

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

БУРОВЫЕ ПРОМЫВОЧНЫЕ И ТАМПОНАЖНЫЕ РАСТВОРЫ

Методические указания по лабораторным работам
по направлению 130500 – Нефтегазовое дело

Ухта, 2007 г.

УДК 622.244

У 51

Уляшева, Н.М. Буровые промывочные и тампонажные растворы [Текст]: метод. указания / Н.М. Уляшева, А.А. Огородник. - Ухта: УГТУ, 2007. - 15 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Буровые промывочные и тампонажные растворы для студентов 5 курса направления 130500 – Нефтегазовое дело.

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

Содержание методических указаний соответствует рабочей учебной программе.

Методические указания рассмотрены и одобрены кафедрой бурения от 12.01.2007 г.

Рецензент: к.т.н., доцент Логачев Ю.Л.

Редактор: к.т.н., доцент Логачев Ю.Л.

В методических указаниях учтены предложения рецензента и редактора.

План 2007 г., позиция 104.

Подписано в печать 7.02.2007 г. Компьютерный набор.

Объем 15 с. Тираж 50 экз. Заказ № 207.

© Ухтинский государственный технический университет, 2007
169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

Отдел оперативной полиграфии УГТУ
169300, г. Ухта, ул. Октябрьская, 13.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Оптимизация состава бурового раствора на основе полного факторного анализа	4
Лабораторная работа № 2. Экспериментальная разработка рецептуры буровых жидкостей.....	9
Приложение 1.....	12
Список литературы	15

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА БУРОВОГО РАСТВОРА НА ОСНОВЕ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА (4 часа)

Для отработки составов буровых растворов используются различные методы планирования экспериментов, в частности:

- полный факторный эксперимент;
- рациональное планирование (комбинационные квадраты, латинские квадраты, ортогональные кубы и т.д.)

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

$$n=p^g, \quad (1)$$

где g – число факторов, p – число уровней изменения факторов. Причем все факторы имеют одинаковое число уровней.

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

$$\text{линейной модели } Y=A_0+A_1X_1+A_2X_2+A_3X_3 \quad (2)$$

или

$$\text{нелинейная модель } Y=A_0+A_1X_1+A_2X_2+A_3X_3+A_{12}X_1X_2+A_{13}X_1X_3+A_{23}X_2X_3, \quad (3)$$

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

$$A_0 = \frac{\sum Y_i}{n},$$

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

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

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).

Таблица 1

№№ опытов	Матрица планирования			Результаты исследований		
	Факторы			$Y_1(\Phi_{30})$	$Y_2(CHCl_1)$	$Y_3(Y.B.)$
	X_1	X_2	X_3			
1.						
2.						
3.						
...						

- Провести необходимое количество опытов согласно матрице планирования и результаты занести в таблицу 1.
- Результаты исследований обработать с использованием корреляционно-регрессионного метода.

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

В таблицу 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 2

Уровни и интервалы варьирования

Факторы	Уровни		Базовый уровень	Интервал варьирования
	min	max		
X_1	X_1^{min}	X_1^{max}	X_1^{cp}	ΔX_1
X_2	X_2^{min}	X_2^{max}	X_2^{cp}	ΔX_2
X_3	X_3^{min}	X_3^{max}	X_3^{cp}	ΔX_3

В эксперименте приняты два уровня изменения факторов: верхний (+1) и нижний (- 1), которые 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 3).

Таблица 3

Формализованная матрица планирования

№№ опытов	Факторы						Y
	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	

Таким образом, для подсчета коэффициента A_1 , используются вектор - X_1 , а для A_2 – вектор – столбец X_2 и т.д.

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

Используя таблицу 3, можно определить A_i по формуле:

$$A_i = \frac{\sum (X_{ij} Y_j)}{n}, \quad (4)$$

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

ПРИМЕР: ПАА (X_1): 0,2; 0,4; 0,6%
 Глино порошок (X_2): 2, 3, 4%
 Количество опытов - 9

Таблица 1

№№ опытов	Матрица планирования		Ф ₃₀ (Y)
	Факторы		
	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
			$\Sigma Y = 94,3$

Составляем уравнение регрессии $Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_{12} X_1 X_2$. Для определения коэффициентов заполняем таблицы 2 и 3.

Таблица 2

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	1,0

Составляем формализованную матрицу.

Таблица 3

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

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

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

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

$$Y_1 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,2 - 0,52 \cdot 2 = 9,48$$

$$Y_2 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,4 - 0,52 \cdot 2 = 9,50$$

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

$$Y_1 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,2 - 0,52 \cdot 3 = 8,96$$

$$Y_2 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,4 - 0,52 \cdot 3 = 8,98$$

$$Y_3 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,6 - 0,52 \cdot 3 = 9,00$$

$$Y_1 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,2 - 0,52 \cdot 4 = 8,44$$

$$Y_2 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,4 - 0,52 \cdot 4 = 8,46$$

$$Y_3 = 10,5 + 0,1 \cdot 0,6 - 0,52 \cdot 4 = 8,48$$

6. Адекватность полученной модели оцениваем по критерию Фишера F

$$F = \frac{S^2_{ag}}{S^2\{Y\}}, \quad (5)$$

где S^2_{ag} – дисперсия адекватности; $S^2\{Y\}$ – дисперсия воспроизводимости.

$$S^2_{ag} = \frac{\sum_1^n (Y_g - Y_i)^2}{f} \quad \text{и} \quad S^2\{Y\} = \frac{\sum_1^n (Y_g - Y')^2}{n-1}, \quad (6)$$

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

$$S^2_{ag} = \frac{3,686 + 4,410 + 5,198 + 3,386 + 3,336 + 1,440 + 1,850 + 0,884 + 5,856}{6} = 5,01$$

$$S^2\{Y\} = \frac{0,81 + 1,21 + 1,69 + 0,09 + 4,41 + 0,09 + 0,49 + 1,21 + 0,16}{8} = 1,27$$

$$F = \frac{5,01}{1,27} = 3,94$$

Сравнивая вычисленное значение F с табличным [см. Приложение 1] при заданном уровне значимости, определяют адекватность модели.

Уровень значимости 0,20 - $F_{табл.} = 1,9$

Уровень значимости 0,05 - $F_{табл.} = 3,6$

Уровень значимости 0,01 - $F_{табл.} = 6,4$

Если $F \leq F_{табл.}$, то принятая модель применима.

7. Построить графики изменения параметров бурового раствора от компонентного состава, т.е. $Y = f(X_i)$.

Например, $Y = f(X_1)$ при $X_2 = const$, $X_3 = const$ (см. рисунок 1)

8. Учитывая заданный интервал значений параметра Y и используя графики, определить оптимальное содержание компонентов.

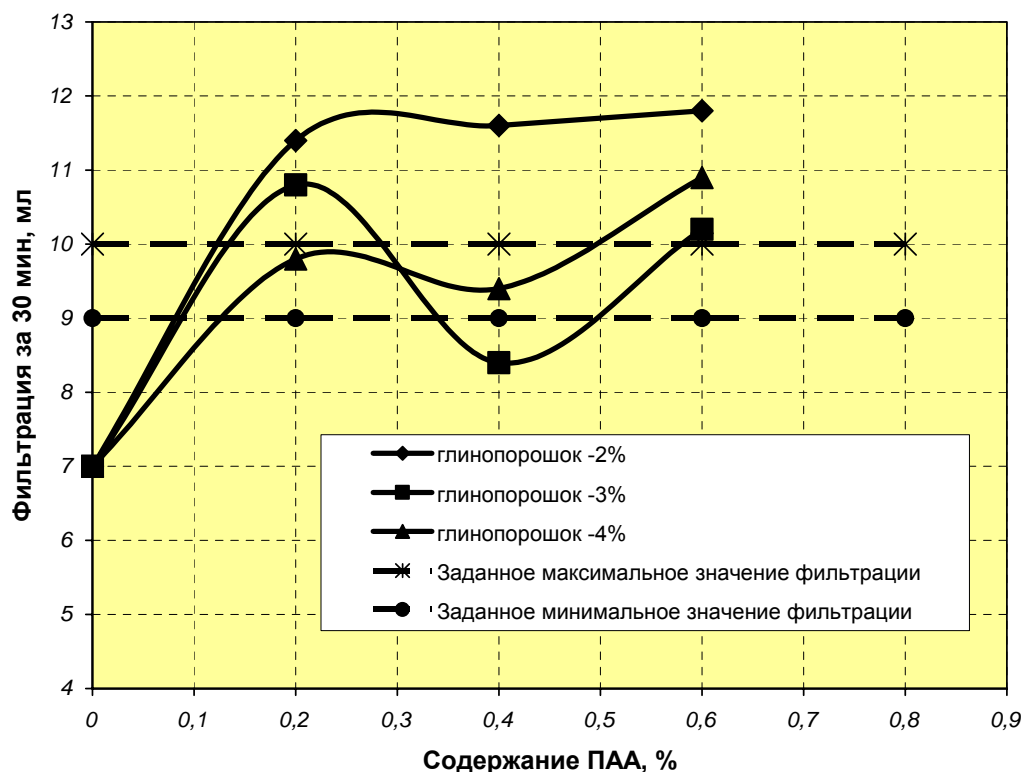


Рисунок 1 – График изменения фильтрационных свойств

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ БУРОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ (10 часов)

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

При применении рационального планирования экспериментов 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 др.);
- 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 теснотой связи).

Линейное уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_nX_n, \quad (1)$$

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.

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:

$$\lg Y = A_0 + A_1 \lg X_1 + A_2 \lg X_2 + \dots + A_n \lg X_n, \quad (2)$$

Определение коэффициентов множественной регрессии осуществляется в несколько этапов:

- составляются корреляционные таблицы.

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

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

Таблица 1

X_i		Интервалы изменения Y			Частота $v_i(X_i)$
Интервал изменения X_i	Среднее значение X_i в интервале	Среднее значение Y в интервале (Y_j) и т.д.			

Частота - $v_i(Y)$.

- определяются математическое ожидание и дисперсии по формулам:

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum Y_i v_i(Y); \quad \bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum X_i v_i(X_i) \quad (3)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^K (Y_i - \bar{Y})^2 v_i(Y); \quad \sigma_{X_i}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X}_i)^2 v_i(X_i) \quad (4)$$

- определяются коэффициенты корреляции ($\gamma_{YX_i}, \gamma_{X_i X_j}$) и заполняется таблица 2:

$$\gamma_{YX_i} = \frac{1}{(n-1)\sigma_Y \sigma_{X_i}} \sum (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X}_i) v_i(YX_i), \quad (5)$$

где $v_i(YX_i)$ – частота действия X_i с результатом Y .

$$\gamma_{X_i X_j} = \frac{1}{(n-1)\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \sum (X_i - \bar{X}_i)(X_j - \bar{X}_j) v(X_i X_j), \quad (6)$$

где $v(X_i X_j)$ – частота пересечения факторов.

Например, $\gamma_{X_1 X_2} = \frac{1}{(n-1)\sigma_{X_1} \sigma_{X_2}} \sum (X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2) v(X_1 X_2)$

Таблица 2

Фактор	Y	X_1	X_2	...
Y	I	γ_{YX_1}	γ_{YX_2}	
X_1		I	$\gamma_{X_1 X_2}$	
X_2			I	
...				

- вычисляются коэффициенты уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} \gamma_{YX_1} \sigma_Y &= A_1 \sigma_{X_1} + A_2 \gamma_{X_1 X_2} \sigma_{X_2} + A_3 \gamma_{X_1 X_3} \sigma_{X_3} + \dots + A_n \gamma_{X_1 X_n} \sigma_{X_n}; \\ \gamma_{YX_2} \sigma_Y &= A_1 \gamma_{X_2 X_1} \sigma_{X_1} + A_2 \sigma_{X_2} + A_3 \gamma_{X_2 X_3} \sigma_{X_3} + \dots + A_n \gamma_{X_2 X_n} \sigma_{X_n}; \\ &\dots \\ \gamma_{YX_n} \sigma_Y &= A_1 \gamma_{X_n X_1} \sigma_{X_1} + A_2 \gamma_{X_n X_2} \sigma_{X_2} + A_3 \gamma_{X_n X_3} \sigma_{X_3} + \dots + A_n \sigma_{X_n}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$A_0 = Y - \sum A_i \bar{X}_i \quad (8)$$

После получения уравнения регрессии устанавливается степень соответствия реальным условиям с использованием параметра «мера идентичности» ($Q\{Y\}$):

$$Q\{Y\} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{расчi} - Y)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{расчi} - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

«Мера идентичности» $Q\{Y\}$ должна стремиться к 1.

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

$$R_{Y/Xn} = \frac{A_i \left(\frac{\sum Y_i X_i}{n} - \bar{Y} \bar{X}_i \right)}{\sigma_Y^2} \quad (10)$$

Цель работы: Разработать рецептуру бурового раствора для конкретных геологических условий.

Порядок работы

1. Для заданных геологических условий обосновать тип бурового раствора и определить его качественный состав и границы, уровень и интервалы варьирования компонентов.
2. Выбрать способ и составить матрицу планирования.
3. Приготовить глинистую суспензию исходной плотности (в зависимости от пластовых условий и типа бурового раствора).
4. Провести лабораторные исследования согласно матрице планирования (таблица 3).
5. Составить уравнения регрессии и определить их коэффициенты, используя таблицу 1 и формулы 3 - 7.
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, построить графики и определить оптимальный состав для заданных условий по основному компоненту (например, по $\min \Phi_{30 \text{ мин}}$).

Таблица 3

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

Значения F-критерия Фишера

f ₂	f ₁									
	Уровень значимости 0,01									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5981	6106	6234	6366
2	98,5	99,0	99,2	99,3	99,3	99,4	99,3	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
∞	6,6	4,6	3,8	3,3	3,0	2,8	2,5	2,2	1,8	1,0

f ₂	f ₁								
	Уровень значимости 0,05								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
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
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

f ₂	f ₁								
	Уровень значимости 0,20								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
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
∞	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0

Примечание: *f₁=f, f₂=n-1

f – число степеней свободы, n – количество опытов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грей Дж. Р., Дарли Г. С. Г. Состав и свойства буровых агентов. - М., Недра, 1985, 509 с.
2. Мирзаджанзаде А. Х., Сидоров Н. А., Ширинзаде С. А. Анализ и проектирование показателей бурения. – М., Недра, 1976, 237 с.
3. Резниченко И. Н. Приготовление, обработка и очистка буровых растворов. – М., Недра, 1982, 230 с.

