделей по методике полного факторного эксперимента для поиска оптимальных условий и параметров режима бурения по критерию рациональной углубки за один оборот инструмента на забое $h_{об}$	24
Практическая работа № 6. Расчет оптимального значения осевого усилия по критерию рациональной углубки за один оборот инструмента на забое $h_{об}$	25
Практическая работа № 7. Обработка статистических экспериментальных данных методом наименьших квадратов	27
Практическая работа № 8. Поиск оптимальных условий методами полного факторного эксперимента и случайного баланса	28
Практическая работа № 9. Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов	31
Библиографический список	34