Научная статья

УДК 622.243.24

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-448-457>

Исследование совместного влияния некоторых факторов на очистку ствола скважины

Анатолий Иванович Ламбин^а^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Изучение поведения транспорта шлама в различных условиях с помощью экспериментальных наблюдений и вычислительной гидродинамики является основным методом анализа влияния параметров шлама, параметров жидкости и рабочих параметров на очистку скважин. Несмотря на обилие моделей и рекомендаций исследователей, остаются проблемы с точностью определения высоты слоя шлама, критической скорости и других ключевых параметров, что усложняет задачу эффективного решения проблемы очистки ствола скважины. Целью представленного исследования являлось проведение анализа моделей, получаемых с помощью организации полного факторного эксперимента и дисперсионного анализа для выявления влияния таких факторов, как вязкость бурового раствора, скорость его течения в условиях кольцевого пространства и угол наклона скважины на степень выноса модельного шлама. Подобные исследования проводятся с использованием специальных устройств, называемых потоковыми контурами. В ходе проведения работы экспериментальные данные были взяты из литературных источников. Для организации полного факторного эксперимента данные зависимой величины были сведены в комбинационный квадрат, что упростило кодирование факторных величин. После постановки полного факторного эксперимента автором получены модели, позволившие оценить вклад изучаемых факторов в процесс удаления продуктов разрушения в рамках тех их интервалов, которые были определены в ходе постановки задач исследования. Полученные модели позволили установить степень влияния каждого из факторов на изучаемый процесс. Результаты проведенного далее дисперсионного анализа подтвердили указанную степень влияния и определили ранг каждого из факторов в процентном соотношении.

Ключевые слова: скважина, транспорт шлама, факторный анализ, дисперсия

Для цитирования: Ламбин А. И. Исследование совместного влияния некоторых факторов на очистку ствола скважины // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 448–457. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-448-457>.

Original article

Studying joint influence of a number of factors on borehole cleaning

Anatoliy I. Lambin^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Studying the behavior of cuttings transport under various conditions using experimental observations and computational fluid dynamics is the main method for analyzing the influence of cuttings, fluid and operating parameters on well cleaning. Despite the existing abundant models and recommendations of researchers, still there are problems with the accuracy of determining the cuttings layer height, critical velocity and other key parameters, which complicates the task of effective solution of the problem of borehole cleaning. The purpose of the study is to analyze the models obtained via the organization of a full factorial experiment and variance analysis to identify the influence of such factors as viscosity and flow rate of the drilling fluid in the annular space and the inclination angle of the well on the degree of cuttings transport. The studies of the kind are carried out using special devices called flow loops. Experimental data were taken from literature sources. To organize a full factorial experiment, the data of the dependent variable were combined into a combinational square, which simplified the coding of factor values. After setting the full factorial experiment, the models were obtained that made it possible to assess the contribution of the studied factors to the process of destruction product removal within the intervals determined while setting the research tasks. The obtained models allowed to determine the influence degree of each of the factors on the process under investigation. The results of the succeeding analysis of variance confirmed the indicated degree of influence and determined the rank of each of the factors in percentage.

© Ламбин А. И., 2021

Keywords: well, cuttings transport, factorial analysis, variance

For citation: Lambin A. I. Studying joint influence of a number of factors on borehole cleaning. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):448-457. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-448-457>.

Введение

Удаление продуктов разрушения в процессе бурения является одной из проблемных задач очистки ствола скважины при бурении наклонно-направленных скважин [1]. Проблема удаления шлама при наклонно-направленном бурении связана с гравитационными силами. Шлам под действием силы тяжести оседает на нижней стенке скважины, эффективность его транспорта потоком жидкости снижается. Осложнения, возникающие при неэффективном транспорте шлама, включают в себя прихват бурильной колонны, износ долота, снижение скорости проходки, высокий крутящий момент и сопротивление, а также многое другое. Изучению указанной проблемы посвящено множество исследовательских работ, в основе которых лежит осуществление численного моделирования [2] или постановка эксперимента на устройствах в виде потоковых петель, имитирующих кольцевое пространство скважин, через которое пропускаются испытываемые жидкости, несущие в себе модельный шлам¹ [3–5].

В настоящее время исследования смещаются в сторону экспериментальных подходов, целью которых является объяснение переноса шлама при всех углах наклона, особенно в наклонно-направленных скважинах с горизонтальным окончанием [6, 7]. Все проточные контуры имеют прозрачную часть кольцевого рабочего участка, что позволяет наблюдать за механизмом транспортировки шлама. Эти контуры потока предоставляют необходимые экспериментальные данные [8–10].

Результаты исследований по транспортировке выбуренной породы интегрируются в программу бурения, часть проблем с очисткой ствола скважины устраняется, что способствует увеличению производительности бурения [11,12].

К сожалению, в приведенных исследованиях влияющие факторы в большинстве случаев оцениваются отдельно, что не дает возможности определить влияние взаимосвязи факторов на откликовую величину.

Материалы и методы исследования

В наших предыдущих работах² приведен анализ результатов зарубежных исследований [13] с целью определения влияния изучаемых факторов в их совокупности на зависимую величину. Для этого экспериментальные данные были представлены в виде латинского квадрата (рис. 1) для удобства составления полного факторного плана типа 2³ [14–16].

С учетом проведенного нами ранее анализа в ходе представленного в данной работе исследования в качестве независимых переменных были приняты вязкость бурового раствора, угол наклона потоковой петли и скорость потока жидкости. При составлении моделей все данные были подразделены на две группы по вязкости раствора. В первую группу вошли данные, относящиеся к интервалу вязкости от 1 до 2,5 сР, а во вторую группу – данные, относящиеся к интервалу вязкости от 2,5 до 6 сР.

По первой группе построена матрица планирования эксперимента (таблица).

В ходе составления таблицы было проведено усреднение построчных данных, определена их дисперсия и выявлена их однородность по критерию Кокрена. Здесь же показаны данные, вычисленные по модели, и введенные в квадрат разности между измеренными и вычисленными по модели данными.

Дисперсия воспроизводимости опыта $S^2(Y) = \frac{171}{8} = 21,375$. Отсюда среднеквадратическая ошибка эксперимента составляет

¹ Ламбин А. И. Вынос продуктов разрушения при бурении наклонно-направленных скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 1. С. 75–79.

² Там же.

$\varphi \backslash v$	1,84	2,21	2,58	3,31	μ
60	26 34 29	50 56 45	60 60 52	73 81 70	1 2,5 6
70	30 40 30	59 62 50	70 75 55	81 83 71	1 2,5 6
80	35 42 32	62 68 48	75 77 52	88 88 70	1 2,5 6
90	38 44 38	70 72 50	83 88 65	97 98 81	1 2,5 6

Рис. 1. Комбинационный квадрат

φ – угол наклона, град.; v – скорость потока жидкости, м/с; μ – вязкость жидкости, сР

Fig. 1. Combination square

φ – inclination angle, degree; v – fluid flow rate, m/s; μ – fluid viscosity, cP

Матрица планирования и расчет дисперсий

Planning matrix and variance calculation

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\bar{Y}$	$\sum S_i^2$	$\hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	26	30	28	8	28,6	0,36
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	35	38	36,5	4,5	38,6	4,41
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	73	81	77	32	78,4	1,96
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	88	97	92,5	40,5	88,4	16,81
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	34	40	38	32	34,1	15,21
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	42	44	43	2	44,1	1,21
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	81	83	82	2	83,9	3,61
8	1	1	1	1	1	1	1	1	88	98	93	50	93,9	0,81
Σ	8	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–	171	–	44,38

$S(Y) = 4,62$. Среднеквадратическая дисперсия ошибки определения коэффициентов регрессии определяется как $S(b_i) = \frac{S(Y)}{\sqrt{Nm}} = \frac{4,26}{\sqrt{8 \cdot 2}} = 1,156$. Коэффициенты уравнения регрессии определялись по формуле $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$ [12]. Поделив полученные таким образом коэффициенты регрессии на среднеквадратическую ошибку определения коэффициентов и сравнив частное от деления с критерием Стьюдента (t -критерием), равным для нашего случая 2,306, окончательно получаем уравнение регрессии:

$$Y = 61,25 + 5,0X_1 + 24,88X_2 + 2,75X_3.$$

Дисперсия адекватности определяется по формуле $S_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \sum (Y - \hat{Y})^2 = \frac{2}{8-4} 44,38 = 22,19$. По критерию Фишера (F -критерию)

определяем адекватность модели $F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2(Y)} = \frac{22,19}{21,375} = 1,04$. Так как это значение меньше табличного, гипотеза адекватности модели не отвергается.

По второй группе данных получена следующая модель:

$$Y_1 = 58,19 + 3,44X_1 + 22,1X_2 - 5,6X_3.$$

Путем анализа моделей, полученных после постановки полного факторного эксперимента, выявлены следующие соотношения:

- вязкость жидкости в интервале 1–2,5 сР способствует удалению продуктов разрушения, а в интервале 2,5–6 сР препятствует ему;
- рост угла наклона незначительно улучшает очистку скважины;
- скорость потока является определяю-

щим фактором в процессе удаления из скважины продуктов разрушения;

– с изменением вклада в процесс одного из факторов (в данном случае вязкости) меняются вклады остальных.

Здесь следует отметить, что при проведении полного факторного эксперимента получается модель в нормированных координатах. Это обстоятельство несколько удлинит интерпретацию получаемых уравнений.

На базе экспериментальных данных [10] проведен дисперсионный анализ, который дает оценки модели по естественным координатам.

Суть дисперсионного анализа, иногда называемого ANOVA (*от англ. analysis of variance*), заключается в изучении влияния одной или нескольких независимых переменных, обычно именуемых факторами, на зависимую переменную [14, 17]. При этом предполагается нормальное распределение значений изучаемого признака, равенство дисперсий в сравниваемых генеральных совокупностях и случайный и независимый характер выборки. Дисперсионный анализ в статистике базируется на следующем законе: сумма квадратов отклонений объединенной выборки равна сумме квадратов внутригрупповых отклонений и сумме квадратов межгрупповых отклонений. Для исследования используется критерий Фишера для установления значимости различия межгрупповых дисперсий от внутригрупповых.

Результаты исследования и их обсуждение

По критерию Фишера в среде MATLAB нами был проведен предварительный анализ значимости межгрупповых дисперсий (рис. 2).

По показателю P_{rob} (F-statistic) $< 0,05$ была определена значимость эффектов или степень

доверия выводам [18]. Все три эффекта значимы ($p < 0,05$), то есть с вероятностью 95 % вывод распространяется на все объекты. В этом случае нулевая гипотеза отвергается. Нулевая гипотеза говорит о том, что между средними в генеральной совокупности нет различий. Здесь под X_1 закодирована вязкость жидкости, под X_2 – угол наклона поточковой петли, под X_3 – скорость течения жидкости.

По критерию Фишера можно судить о вкладе каждого фактора в общий процесс очистки скважины. Из значений, приведенных на рис. 2, видно, что наибольший эффект осуществляется за счет скорости движения жидкости, затем за счет ее вязкости и в последнюю очередь за счет угла наклона. В процентном выражении эти эффекты имеют следующее соотношение: 74 %, 16 % и 10 % соответственно.

Следует отметить, что в реальной скважине положительного эффекта от угла наклона быть не должно. Большинство исследователей отмечают, что наибольшее сопротивление выносу шлама оказывают углы в 40–60° [2]. При исследованиях в потоковых петлях углы устанавливаются дискретно и в некоторых интервалах углов возможны положительные эффекты, как и в данном исследовании. В реальной наклонно-направленной скважине с горизонтальным окончанием критический угол в 40–60° уже присутствует в составе гаммы непрерывных углов от 0 до 90°, что и будет доказывать отсутствие положительного эффекта.

Далее более подробный дисперсионный анализ осуществляется с помощью пакета STATISTICA [19].

Степень отклонения распределения показателя очистки скважины от нормального изображена на рис. 3.

Analysis of Variance					
Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
X1	1410.2	2	705.08	6.17	0.0048
X2	1240.6	3	413.54	3.62	0.0216
X3	9528.8	3	3176.27	27.8	0
Error	4342.4	38	114.27		
Total	16714.5	46			

Рис. 2. Дисперсионный анализ, выполненный в среде MATLAB
Fig 2. Analysis of variance performed in MATLAB

Рис. 3. Гистограмма распределения процентного соотношения шлама

P – вероятность входа в нормальный закон; *D* – дисперсия

Fig. 3. Cuttings percentage distribution histogram

P – probability of entering the normal law; *D* – variance

Как видно из гистограммы, распределение процентного соотношения шлама в нашей выборке несколько отличается от нормального (в середине – «провал»). Генеральное среднее составляет 45,9683, генеральное стандартное отклонение – 30,7487. Примерно такие же площади занимают гистограммы эффектов под кривой нормального распределения. Эти оценки позволяют использовать параметрический метод, основанный на предположении о нормальном распределении.

Результаты дисперсионного анализа, проведенного с использованием программы STATISTICA, показаны на рис. 4. Кодирование влияющих факторов проведено следующим образом: *A* – вязкость жидкости; *B* – угол наклона потоковой петли; *C* – скорость потока жидкости.

Как видно из рис. 4, при проведении более расширенного анализа результатов исследования появились дисперсии, оценивающие взаимодействие факторов, но тенденция осталась та же. Оценки по критерию Фишера несколько снизились, но их соотношения остались прежними.

На рис. 5 показано детальное распределение дисперсии взаимодействия вязкости и скорости движения жидкости.

Таким образом, анализ, проведенный в этой среде, дает большие возможности интерпретации результатов дисперсионного анализа.

Программа STATISTICA обладает также расширенными возможностями визуализации дисперсионного анализа [20]. К примеру, на рис. 6 показано распределение влияющих факторов и откликовой переменной рассматриваемой задачи.

Effect	Effective hypothesis decomposition			
	SS	Degr. of Freedom	MS	F
Intercept	174950.0	1	174950.0	772.9748
A	1663.6	2	831.8	3.6752
B	1681.5	3	560.5	2.4764
C	14773.2	3	4924.4	21.7573
A*B	277.6	6	46.3	0.2044
A*C	540.2	6	90.0	0.3978
B*C	107.7	9	12.0	0.0529
A*B*C	166.9	18	9.3	0.0410
Error	452.7	2	226.3	

Рис. 4. Дисперсионный анализ, выполненный в программе STATISTICA

Fig. 4. Analysis of variance performed in STATISTICA

Cell No.	A*C; Unweighted Means Effective hypothesis decomposition						
	A	C	D Mean	D Std.Err.	D -95,00%	D +95,00%	N
1	1	1	27,91667	6,866788	-1,62874	57,4621	6
2	1	2	60,50000	7,522189	28,13463	92,8654	4
3	1	3	72,75000	7,522189	40,38463	105,1154	4
4	1	4	81,25000	7,522189	48,88463	113,6154	4
5	2	1	40,50000	7,522189	8,13463	72,8654	4
6	2	2	64,75000	7,522189	32,38463	97,1154	4
7	2	3	75,25000	7,522189	42,88463	107,6154	4
8	2	4	86,75000	7,522189	54,38463	119,1154	4
9	3	1	32,25000	7,522189	-0,11537	64,6154	4
10	3	2	48,00000	7,522189	15,63463	80,3654	4
11	3	3	55,75000	7,522189	23,38463	88,1154	4
12	3	4	73,75000	7,522189	41,38463	106,1154	4

Рис. 5. Распределение дисперсии взаимодействия вязкости и скорости движения жидкости
Fig. 5. Distribution of fluid viscosity and velocity interaction variance

Рис. 6. Последовательный график изменчивости факторов и откликовой величины
Fig. 6. Sequential graph of factors and response magnitude variability

На рис. 7 отображена последовательность изменения процентного соотношения извлеченного шлама. Из графика видно, что максимальный эффект достигается при вязкости жидкости, равной 2 сР, угле наклона в 90° и максимальной скорости движения жидкости. Как отмечалось ранее, в реальной скважине угол ее наклона в силу его непрерывности будет оказывать отрицательное влияние на вынос шлама. Также в переводе на реальную скважину видно, что увеличение вязкости свыше 2 сР приводит к уменьшению эффек-

тивности выноса продуктов разрушения. В литературных источниках это явление объясняется сменой турбулентного режима на переходный или даже ламинарный режим под действием увеличения вязкостных сил.

Кроме всего прочего, программа позволяет строить трехмерные графики совместного влияния факторов на откликовую величину. К примеру, на рис. 8 показано влияние вязкости и скорости потока жидкости на вынос шлама в его процентном соотношении.

Рис. 7. График изменчивости откликовой величины
D – дисперсия; нижняя шкала – структура вложенности факторов
Fig. 7. Graph of response magnitude variability
D – variance; lower scale – factor nesting structure

Рис. 8 Зависимость среднего эффекта очистки от совместного влияния вязкости и скорости потока жидкости
E – эффективность, μ – вязкость; V – скорость потока
Fig. 8. Dependence of the average cleaning effect on the combined influence of fuel viscosity and flow rate
E – efficiency, μ – viscosity; V – flow rate

Заключение

Таким образом, совместное рассмотрение факторов после постановки полного факторного эксперимента определяет одновременную изменчивость влияния факторов в процессе при изменении хотя бы одного из них.

При использовании дисперсионного анализа требования к экспериментальным данным более строгие, чем при использовании полного факторного эксперимента. В отличие от полного факторного эксперимента дисперсионный анализ дает оценки модели по естественным координатам, а не по нормированным.

При дисперсионном анализе требуется проверка совокупности данных на принадлежность к тому или иному распределению. Далее требуется проверка на нулевую гипотезу, и только после этого проводится более детальный анализ. Значимость каждого фактора и его влияния на другие факторы можно определить по критерию Фишера.

При исследованиях с потоковыми петлями выводы, касающиеся фактора «угол наклона», должны делаться отдельно от совокупности его с другими факторами.

Список источников

1. Крылов В. И., Крещул В. В. Особенности технологии промывки горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. 2001. № 6. С. 36–40.
2. Hamoudi M., Abdulwahhab A., Khalid A., Authman D., Mohammed Ameen R. Transportation of cuttings in inclined wells // UKH Journal of Science and Engineering. 2018. Vol. 2. Iss. 2. P. 3–13. <https://doi.org/10.25079/ukhjse.v2n2y2018.pp3-13>.
3. Alsaihati A., Elkatatny S., Abdurraheem A. Real-time prediction of equivalent circulation density for horizontal wells using intelligent machines // ACS Omega. 2021. Vol. 6. Iss. 1. P. 934–942. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05570>.
4. Leporini M., Marchetti B., Corvaro F., di Giovine G., Polonara F., Terenzi A. Sand transport in multiphase flow mixtures in horizontal pipeline: an experimental investigation // Petroleum. 2019. Vol. 5. Iss. 2. P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.04.004>.
5. Qu J., Yan T., Sun X., Li Z., Li W. Decaying swirl flow and particle behavior through the hole cleaning device for horizontal drilling of fossil fuel // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 3. P. 336. <https://doi.org/10.3390/en12030336>.
6. Wei N., Meng Y., Li G., Wan L., Xu Z., Xu X., et al. Cuttings transport models and experimental visualization of underbalanced horizontal drilling // Mathematical Problems in Engineering. 2013. P. 764782. <https://doi.org/10.1155/2013/764782>.
7. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://onepetro.org/SPENAIC/proceedings-abstract/15NAIC/AII-15NAIC/SPE-178263-MS/184378> (22.08.2021).
8. Okrajni S., Azar J. J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // SPE Drilling Engineering. 1986. Vol. 1. Iss. 4. P. 297–308. <https://doi.org/10.2118/14178-PA>.
9. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells // The Open Fuels & Energy Science Journal. 2013. Vol. 6. P. 9–17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.
10. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular when reaming the hole in deepwater drilling // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2016. Vol. 52. Iss. 1. P. 70–75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.
11. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid // Advances in Petroleum Exploration and Development. 2017. Vol. 14. Iss. 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.3968/9658>.
12. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. P. 1096–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.
13. Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A. S. I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2012. Vol. 2. P. 149–156. <https://doi.org/10.1007/s13202-012-0031-0>.
14. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента / пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого, Е. В. Марковой. М.: Мир, 1981. 516 с.
15. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
16. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. [и др.]. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / пер. с нем. Г. А. Фомина, Н. С. Лецкой. М.: Мир, 1977. 552 с.
17. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / пер. с англ. Б. А. Севастьянова, В. П. Чистякова. М.: Наука, 1980. 512 с.
18. Субботина А. В., Гржибовский А. М. Описательная статистика и проверка нормального распределения количественных данных // Экология человека. 2014. № 2. С. 51–57.
19. Щукова К. Б. Применение однофакторного анализа для оценки производительности системы с помощью программы STATISTICA // Современная техника и технологии. 2015. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <https://technology.snauka.ru/2015/12/8849> (22.08.2021).
20. Algina J., Olejnik S. Conducting power analyses for ANOVA and ANCOVA in between-subjects designs // Evaluation & The Health Professions. 2003. Vol. 26. Iss. 3. P. 288–314. <https://doi.org/10.1177/0163278703255248>.

References

1. Krylov V. I., Kretsul V. V. Features of flushing technology for horizontal wells. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2001;6:36-40. (In Russ.).
2. Hamoudi M., Abdulwahhab A., Khalid A., Authman D., Mohammed Ameen R. Transportation of cuttings in inclined wells. *UKH Journal of Science and Engineering*. 2018;2(2):3-13. <https://doi.org/10.25079/ukhjse.v2n2y2018.pp3-13>.
3. Alsaihati A., Elkatatny S., Abdurraheem A. Real-time prediction of equivalent circulation density for horizontal wells using intelligent machines. *ACS Omega*. 2021;6(1): 934-942. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05570>.
4. Leporini M., Marchetti B., Corvaro F., di Giovine G., Polonara F., Terenzi A. Sand transport in multiphase flow mixtures in horizontal pipeline: an experimental investigation. *Petroleum*. 2019;5(2):161-170. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.04.004>.
5. Qu J., Yan T., Sun X., Li Z., Li W. Decaying swirl flow and particle behavior through the hole cleaning device for horizontal drilling of fossil fuel. *Energies*. 2019;12(3):336.

<https://doi.org/10.3390/en12030336>.

6. Wei N., Meng Y., Li G., Wan L., Xu Z., Xu X., et al. Cuttings transport models and experimental visualization of underbalanced horizontal drilling. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;764782. <https://doi.org/10.1155/2013/764782>.

7. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos; 2015. Available from: <https://onepetro.org/SPENAIC/proceedings-abstract/15NAIC/AII-15NAIC/SPE-178263-MS/184378> [Accessed 22^d August 2021].

8. Okrajni S., Azar J. J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*. 1986;1(4):297-308. <https://doi.org/10.2118/14178-PA>.

9. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2013; 6:9-17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.

10. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular when reaming the hole in deepwater drilling. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016;52(1):70-75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.

11. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid. *Advances in Petroleum Exploration and Development*. 2017;14(1):55-61. <https://doi.org/10.3968/9658>.

12. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34:1096-1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.

13. Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A. S. I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2012;2:149-156. <https://doi.org/10.1007/s13202-012-0031-0>.

14. Johnson N. L., Leone F. C. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences. 1977. 516 p. (Russ. ed.: *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: metody planirovaniya eksperimenta*. Moscow: Mir; 1981. 516 p.).

15. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskii Yu. V. *Experiment planning when searching for optimal conditions*. Moscow: Nauka; 1976. 279 p. (In Russ.).

16. Hartmann K., Lezki E., Schäfer W., et al. Planning an experiment in the study of technological processes. 1974. 552 p. (Russ. ed.: *Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov*. Moscow: Mir; 1977. 552 p.).

17. Scheffé H. The analysis of variance. 1959. 512 p. (Russ. ed.: *Dispersionnyi analiz*. Moscow: Nauka; 1980. 512 p.).

18. Subbotina A. V., Grijbovski A. M. Descriptive statistics and normality testing for quantitative data. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2014;2:51-57. (In Russ.).

19. Shchukova K. B. The use of single-factor analysis to assess the performance of the system using STATISTICA. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern technics and technologies*. 2015;12. Available from: <https://technology.snauka.ru/2015/12/8849> [Accessed 22^d August 2021].

20. Algina J., Olejnik S. Conducting power analyses for ANOVA and ANCOVA in between-subjects designs. *Evaluation & The Health Professions*. 2003;26(3):288-314. <https://doi.org/10.1177/0163278703255248>.

Информация об авторе / Information about the author

Ламбин Анатолий Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
alambin@ex.istu.edu.
Anatoly I. Lamin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
alambin@ex.istu.edu.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 01.07.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 29.11.2021.

The article was submitted 01.07.2021; approved after reviewing 26.10.2021; accepted for publication 29.11.2021.