

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра бурения скважин**

## **БУРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов бакалавриата направления 21.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020**

УДК 622.244.4.06+622.245.42 (073)

**БУРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ:** Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *Е.Л. Леушева*. СПб, 2020. 30 с.

Методические указания охватывают вопросы изучения технологических свойств технологических жидкостей, методов рецептурных исследований и математической обработки результатов.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» профиля «Бурение нефтяных и газовых скважин».

Научный редактор проф. *М.В. Двойников*

Рецензент доц. *В.Я. Климов* (СК «Тектоника»)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2020

## **БУРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов бакалавриата направления 21.03.01*

Сост. *Е.Л. Леушева*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
бурения скважин

Ответственный за выпуск *Е.Л. Леушева*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 11.06.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,7. Усл.кр.-отт. 1,7. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 75 экз. Заказ 342. С 34.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

## Задание №1

### Оптимизация состава бурового раствора на основе полного факторного анализа

Полный факторный анализ заключается в проверке всех возможных сочетаний факторов. Количество опытов  $n$  определяется по формуле:

$$n = p^q, \quad (1.1)$$

где  $q$  – число факторов,  $p$  – число уровней изменения факторов.

Причем все факторы имеют одинаковое число уровней.

В качестве факторов при обработке рецептуры буровых жидкостей служат материалы, химические реагенты, температура и другие. При планировании эксперимента и математической обработке результатов факторы обозначаются буквой « $X_i$ ». Результатами исследований служат технологические параметры, такие как статическое и динамическое напряжение сдвига, пластическая и условная вязкость, показатель фильтрации и т.д. Они обозначаются – « $Y_i$ ». Обработка результатов экспериментальных исследований сводится к определению коэффициентов уравнения регрессии, которые могут быть представлены в виде:

- линейной модели:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + \dots \quad (1.2)$$

- нелинейной модели:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 \dots \quad (1.3)$$

где  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_{12}, A_{13}, A_{23}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

$$A_0 = \frac{\sum Y_i}{n}, \quad (1.4)$$

где  $Y_i$  – значение параметра бурового раствора (например, показатель фильтрации  $\Phi_{30}$ ),  $n$  – количество опытов.

**Цель работы:** отработка рациональной рецептуры бурового раствора при заданных условиях и математическая обработка результатов исследований.

Возможные приборы и материалы:

1. Ротационный вискозиметр;
2. Воронка для измерения условной вязкости;
3. Плотномер (рычажные весы или ареометр);
4. Фильт-пресс;
5. рН метр;
6. Bentonитовые глинопорошки, утяжелители и химические реагенты.

**Порядок работы:**

1. Для заданных геологических условий обосновать тип бурового раствора и его основные компоненты (2-3 реагента).
2. Определить количество опытов.
3. Составить матрицу планирования по форме (Таблица 1).
4. Провести расчетное количество опытов согласно матрице планирования и результаты занести в Таблицу 1.1.

Таблица 1.1

**Матрица планирования**

№№ опытов	Факторы			Результаты исследований		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1(\Phi_{30})$	$Y_2(CHC_1)$	$Y_3(YB)$
1						
2						
3						
...						

5. Результаты исследований обработать с использованием корреляционно-регрессивного метода.

Для определения коэффициентов уравнения регрессии  $A_i$  заполнить таблицу 2 «Уровни и интервалы варьирования» и таблицу 3 «Формализованная матрица планирования».

В таблицу 1.2 в графу «Базовый уровень занести среднее значение фактора. Например, минимальная концентрация КМЦ – 0,2%, максимальная – 0,6%, а базовый уровень – 0,4%. Соответственно интервал варьирования – 0,2%.

Таблица 1.2

Факторы	Уровни		Базовый уровень	Интервал варьирования
	min	max		
$X_1$	$X_1^{\min}$	$X_1^{\max}$	$X_1^{\text{cp}}$	$\Delta X_1$
$X_2$	$X_2^{\min}$	$X_2^{\max}$	$X_2^{\text{cp}}$	$\Delta X_2$
$X_3$	$X_3^{\min}$	$X_3^{\max}$	$X_3^{\text{cp}}$	$\Delta X_3$

В эксперименте приняты два уровня изменения факторов: верхний (+1) и нижний (-1), который отсчитываются от базового уровня прибавлением или вычитанием интервала варьирования для каждого из факторов.

Для вычисления коэффициентов  $A_i$  в формализованную матрицу вводят единичные вектор-столбцы переменных ( $X_i$ ) (Таблица 1.3).

Таблица 1.3

№№ опытов	Факторы						Y
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	

Таким образом, для подсчета коэффициента  $A_i$  используются вектор  $-X_i$ , а для  $A_2$  – вектор-столбец  $X_2$  и т.д.

При описании процесса (изменения параметров) может быть использована нелинейная модель. В этом случае, пользуясь правилом перемножения столбцов, получаем столбец произведения двух факторов.

Используя таблицу 1.3, можно определить  $A_i$  по формуле:

$$A_i = \frac{\sum (X_{ij} Y_j)}{n}, \quad (5)$$

где  $X_{ij}$  – значение фактора в формализованной форме;  $i$  – номер фактора,  $j$  – номер строки (1 ... n);  $Y_j$  – результат опыта;  $n$  – количество опытов.

ПРИМЕР: Кальцинированная сода ( $X_1$ ) : 0,2; 0,4; 0,6%

Глино порошок ( $X_2$ ): 2, 3, 4%  
 Количество опытов – 9

Таблица 1.4

**Матрица планирования**

№№ опытов	Факторы		$\Phi_{30} (Y)$
	$X_1$	$X_2$	
1	0,2	2	11,4
2	0,4	2	11,6
3	0,6	2	11,8
4	0,2	3	10,8
5	0,4	3	8,4
6	0,6	3	10,2
7	0,2	4	9,8
8	0,4	4	9,4
9	0,6	4	10,9
			$\Sigma Y = 94,3$
Среднее значение результатов исследований			$Y' = 10,48$

Составляем уравнение регрессии вида  $Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2$ . Для определения коэффициентов заполняем таблицы 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5

**Уровни и интервалы варьирования**

Факторы	Уровни		Базовый уровень	Интервал варьирования
	min	max		
$X_1$	0,2	0,6	0,4	0,2
$X_2$	2	4	3	1

Составляем формализованную матрицу.

Таблица 1.6

**Формализованная матрица планирования**

№№ опытов	Факторы			Y
	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	
1	-1	-1	+1	11,4
2	0	-1	0	11,6
3	+1	-1	-1	11,8
4	-1	0	0	10,8
5	0	0	0	8,4
6	+1	0	0	10,2
7	-1	+1	-1	9,8
8	0	+1	0	9,4
9	+1	+1	+1	10,9

$$A_0 = \frac{\sum Y}{n} = \frac{94,3}{9} = 10,5$$

$$A_1 = \frac{(-1) \cdot 11,4 + 0 \cdot 11,6 + 1 \cdot 11,8 + (-1) \cdot 10,8 + 0 \cdot 8,4 + 1 \cdot 10,2 + (-1) \cdot 9,8 + 0 \cdot 9,4 + 1 \cdot 10,9}{9} = 0,10$$

$$A_2 = \frac{(-1) \cdot 11,4 + (-1) \cdot 11,6 + (-1) \cdot 11,8 + 0 \cdot 10,8 + 0 \cdot 8,4 + 0 \cdot 10,2 + 1 \cdot 9,8 + 1 \cdot 9,4 + 1 \cdot 10,9}{9} = -0,52$$

$$A_{12} = \frac{11,4 - 11,8 - 9,8 + 10,9}{9} = \frac{0,7}{9} = 0,08$$

$$Y_1 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,2 - 0,52 \cdot 2 + 0,08 \cdot 0,2 \cdot 2 = 9,51$$

$$Y_2 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,4 - 0,52 \cdot 2 + 0,08 \cdot 0,4 \cdot 2 = 9,56$$

$$Y_3 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,6 - 0,52 \cdot 2 + 0,08 \cdot 0,6 \cdot 2 = 9,62$$

$$Y_1 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,2 - 0,52 \cdot 3 + 0,08 \cdot 0,2 \cdot 3 = 9,01$$

$$Y_2 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,4 - 0,52 \cdot 3 + 0,08 \cdot 0,4 \cdot 3 = 9,08$$

$$Y_3 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,6 - 0,52 \cdot 3 + 0,08 \cdot 0,6 \cdot 3 = 9,15$$

$$Y_1 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,2 - 0,52 \cdot 4 + 0,08 \cdot 0,2 \cdot 4 = 8,50$$

$$Y_2 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,4 - 0,52 \cdot 4 + 0,08 \cdot 0,4 \cdot 4 = 8,59$$

$$Y_3 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,6 - 0,52 \cdot 4 + 0,08 \cdot 0,6 \cdot 4 = 8,67$$

6. Адекватность полученной модели оцениваем по критерию Фишера  $F$ :

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S^2\{Y\}}, \quad (1.6)$$

где  $S_{ag}^2$  - дисперсия адекватности;  $S^2\{Y\}$  - дисперсия воспроизводимости.

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_1^n (Y_g - Y_i)^2}{f}, \quad (1.7)$$

$$S^2\{Y\} = \frac{\sum_1^n (Y_g - Y')^2}{n-1}$$

где  $Y_g$  – результат отдельного опыта;  $Y_i$  – предсказанное по уравнению регрессии значение параметра в этом опыте;  $f$  – число степеней свободы;  $f = n - (g + 1)$ ;  $g$  – количество факторов;  $Y'$  - среднее значение результатов опытов ( $Yg$ ).



$$\begin{aligned}
& (11,4 - 9,51)^2 + (11,6 - 9,56)^2 + (11,8 - 9,62)^2 + \\
& + (10,8 - 9,01)^2 + (8,4 - 9,08)^2 + (10,2 - 9,15)^2 + \\
S_{ag}^2 &= \frac{+(9,8 - 8,5)^2 + (9,4 - 8,59)^2 + (10,9 - 8,67)^2}{6} = \\
& 3,572 + 4,162 + 4,752 + 3,204 + 0,462 + 1,103 + 1,69 + \\
& + 0,656 + 4,973 \\
& = \frac{\quad}{6} = \\
& = 4,09
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S^2 \{Y\} &= \frac{(11,4 - 10,48)^2 + (11,6 - 10,48)^2 + (11,8 - 10,48)^2 + \dots}{8} = \\
& = \frac{0,846 + 1,254 + 1,74 + 0,102 + 4,33 + 0,078 + 0,462 + 1,26 + 0,176}{8} = 1,27
\end{aligned}$$

$$F = \frac{4,09}{1,27} = 3,19$$

Сравнивая вычисленное значение  $F$  с табличным [Приложение 1] при заданном уровне значимости, определяют адекватность модели. Модель считается адекватной, если  $F \leq F_{\text{табл}}$ .

Для данного примера табличные значения критерия Фишера составляют:

- $F_{\text{табл}} = 1,9$  при уровне значимости 0,20
- $F_{\text{табл}} = 3,6$  при уровне значимости 0,05
- $F_{\text{табл}} = 6,4$  при уровне значимости 0,01

Расчетное значение критерия составляет 3,19. Таким образом, модель адекватна при уровне значимости 0,05.

7. Построить графики изменения параметров бурового раствора в зависимости от компонентного состава, т.е.  $Y = f(X_i)$ . Например,  $Y = f(X_1)$  при  $X_2 = \text{const}$ ,  $X_3 = \text{const}$  (см. рисунок 1.1).

8. Учитывая допустимый интервал изменения значений параметров  $Y$  и используя графические зависимости, определить оптимальное содержание компонентов.

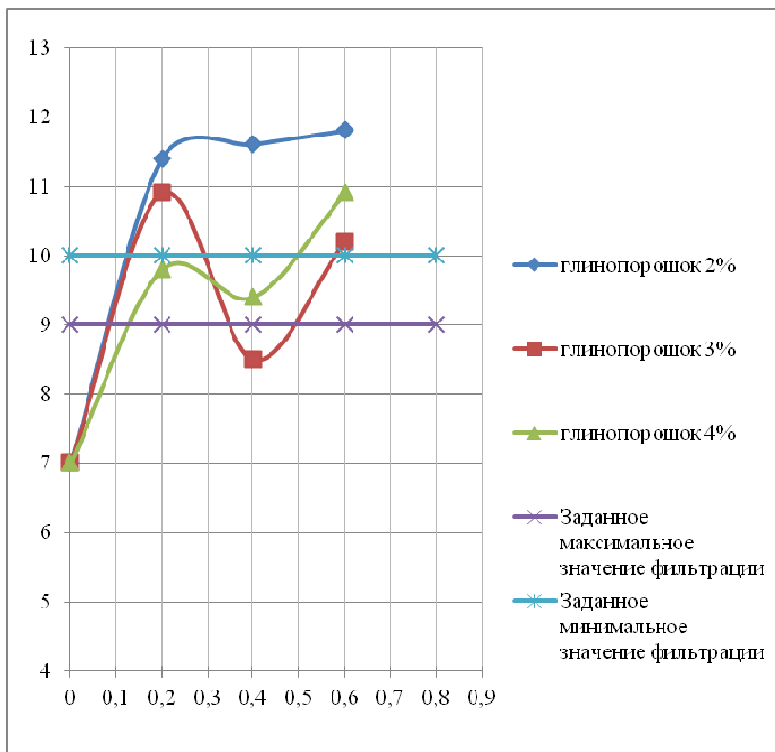


Рис. 1.1. Влияние компонентного состава бурового раствора на фильтрационные характеристики

## Задание №2

### Экспериментальная разработка рецептуры буровых жидкостей

Для повышения эффективности экспериментальных работ используются математические методы планирования. При подборе сложных многокомпонентных рецептов буровых жидкостей используются рациональный и эволюционный методы планирования.

При использовании рационального планирования эксперимента воздействие каждого фактора выявляется при одновременном изменении всех факторов. При этом все комбинации факторов должны быть осуществимы. Планирование эксперимента проводится в несколько этапов:

- Оценка границ области факторного анализа (границы изменения компонентов буровой жидкости) Выбирается уровень и интервалы варьирования факторов;
- Выбор конкретного способа планирования (комбинационные квадраты, цифровые матрицы, ортогональные латинские квадраты и кубы и др.). Определить количество опытов в зависимости от способа планирования. Например, при использовании ортогональных латинских кубов  $N = p^3$  ( $p$  – количество уровней факторов), при использовании комбинационных квадратов количество опытов зависит от вида квадрата (Приложение 2);
- Составление матрицы планирования.

После проведения экспериментальных исследований необходимо установить связь между факторами и результатом. Влияние компонентов на параметры буровых жидкостей можно определить с использованием корреляционно-регрессионного анализа (линейное уравнение регрессии с той или иной теснотой связи).

Линейное уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + \dots + A_nX_n \quad (2.1)$$

где  $Y$  – результативный или выходной признак;  $X_1, X_2 \dots X_n$  – выходные параметры;  $A_0, A_1, A_2 \dots A_n$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Решение этого уравнения сводится к определению коэффициентов и оценке степени идентичности уравнения экспериментальным данным. На идентичность модели существенно влияет степень

нелинейности. При высокой степени нелинейности необходимо линеализировать уравнение. Например, представить в двойных логарифмических координатах:

$$\lg Y = A_0 + A_1 \lg X_1 + A_2 \lg X_2 + A_3 \lg X_3 + \dots + A_n \lg X_n \quad (2.2)$$

Определение коэффициентов множественной регрессии осуществляется в несколько этапов:

- Составляются корреляционные таблицы.

Число интервалов таблицы:  $K = 1 + 3,32 \lg N$ .

Шаг интервала:  $\Delta Y = (Y_{max} - Y_{min}) / K$ ;  $\Delta X_i = (X_{imax} - X_{imin}) / K$ .

Таблица 2.1

**Корреляционная таблица**

$X_i$		Интервалы изменения $Y$			Частота $v_i(X_i)$
Интервал изменения $X_i$	Среднее значение $X_i$ в интервале	От...до...	От...до...	От...до...	
		Среднее значение $Y$ в интервале ( $Y_j$ )			
От...до...					
От...до...					
От...до...					
Частота $v_i(Y_j)$					

- Определяются математическое ожидание и дисперсии по формулам:

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum Y_i v_i(Y); \quad \bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum Y_i v_i(X_i) \quad (2.3)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^K (Y_i - \bar{Y})^2 v_i(Y); \quad \sigma_{x_i}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X}_i)^2 v_i(X_i) \quad (2.4)$$

- Определяются коэффициенты корреляции ( $r_{yxi}$ ,  $r_{xixj}$ ) и заполняется таблица 2.2:

$$r_{yxi} = \frac{1}{(n-1)\sigma_Y \sigma_{xi}} \sum (Y_i - \bar{Y}_i)(X_i - \bar{X}_i) v_i(YX_i), \quad (2.5)$$



Степень влияния каждого компонента ( $R_{y/x_n}$ ) на конечный результат определяется по формуле:

$$R_{y/x_n} = \frac{A_i \left( \frac{\sum Y_i X_i}{n} - \bar{Y} \bar{X}_i \right)}{\sigma_Y^2} \quad (2.10)$$

Цель работы: Разработать рецептуру буровой жидкости для конкретных геологических условий.

Порядок работы

1. Для заданных геологических условий обосновать тип бурового раствора и определить его качественный состав, границы, уровень и интервалы варьирования компонентов.

2. Выбрать способ планирования и составить матрицу (Таблица 2.3).

3. Приготовить суспензию исходной плотности (в зависимости от пластовых условий и типа бурового раствора).

4. Провести лабораторные исследования и занести результаты в таблицу.

5. Составить уравнения регрессии и определить их коэффициенты, используя таблицы 2.1 и 2.2 и формулы 2.3-2.8.

6. Определить расчетные параметры и установить меру идентичности и степень влияния каждого компонента.

7. По расчетным уравнениям при постоянном содержании компонентов, оказывающих наименьшее влияние на качество бурового раствора (тампоновой или буферной жидкости), построить соответствующие графики и определить оптимальный состав для заданных условий по основному результирующему компоненту (например,  $\min \Phi_{30}$ ).

Таблица 2.3

## Матрица планирования

Компоненты бурового раствора			Параметры бурового раствора		
$X_1$	$X_2$	....	$Y_1$	$Y_2$	....

**ПРИМЕР ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И  
ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Для предупреждения подваливания глинистых пород предполагается использовать классический хлоркалийевый буровой раствор на основе глинистой суспензии следующего состава:

- КССБ (понижитель фильтрации и реологических характеристик) – 3...5%;
- КМЦ (понижитель фильтрации) – 0,5...1,0%;
- Хлорид калия (ингибитор гидратация глин) – 3,0...5,0%;
- Гидроокись калия (щелочной электролит) – 0,5...1,0%;

Принимаем, что каждый из компонентов изменяется по трем уровням, поэтому предпочтительнее использовать для проведения лабораторных исследований латинский куб.

Количество опытов  $N = 3^3 = 27$ .

Заполняем Таблицу 2.4.

Изменение показателя фильтрации отличается от линейной зависимости, поэтому составляем уравнение регрессии в двойных логарифмических координатах.

Таблица 2.4

$X_1$  – КССБ-2;  $X_2$  – КМЦ;  $X_3$  – КСЛ;  $X_4$  – КОН

$X_1/\ln$	$X_2/\ln$	$X_3/\ln$	$X_4/\ln$	$\Phi_{30}/\ln$
3/1,099	0,5/-0,693	3/1,099	0,75/-0,288	26/3,258
3/1,099	0,5/-0,693	4/1,386	0,5/-0,693	32/3,466
3/1,099	0,5/-0,693	5/1,609	1/0	32/3,466
3/1,099	0,75/-0,288	3/1,099	0,5/-0,693	32/3,466

Окончание табл. 2.4

$X_1/\ln$	$X_2/\ln$	$X_3/\ln$	$X_4/\ln$	$\Phi_{30}/\ln$
3/1,099	0,75/-0,288	4/1,386	1/0	40,3/3,689
3/1,099	0,75/-0,288	5/1,609	0,75/-0,288	48/3,871
3/1,099	1/0	3/1,099	1/0	17,6/2,868
3/1,099	1/0	4/1,386	0,75/-0,288	14,4/2,667
3/1,099	1/0	5/1,609	0,5/-0,693	42,2/3,742
4/1,386	0,5/-0,693	3/1,099	1/0	19,2/2,955
4/1,386	0,5/-0,693	4/1,386	0,75/-0,288	16,4/2,797
4/1,386	0,5/-0,693	5/1,609	0,5/-0,693	74,4/4,309
4/1,386	0,75/-0,288	3/1,099	0,75/-0,288	20,8/3,035
4/1,386	0,75/-0,288	4/1,386	0,5/-0,693	16,8/2,821
4/1,386	0,75/-0,288	5/1,609	1/0	24,3/3,178
4/1,386	1/0	3/1,099	0,5/-0,693	16/2,773
4/1,386	1/0	4/1,386	1/0	14,4/2,667
4/1,386	1/0	5/1,609	0,75/-0,288	44/3,784
5/1,609	0,5/-0,693	3/1,099	0,5/-0,693	17,6/2,868
5/1,609	0,5/-0,693	4/1,386	1/0	19,2/2,955
5/1,609	0,5/-0,693	5/1,609	0,75/-0,288	20,8/3,035
5/1,609	0,75/-0,288	3/1,099	1/0	16/2,773
5/1,609	0,75/-0,288	4/1,386	0,75/-0,288	40/3,689
5/1,609	0,75/-0,288	5/1,609	0,5/-0,693	40/3,689
5/1,609	1/0	3/1,099	0,75/-0,288	14,4/2,667
5/1,609	1/0	4/1,386	0,5/-0,693	35,2/3,561
5/1,609	1/0	5/1,609	1/0	24/3,178

Уравнение регрессии:

$$\ln\Phi_{30} = a_0 + a_1\ln X_1 + a_2\ln X_2 + a_3\ln X_3 + a_4\ln X_4$$

Число интервалов:  $K = 1 + 3,32\lg N = 1 + 3,32\lg 27 = 6$

Шаг изменения:

$$\Phi_{30} = (Y_{max} - Y_{min}) / k = (4,309 - 2,667) / 6 = 0,274$$



Таблица 2.5а

Корреляционные таблицы ( $X_1$ - $Y$ )

$X_1$	$Y (\Phi_{30})$						$v(Y)$
	2,667- 2,941	2,941- 3,215	3,215- 3,489	3,489- 3,763	3,763- 4,037	4,037- 4,309	
	2,804	3,078	3,352	3,626	3,90	4,178	
1,099	2	-	4	2	1	-	9
1,386	4	3	-	-	1	1	9
1,609	3	3	-	3	-	-	9
$v(X_1, Y)$	9	6	4	5	2	1	27

Таблица 2.5б

Корреляционные таблицы ( $X_2$ - $Y$ )

$X_2$	$Y (\Phi_{30})$						$v(Y)$
	2,667- 2,941	2,941- 3,215	3,215- 3,489	3,489- 3,763	3,763- 4,037	4,037- 4,309	
	2,804	3,078	3,352	3,626	3,90	4,178	
-0,693	2	3	3	-	-	1	9
-0,288	2	2	1	3	1	-	9
0	5	1	-	2	1	-	9
$v(X_2, Y)$	9	6	4	5	2	1	27

Таблица 2.5в

Корреляционные таблицы ( $X_3$ - $Y$ )

$X_3$	$Y (\Phi_{30})$						$v(Y)$
	2,667- 2,941	2,941- 3,215	3,215- 3,489	3,489- 3,763	3,763- 4,037	4,037- 4,309	
	2,804	3,078	3,352	3,626	3,90	4,178	
1,099	5	2	2	-	-	-	9
1,386	4	1	1	3	-	-	9
1,609	-	3	1	2	2	1	9
$v(X_3, Y)$	9	6	4	5	2	1	27

Таблица 2.5г

**Корреляционные таблицы ( $X_4$ - $Y$ )**

$X_4$	$Y (\Phi_{30})$						$v(Y)$
	2,667- 2,941	2,941- 3,215	3,215- 3,489	3,489- 3,763	3,763- 4,037	4,037- 4,309	
	2,804	3,078	3,352	3,626	3,90	4,178	
-0,693	3	-	2	3	-	1	9
-0,288	3	2	1	1	2	-	9
0	3	4	1	1	-	-	9
$v(X_4Y)$	9	6	4	5	2	1	27

Таблица 2.5д

**Корреляционные таблицы ( $X_1$ - $X_2$ )**

$X_2$	$X_1$			$v(X_1)$
	1,099	1,386	1,609	
-0,693	3	3	3	9
-0,288	3	3	3	9
0	3	3	3	9
$v(X_1X_2)$	9	9	9	27

Таблица 2.5е

**Корреляционные таблицы ( $X_1$ - $X_3$ )**

$X_3$	$X_1$			$v(X_1)$
	1,099	1,386	1,609	
1,099	3	3	3	9
1,386	3	3	3	9
1,609	3	3	3	9
$v(X_1X_3)$	9	9	9	27

Таблица 2.5ж

**Корреляционные таблицы ( $X_1$ - $X_4$ )**

$X_4$	$X_1$			$v(X_1)$
	1,099	1,386	1,609	
-0,693	3	3	3	9
-0,288	3	3	3	9
0	3	3	3	9
$v(X_4X_1)$	9	9	9	27

Таблица 2.5з

**Корреляционные таблицы (X<sub>2</sub>-X<sub>3</sub>)**

X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>			v(X <sub>2</sub> )
	-0,693	-0,288	0	
1,099	3	3	3	9
1,386	3	3	3	9
1,609	3	3	3	9
v(X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> )	9	9	9	27

Таблица 2.5и

**Корреляционные таблицы (X<sub>2</sub>-X<sub>4</sub>)**

X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub>			v(X <sub>2</sub> )
	-0,693	-0,288	0	
-0,693	3	3	3	9
-0,288	3	3	3	9
0	3	3	3	9
v(X <sub>2</sub> X <sub>4</sub> )	9	9	9	27

Таблица 2.5к

**Корреляционные таблицы (X<sub>3</sub>-X<sub>4</sub>)**

X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>			v(X <sub>3</sub> )
	1,099	1,386	1,609	
-0,693	3	3	3	9
-0,288	3	3	3	9
0	3	3	3	9
v(X <sub>4</sub> X <sub>3</sub> )	9	9	9	27

## 1. Математическое ожидание

$$\bar{Y} = 1/N \sum Y_i v(Y) = 1/27 \left( 2,804 \cdot 9 + 3,078 \cdot 6 + 3,352 \cdot 4 + 3,626 \cdot 5 + 3,9 \cdot 2 + 4,178 \cdot 1 \right) = 3,23$$

$$\bar{X}_1 = 1/N \sum \ddot{X}_i v(X_1 Y) = 1/27 (1,099 \cdot 9 + 1,386 \cdot 9 + 1,609 \cdot 9) = 1,365$$

$$\ddot{X}_2 = -0,327; \quad \ddot{X}_3 = 1,365; \quad \ddot{X}_4 = -0,327$$

## 2. Дисперсия

$$\sigma_y^2 = 1/(n-1)\sum\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2 v_{(xy)} =$$

$$= 1/26 \left[ (2,804 - 3,23)^2 \cdot 9 + (3,078 - 3,23)^2 \cdot 6 + (3,352 - 3,23)^2 \cdot 4 + \right. \\ \left. + (3,626 - 3,23)^2 \cdot 5 + (3,9 - 3,23)^2 \cdot 2 + (4,178 - 3,23)^2 \cdot 1 \right] = 0,17$$

$$\sigma_{y'} = 0,41$$

$$\sigma_x^2 = 1/(n-1)\sum\left(X_{li} - \bar{X}_l\right)^2 v_{(x1)} =$$

$$= 1/26 \left[ (1,099 - 1,365)^2 \cdot 9 + (1,386 - 1,365)^2 \cdot 9 + (1,609 - 1,365)^2 \cdot 9 \right] = 0,045$$

$$\sigma_{x1} = 0,212; \sigma_{x2} = 0,29; \sigma_{x3} = 0,212; \sigma_{x4} = 0,29$$

### 3. Коэффициенты корреляции

$$r_{yx1} = \left[ 1/(N-1)\sigma_y\sigma_{x1} \right] \sum\left(Y_i - \bar{Y}\right)\left(X_{1i} - \bar{X}_1\right) v_{(x1y)} =$$

$$= 1/(26 \cdot 0,41 \cdot 0,212) \left[ (2,804 - 3,23)(1,099 - 1,365)2 + \right. \\ \left. + (3,352 - 3,23)(1,099 - 1,365)4 + (3,626 - 3,23)(1,099 - 1,365)2 + \right. \\ \left. + (3,9 - 3,23)(1,099 - 1,365) + \right. \\ \left. + (2,804 - 3,23)(1,386 - 1,365)4 + (3,078 - 3,23)(1,386 - 1,365)3 + \right. \\ \left. + (3,9 - 3,23)(1,386 - 1,365)1 + (4,178 - 3,23)(1,386 - 1,365)1 + \right. \\ \left. + (2,804 - 3,23)(1,609 - 1,365)3 + (3,078 - 3,23)(1,609 - 1,365)3 \right] = 0,395$$

$$r_{yx2} = -0,078; r_{yx3} = 0,55; r_{yx4} = -0,27.$$

$$R_{x_1x_2} = \left[ \frac{1}{(N-1)\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}} \right] \sum (X_{1i} - \bar{X}_1)(X_{2i} - \bar{X}_2) \nu_{(X_1X_2)} =$$

$$= \frac{1}{(26 \cdot 0,212 \cdot 0,29)} \left[ \begin{array}{l} (1,099 - 1,365)(-0,693 + 0,327)3 + \\ + (1,386 - 1,365)(-0,693 + 0,327)3 + \\ + (1,609 - 1,365)(-0,693 + 0,327)3 + \\ + (1,099 - 1,365)(-0,288 + 0,327)3 + \\ + (1,386 - 1,365)(-0,288 + 0,327)3 + \\ + (1,609 - 1,365)(-0,288 + 0,327)3 + \\ + (1,099 - 1,365)(0 + 0,327)3 + \\ + (1,386 - 1,365)(0 + 0,327)3 + \\ + (1,609 - 1,365)(0 + 0,327)3 \end{array} \right] = 6 \cdot 10^{-5}$$

$$r_{x_1x_3} = -0,0012; r_{x_1x_4} = 6 \cdot 10^{-5}; r_{x_2x_3} = 6 \cdot 10^{-5}; r_{x_2x_4} = -0,0012; r_{x_3x_4} = 6 \cdot 10^{-5}$$

#### 4. Корреляционная таблица

	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y$	1	0,395	-0,078	0,55	-0,27
$X_1$		1	$6 \cdot 10^{-5}$	-0,0012	$6 \cdot 10^{-5}$
$X_2$			1	$6 \cdot 10^{-5}$	-0,0012
$X_3$				1	$6 \cdot 10^{-5}$
$X_4$					1

#### 5. Коэффициенты уравнения регрессии

$$r_{yx1}\sigma_y = a_1\sigma_{X1}r_{x1x1} + a_2\sigma_{X2}r_{x1x2} + a_3\sigma_{X3}r_{x1x3} + a_4\sigma_{X4}r_{x1x4}$$

$$r_{yx2}\sigma_y = a_1\sigma_{X1}r_{x2x1} + a_2\sigma_{X2}r_{x2x2} + a_3\sigma_{X3}r_{x2x3} + a_4\sigma_{X4}r_{x2x4}$$

$$r_{yx3}\sigma_y = a_1\sigma_{X1}r_{x3x1} + a_2\sigma_{X2}r_{x3x2} + a_3\sigma_{X3}r_{x3x3} + a_4\sigma_{X4}r_{x3x4}$$

$$r_{yx4}\sigma_y = a_1\sigma_{X1}r_{x4x1} + a_2\sigma_{X2}r_{x4x2} + a_3\sigma_{X3}r_{x4x3} + a_4\sigma_{X4}r_{x4x4}$$

Подставляем значения:

$$0,395 \cdot 0,41 = a_1 \cdot 0,212 \cdot 1 + a_2 \cdot 0,29 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + a_3 \cdot 0,212 \cdot (-0,0012) + a_4 \cdot 0,29 \cdot 6 \cdot 10^{-5}$$

$$-0,078 \cdot 0,41 = a_1 \cdot 0,212 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + a_2 \cdot 0,29 \cdot 1 + a_3 \cdot 0,212 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + a_4 \cdot 0,29 \cdot (-0,0012)$$

$$0,55 \cdot 0,41 = a_1 \cdot 0,212 \cdot (-0,0012) + a_2 \cdot 0,29 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + a_3 \cdot 0,212 \cdot 1 + a_4 \cdot 0,29 \cdot 6 \cdot 10^{-5}$$

$$-0,27 \cdot 0,41 = a_1 \cdot 0,212 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + a_2 \cdot 0,29 \cdot (-0,0012) + a_3 \cdot 0,212 \cdot 6 \cdot 10^{-5} + a_4 \cdot 0,29 \cdot 1$$

Решаем систему уравнений и получаем:

$$a_1 = 0,76; a_2 = -0,11; a_3 = 1,06; a_4 = -0,38$$

$$a_0 = \bar{Y} - \sum a_i X_i = 3,23 - \begin{pmatrix} 0,76 \cdot 1,365 + 0,11 \cdot 0,327 + \\ 1,06 \cdot 1,365 + 0,327 \cdot 0,38 \end{pmatrix} = 0,5854$$

Таким образом,

$$\ln \Phi_{30} = 0,5854 + 0,76 \ln X_1 - 0,11 \ln X_2 + 1,06 \ln X_3 - 0,38 \ln X_4$$

## Библиографический список

1. Булатов А.И. Буровые промывочные и тампонажные растворы: учеб. Пособие для вузов/ А.И. Булатов, П.П. Макаренко, Ю.М. Проселков. М.: Недра, 1999. 424 с.
2. Булатов А. И. Бурение горизонтальных скважин/ А. И. Булатов, Ю. В. Проселков. Краснодар: Советская Кубань. 2008. 424 с.
3. Грей Дж. Р. Состав и свойства буровых агентов/ Дж. Р. Грей, Г. С. Г. Дарли М.: Недра, 1985. 509 с.
4. Каменских С. В. Осложнения и аварии при бурении скважин: Учебное пособие/С. В. Каменских, Ю. Л. Логачев, А. В. Нор [и др.]. Ухта: УГТУ. 2015. 160 с.
5. Мирзаджанзаде А. Х. Анализ и проектирование показателей бурения/ А. Х. Мирзаджанзаде, Н. А. Сидоров, С. А. Ширинзаде. М.: Недра, 1976. 237 с.
6. Подгорнов В.М. Заканчивание скважин = Oil and gas well completion : В 2 ч. : Ч. 1., 2008. 264 с.
7. Подгорнов В. М. Заканчивание скважин = Oil and gas well completion : В 2 ч. : Ч. 2., 2008. 253 с.
8. Резниченко И. Н. Приготовление, обработка и очистка буровых растворов. М.: Недра, 1982. 230 с.
9. Уляшева Н.М. Технология буровых жидкостей: учеб. Пособие для вузов / Н.М. Уляшева: учеб. Пособие для вузов. Ухта. 2008. 164 с.
10. Уляшева Н. М. Физико-химические методы борьбы с осложнениями. Учебное пособие/Н. М. Уляшева, В. Ю. Близиных, Н.Г. Деминская. Ухта: УГТУ. 2016. 119 с.

## Приложение 1

### Значения F-критерия Фишера

$f_2 =$ $n-1$	$f_1 = f$									
	Уровень значимости 0,01									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	$\infty$
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5981	6106	6234	6366
2	98,5	99,0	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,4	99,5	99,5
3	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,5	27,1	26,6	26,1
4	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	14,8	14,4	13,9	13,5
5	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	10,3	9,9	9,5	9,0
6	13,7	10,9	9,8	9,2	8,8	8,5	8,1	7,7	7,3	6,9
7	12,3	9,6	8,5	7,9	7,5	7,2	6,8	6,5	6,1	5,7
8	11,3	8,7	7,6	7,0	6,6	6,4	6,0	5,7	5,3	4,9
9	10,6	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,5	5,1	4,7	4,3
10	10,0	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	5,1	4,7	4,3	3,9
11	9,7	7,2	6,2	5,7	5,3	5,1	4,7	4,4	4,0	3,6
12	9,3	6,9	6,0	5,4	5,1	4,8	4,5	4,2	3,8	3,4
13	9,1	6,7	5,7	5,2	4,9	4,6	4,3	4,0	3,6	3,2
14	8,9	6,5	5,6	5,0	4,7	4,5	4,1	3,8	3,4	3,0
15	8,7	6,4	5,4	4,9	4,6	4,3	4,0	3,7	3,3	2,9
16	8,5	6,2	5,3	4,8	4,4	4,2	3,9	3,6	3,2	2,8
17	8,4	6,1	5,2	4,7	4,3	4,1	3,8	3,5	3,1	2,7
18	8,3	6,0	5,1	4,6	4,3	4,0	3,7	3,4	3,0	2,6
19	8,2	5,9	5,0	4,5	4,2	3,9	3,6	3,3	2,9	2,4
20	8,1	5,9	4,9	4,4	4,1	3,9	3,6	3,2	2,9	2,4
22	7,9	5,7	4,8	4,3	4,0	3,8	3,5	3,1	2,8	2,3
24	7,8	5,6	4,7	4,2	3,9	3,7	3,3	3,0	2,7	2,2
26	7,7	5,5	4,6	4,1	3,8	3,6	3,3	3,0	2,6	2,1
28	7,6	5,5	4,6	4,1	3,8	3,5	3,2	2,9	2,5	2,1
30	7,6	5,4	4,5	4,0	3,7	3,5	3,2	2,8	2,5	2,0
40	7,3	5,2	4,3	3,8	3,5	3,3	3,0	2,7	2,3	1,8
60	7,1	5,0	4,1	3,7	3,3	3,1	2,8	2,5	2,1	1,6
120	6,9	4,8	4,0	3,5	3,2	3,0	2,7	2,3	2,0	1,4
$\infty$	6,6	4,6	3,8	3,3	3,0	2,8	2,5	2,2	1,8	1,0



**Продолжение приложения 1**

$f_2$	$f_1$								
	Уровень значимости 0,05								
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
28	4,2	3,3	2,9	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,6
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
$\infty$	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

## Окончание приложения 1

$f_2$	$f_1$								
	Уровень значимости 0,2								
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$
1	9,5	12,0	13,1	13,7	14,0	14,3	14,9	15,2	15,6
2	3,6	4,0	4,2	4,2	4,3	4,3	4,4	4,4	4,5
3	2,7	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4
5	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1
6	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0
7	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8
8	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7
9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7
10	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6
11	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6
12	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5
13	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5
14	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5
15	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5
16	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4
17	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4
18	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4
19	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4
20	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4
22	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,4
24	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3
26	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3
28	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3
30	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3
40	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
60	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2
120	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,1
$\infty$	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0

## Приложение 2

Схема комбинационного квадрата для четырех факторов в семи вариантах каждого из них

		$X_1$						
		1	2	3	4	5	6	7
$X_2$	$X_3$	1	2	3	4	5	6	7
	$X_4$	1	2	3	4	5	6	7
1	1							
	2							
	3							
	4	■				■		■
	5							
	6							
	7							
2	1							
	2							
	3							
	4	■						
	5							
	6							
	7							
3	1							
	2	■						
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
4	1							
	2							
	3							
	4	■						■
	5							
	6							
	7							
5	1							
	2							
	3							
	4							
	5	■						■
	6							
	7							
6	1							
	2							
	3							
	4	■						
	5							
	6							
	7							
7	1							
	2							
	3							
	4	■						■
	5							
	6							
	7							

## Продолжение приложения 2

Схема комбинационного квадрата для четырех факторов в девяти вариантах каждого из них

	$x_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_2$	$x_3$									
$x_4$	$x_5$									
1		■			■		■		■	
2			■		■		■		■	
3				■			■			■
4		■		■		■		■		■
5			■		■		■		■	
6		■		■		■		■		■
7			■		■		■		■	
8		■		■		■		■		■
9			■		■		■		■	



## Содержание

Задание №1 Оптимизация состава бурового раствора на основе полного факторного анализа.....	3
Задание №2 Экспериментальная разработка рецептуры буровых жидкостей.....	11
Библиографический список.....	23
Приложение 1.....	24
Приложение 2.....	27