МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ ВЫБУРЕННОЙ ПОРОДЫ ПРИ НАКЛОННОМ И ГОРИЗОНТАЛЬНОМ БУРЕНИИ

CUTTINGS TRANSPORTATION MODELING IN INCLINED AND HORIZONTAL DRILLING

Л. М. Левинсон
Lev M. Levinson

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Ф. Н. Янгиров
Farit N. Yangirov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Нгуен Конг Кхак
(Социалистическая
Республика Вьетнам)
Nguyen Cong Khac
(Socialist Republic of Vietnam)

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р. Г. Ганиев
Robert G. Ganiev

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Эффективный транспорт частиц выбуренной породы является необходимым условием для успеха всего процесса бурения скважин. При наклонном и горизонтальном бурении, в случае обеспечения хорошей очистки ствола скважины от шлама, появляется возможность избежать многих осложнений и добурить до проектной глубины за минимальное время. Несмотря на многочисленные исследования бурения наклонных и горизонтальных скважин, в открытой печати имеется незначительное количество работ, посвященных этой тематике. Рассматривается исследование влияния ряда факторов, входящих в процесс бурения скважины, на выбор значения критического расхода бурового раствора путем моделирования.

В статье используются две модели, разработанные эмпирическим методом: модель Ларсена и модель Рубиандины. Были рассмотрены два сценария моделирования процессов транспорта шлама в скважине, пробуренной на шельфе Вьетнама.

Расчеты по двум эмпирическим моделям показали достаточно хорошую сходимость оптимальных скоростей потока и расхода при разных значениях параметров бурения, таких как плотность бурового раствора, механическая скорость бурения, реология. При вертикальном и наклонном бурении отмечено, что обе модели Ларсена и Рубиандины предсказывают скорости потока, которые близки к скоростям потока, типичных для практики. При горизонтальном бурении расчетные скорости потока выше значений на практике.

В заключение приводятся несколько рекомендаций о том, как добиться лучшего выноса шлама и эффективной очистки ствола скважины.

Ключевые слова

наклонные
скважины,
горизонтальные
скважины,
транспорт
шлама,
эмпирический
метод, реология,
моделирование,
Mathlab,
шельф Вьетнама

Efficient cuttings transport is very important for obtaining an effective drilling operation. In inclined and horizontal drilling, if we could ensure a good hole cleaning of the wellbore from the cuttings, we can avoid other drilling problems and successfully drill it to the designed depth with minimal time. Despite the long history of drilling inclined and horizontal wells there is a very small number of works devoted to this subject. The article explores the impact of various drilling parameters, and how they affect the required flow rate by modeling.

The article analyzes two models developed empirically, namely Larsen model and Rubiandini model. Two simulation scenarios of a well drilled in offshore Vietnam have been considered.

The calculations based on two empirical models showed the same trend for required cuttings transport flow velocity and flow rate when drilling parameters, such as mud weight, rate of penetration, mud rheology varied. For vertical and inclined cases, we observe that both Larsen model and Rubiandini model predict flow rates that are close to flow rates typical in operation. For the horizontal case, the predicted flow rates don't seem to coincide with flow rates in operation.

In the conclusion, several recommendations on achieving better cuttings transport and hole cleaning are listed.

Key words

inclined wells,
horizontal wells,
cuttings transport,
empirical
approach,
rheology,
modeling,
Mathlab,
offshore Vietnam

Моделирование процесса транспортировки частиц выбуренной породы

При бурении скважин одной из важнейших проблем является очистка забоя и передача нагрузки на долото. Данная работа посвящена проблеме транспорта шлама из наклонных и горизонтальных участков ствола скважин [1–7]. Рассмотрим несколько моделей транспорта шлама.

Модель Ларсена

В статье, опубликованной в 1997 г. [8], Т. И. Ларсен на основании большого числа экспериментальных исследований показал влияние многих факторов на процесс удаления шлама. Автор считает, что на процесс значительно влияют только три фактора: зенитный угол, размер частиц выбуренной породы и плотность бурового раствора.

$$V_{crit} = V_{slip} + V_{cut};$$

$$V_{slip} = \overline{V_{slip}} \cdot C_{ang} \cdot C_{size} \cdot C_{mw};$$

$$V_{cut} = \frac{ROP}{36[1 - (\frac{D_{pipe}}{D_{hole}})^2]C_{conc}};$$

$$\overline{V_{slip}} = 0,00516 \cdot \mu_a + 3,006 \quad \text{при } \mu_a < 53 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\overline{V_{slip}} = 0,02554 \cdot (\mu_a - 53) + 3,28$$

при $\mu_a > 53 \text{ Па} \cdot \text{с};$

$$\mu_a = PV + \frac{5YP(D_{hole} + D_{pipe})}{V_{crit}};$$

$$C_{conc} = 0,01778 \cdot ROP + 0,505;$$

$$C_{ang} = 0,0342\theta_{ang} - 0,000233\theta_{ang}^2 - 0,213;$$

$$C_{bed} = -1,04 \cdot D_{cuttings} + 1,286;$$

$$C_{mw} = 1 - 0,0333(\rho_m - 8,7)$$

при $\rho_m > 8,7 \text{ фунт/галлон};$

$$C_{mw} = 1 \quad \text{при } \rho_m < 8,7 \text{ фунт/галлон};$$

$$C_{bed} = 0,97 - 0,00231 \cdot \mu_a;$$

где V_{crit} — критическая скорость восходящего потока (фут/с), (м/с);

V_{cut} — абсолютная скорость подъема частицы (фут/с), (м/с);

V_{slip} — скорость погружения частиц выбуренной породы в промывочную жидкость (фут/с), (м/с);

$\overline{V_{slip}}$ — эквивалентная скорость проскальзывания частиц выбуренной породы в промывочной жидкости (фут/с), (м/с);

C_{ang} — поправочный коэффициент зенитного угла (безразмерный);

C_{size} — поправочный коэффициент размера частиц выбуренной породы (безразмерный);

C_{mw} — поправочный коэффициент плотности бурового раствора (безразмерный);

C_{bed} — поправочный коэффициент концентрации частиц выбуренной породы при скорости восходящего потока, меньшей критической (безразмерный);

C_{conc} — фракционный коэффициент по процентам частиц выбуренной породы (%);

ROP — механическая скорость потока (фут/ч), (м/ч);

D_{pipe} — диаметр бурильной трубы (дюйм), (м);

D_{hole} — диаметр ствола скважины (дюйм), (м);

$D_{cuttings}$ — размер частиц выбуренной породы (дюйм), (м);

μ_a — кажущаяся вязкость бурового раствора (Па·с);

PV — пластическая вязкость (Па·с);

YP — динамическое напряжение сдвига бурового раствора (фунт/100 кв. футов);

θ_{ang} — зенитный угол (°);

ρ_m — плотность бурового раствора (фунт на галлон) (г/см³).

Модель Рубиандини

В статье, опубликованной в 1999 г. [9], было установлено, что можно рассчитать восходящую скорость потока, необходимую для обеспечения эффективной очистки скважины, по следующим формулам:

$$C_i = \left[1 + \frac{2\theta}{45}\right] \text{ при } \theta \leq 45^\circ;$$

$$C_i = 2 \text{ при } \theta \geq 45^\circ;$$

$$C_{mw} = \frac{3 + \rho_m}{15};$$

$$C_{RPM} = \frac{600 - RPM}{600};$$

$$V_{cut} = \frac{ROP}{36 \left[1 - \left(\frac{D_{pipe}}{D_{hole}}\right)^2\right] C_{conc}};$$

$$V_{min} = V_{slip} * \left[1 + C_{RPM} \cdot C_{mw} \cdot C_{RPM}\right] + V_{cut};$$

$$V_{min} = V_{crit} = V_{slip} \cdot \left[1 + \frac{\theta \cdot (600 - RPM) \cdot (3 + \rho_m)}{202500}\right] + V_{cut}$$

при $\theta \leq 45^\circ$;

$$V_{min} = V_{crit} = V_{slip} \cdot \left[1 + \frac{(600 - RPM) \cdot (3 + \rho_m)}{4500}\right] + V_{cut}$$

при $\theta \geq 45^\circ$;

где V_{min} — критическая скорость восходящего потока (фут/с), (м/с);

RPM — число оборотов в минуту (об/мин);

C_i — поправочный коэффициент зенитного угла (безразмерный);

C_{RPM} — поправочный коэффициент числа оборотов в минуту (безразмерный);

θ — зенитный угол (°).

Для прогнозирования критической восходящей скорости потока при бурении скважины мы используем следующие параметры:

$D_{трубы} = 5$ дюймов;

$D_{ствола} = 8,5$ дюйма;

Используемый буровой раствор: RDIF_NaCl/Flopro NT (Mi SWACO);

Механическая скорость бурения: 40 м/ч;

Пластическая вязкость: 25 Па·с;

Динамическое напряжение сдвига: 22 фунта/100 кв. футов;

$D_{частиц(вы.пород)} = 0,1$ дюйма;

Частота вращения = 120 об/мин.

Для того чтобы доказать влияние главных параметров на процесс очистки скважины, нами проведены расчеты в программе MATLAB [3] с разными значениями, которые показаны в таблице 1.

По полученным результатам моделирования рассчитаны критические расходы бурового раствора по следующим формулам:

$$A = \frac{\pi}{4} [(D_{hole} \cdot 0,0254)^2 - (D_{pipe} \cdot 0,0254)^2];$$

$$Q = V \cdot A \cdot 1000;$$

где Q — критический расход бурового раствора (м³/с);

A — площадь кольцевого пространства (м²/с);

V — восходящая скорость потока бурового раствора (м/с);

D_{hole} — диаметр ствола скважины (м);

D_{pipe} — диаметр бурильной колонны (м).

Результаты моделирования по модели Ларсена

Увеличение плотности бурового раствора снижает значение критического расхода для обеспечения эффективного выноса шлама. Из вышеуказанных диапазонов зенитного угла ствола скважины наибольшую опасность представляет интервал 65°–80°.

Увеличение механической скорости бурения снижает значение необходимого расхода для обеспечения эффективного выноса шлама. Но при скоростях 40 и 60 м/ч графики почти совпадают. Из вышеуказанных диапазонов зенитного угла ствола скважины наибольшую опасность представляет 65°–80°.

Увеличение размера частиц выбуренной породы снижает значение необходимого

Таблица 1. Параметры бурения как переменные

Механическая скорость бурения (фут /ч)	65,6	131,2	193,7
Плотность бурового раствора (фунт на галлон, ppg)	10	10,41	10,83
Размер частиц выбуренной породы (дюйм)	0,1	0,2	0,3
Реологические параметры бурового раствора (PV/YP, Па·с/ фунт/100 кв. футов)	25/22	33/22	40/22

Рисунок 1. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях плотности бурового раствора (Модель Ларсена)

Рисунок 2. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях механической скорости бурения (модель Ларсена)

Рисунок 3. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях размера частиц выбуренной породы (модель Ларсена)

Таблица 2. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях плотности бурового раствора и зенитных углах (Модель Ларсена)

Плотность (фунт на галлон, ppg)	Расход (л/с) при		
	55°	75°	90°
10,00	64	68	65
10,41	64	67	64
10,83	63	66	64

Таблица 3. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях механической скорости бурения (модель Ларсена)

Механическая скорость бурения (фут/ч)	Расход (л/с) при		
	55°	75°	90°
65,6	61	65	62
131,2	59	63	60
193,7	58	61	58

Таблица 4. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях размера частиц выбуренной породы (модель Ларсена)

Размер частиц выбуренной породы (дюйм)	Расход (л/с) при		
	55°	75°	90°
0,1	58	62	58
0,2	55	58	55
0,3	53	53	51

расхода для обеспечения эффективного выноса шлама. Из вышеуказанных диапазонов зенитного угла ствола скважины наибольшую опасность представляет 65° – 80° .

Увеличение отношения пластической вязкости к динамическому напряжению сдвига бурового раствора повышает значение необходимого расхода для обеспечения эффективного выноса шлама. Из вышеуказанных диапазонов зенитного угла ствола скважины наибольшую опасность представляет 65° – 80° .

Рисунок 4. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях реологических параметров бурового раствора (модель Ларсена)

Рисунок 5. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях плотности бурового раствора (модель Рубиандини)

Результаты моделирования по модели Рубиандини

Увеличение плотности бурового раствора снижает значение необходимого расхода для обеспечения эффективного выноса шлама.

Увеличение механической скорости бурения повышает значение необходимого расхода для обеспечения эффективного выноса шлама.

Увеличение отношения пластической вязкости к динамическому напряжению сдвига бурового раствора повышает значение необходимого расхода для обеспечения эффективного выноса шлама. Но эффект маленький при выбранных значениях.

Таблица 5. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях реологических параметров бурового раствора (модель Ларсена)

Реологические параметры бурового раствора (PV/YP, Па·с/ фунт/100 кв. футов)	Расход (л/с) при		
	55°	75°	90°
25/22	58	62	58
33/22	60	64	60
40/22	61	65	62

Таблица 6. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях плотности бурового раствора (модель Рубиандини)

Плотность (фунт на галлон, ppg)	Расход (л/с)	
	вертикальный участок (0°)	горизонтальный участок (45°–90°)
10,00	42	60
10,41	41	60
10,83	41	59

Рисунок 6. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях механической скорости бурения (модель Рубиандини)

Рисунок 7. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях реологических параметров бурового раствора (модель Рубиандини)

Таблица 7. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях механической скорости бурения (модель Рубиандини)

Механическая скорость бурения (фут/ч)	Расход (л/с)	
	вертикальный участок (0°)	горизонтальный участок (45°–90°)
65,6	40	61
131,2	39	60
193,7	39	59

Таблица 8. Критическая скорость восходящего потока при разных значениях реологических параметров бурового раствора (модель Рубиандини)

Реологические параметры бурового раствора (PV/YP, Па•с/фунт/100 кв. футов)	Расход (л/с)	
	вертикальный участок (0°)	горизонтальный участок (45°–90°)
25/22	40	61
33/22	40	62
40/22	40	62

Таблица 9. Сравнение результатов расчетов по двум моделям с переменной плотностью

Плотность бурового раствора (фунт на галлон, ppg)	10	10,41	10,83
Расход (л/с)	Модель Ларсена	68	67
	Модель Рубиандини	60	60
Погрешность		11,7 %	10,5 %

Таблица 10. Сравнение результатов расчетов по двум моделям с переменной механической скоростью бурения

Механическая скорость бурения (фут/ч)	65,6	131,2	193,7
Расход (л/с)	Модель Ларсена	65	63
	Модель Рубиандини	61	60
Погрешность	7,7 %	4,8 %	3,3 %

Таблица 11. Сравнение результатов расчетов по двум моделям с переменными реологическими параметрами бурового раствора

Реологические параметры бурового раствора (PV/YP, Па•с/фунт/100 кв. футов)		25/22	33/22	40/22
Расход (л/с)	Модель Ларсена	62	64	66
	Модель Рубиандини	61	62	62
Погрешность		1,6 %	3,1 %	6,1 %

Сравнение результатов расчетов по двум моделям с разными переменными при зенитном угле 75°

Выводы

Результаты моделирования процессов транспорта частиц выбуренной породы по моделям Ларсена и Рубиандини показывают достаточное для расчетов сходство. При сравнении с практическими параметрами на производстве видим, что значения критического расхода прогноза совпадают с практическими результатами при бурении вертикального, набора зенитного угла и участка стабилизации, а для бурения горизонтального участка расхождение в полтора и более раза. Такие факторы, как плотность, реология бурового рас-

твора, частота вращения, механическая скорость бурения, размер частиц оказывают существенное влияние на расчет минимального расхода для эффективной очистки ствола скважины при разных значениях зенитного угла. Необходимо продолжить исследование влияния этих факторов.

В результате моделирования установлено, что существует противоречие среди двух моделей, когда механическая скорость бурения играет роль переменной. В модели Ларсена чем больше механическая скорость бурения, тем меньше расход бурового раствора, и, наоборот, в модели Рубиандини.

Из результатов моделирования нами рекомендовано применение моделей Ларсена и

Рубиандини для расчетов критических расходов бурового раствора при наклонном и горизонтальном бурении.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ранзбар Р. Транспорт шлама в наклонных и горизонтальных скважинах: магистерская диссертация. Ставангер, 2010. 102 с.
2. Окразни С.С., Ларсен Т.И., Азар З.З. Влияние реологии бурового раствора на очистку кольцевого пространства в наклонных скважинах // Сообщество нефтяных инженеров. 1986. Идентификация документа: SPE-14178-PA.
3. Локкетт Т.З., Ричаксон С.М., Ворракер В.З. Важность вращения буровых труб для эффективного выноса шлама в процессе бурения // Сообщество нефтяных инженеров. 1993. Идентификация документа: SPE-25768-MS.
4. Менгзiao Ю., Даниел М., Николас Т., Стефан З.М., Рамадан А. Новый подход к совершенствованию процесса очистки от шлама в наклонных и горизонтальных скважинах // Сообщество нефтяных инженеров. 1993. Идентификация документа: SPE-90529-MS.
5. Левинсон Л.М., Чуктуров Г.К., Мухаметов Ф.Х., Левинсон М.Л. Технология бурения и навигация сложнопрофильных скважин. Уфа: ООО «Монография», 2016. 164 с.
6. Гаймалетдинова Г.Л., Логинова М.Е. Моделирование профилей скважин с большой протяженностью горизонтального участка // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): сб. тез. XII Всеросс. конф. молодых ученых, специалистов и студентов, ПАО «Газпром». 2017. С. 107.

7. Логинова М.Е., Яхин А.Р., Янгиров Ф.Н. Разработка математической модели по экспериментальным данным. Уфа: УГНТУ, 2017. С. 35.

8. Ларсен Т.И., Пилевари А.А., Азар З.З. Совершенствование новой модели транспорта шлама в скважинах с большими зенитными углами и горизонтальными участками // Сообщество нефтяных инженеров. 1997. № 2. Идентификация документа: SPE-25872-PA.

9. Рубиандини Р.С.Р. Уравнение расчета минимального расхода бурового раствора для транспорта шлама в наклонных и горизонтальных скважинах // Сообщество нефтяных инженеров. 1999. Идентификация документа: SPE-57541-MS.

REFERENCES

1. Ranzbar R. *Transport shlama v naklonnykh i gorizontol'nykh skvazhinakh: masterskaya dissertatsiya* [Cutting Transport in Inclined and Horizontal Wells. Master's Thesis]. Stavanger, 2010. 102 p.
2. Okrazni S.S., Larsen T.I., Azar Z.Z. Vliyanie reologii burovogo rastvora na ochistku kol'tseвого prostranstva v naklonnykh skvazhinakh [The Effect of Mud Rheology on Annular Hole Cleaning in Directional Wells]. *Soobshchestvo neftyanykh inzhenerov — Society of Petroleum Engineers*, 1986, Document ID: SPE-14178-PA.
3. Lockett T.Z., Richakson S.M., Vorraker V.Z. Vazhnost' vrashcheniya buril'nykh trub dlya effektivnogo vynosa shlama v protsesse bureniya [The Importance of Rotation Effects for Efficient Cuttings Removal during Drilling]. *Soobshchestvo neftyanykh inzhenerov — Society of Petroleum Engineers*, 1993, Document ID: SPE-25768-MS.

4. Mengziao Yu., Daniel M., Nikolas T., Stefan Z.M., Ramadan A. *Novyi podkhod k sovershenstvovaniyu protsessa ochistki ot shlama v naklonnykh i gorizont'al'nykh skvazhinakh* [A New Approach to Improve Cuttings Transport in Horizontal and Inclined Wells]. *Soobshchestvo neftnykh inzhenerov — Society of Petroleum Engineers*, 1993. Document ID: SPE-90529-MS.

5. Levinson L.M., Chukturov G.K., Mukhametov F.Kh., Levinson M.L. *Tekhnologiya bureniya i navigatsiya slozhnoprofil'nykh skvazhin* [Oil and Gas Well Drilling Technology]. Ufa, Monografiya Publ., 2016. 164 p. [in Russian].

6. Gaimaletdinova G.L., Loginova M.E. Modelirovanie profilei skvazhin s bol'shoi protyazhennost'yu gorizontalnogo uchastka [Modelling of Well Profiles with Large Extension of the Horizontal Section]. *Sbornik tezisov PAO «Gazprom» XII Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchyonnykh, spetsyalistov i studentov «Novye tekhnologii v gazovoi promyshlennosti» (gaz, neft', energetika)*. [Collection of Thesis PAO «Gazprom» of XII All-Russian Conference of Young Scientists, Specialists and Students

«New Technologies in Gas Industry» (Gas, Oil, Power Engineering)]. 2017, pp. 107. [in Russian].

7. Loginova M.E., Yakhin A.R., Yangirov F.N. *Razrabotka matematicheskoi modeli po eksperimental'nykh dannym* [Development of a Mathematical Model Based on Experimental Data]. Ufa, UGNTU Publ., 2017, pp. 35. [in Russian].

8. Larsen T.I., Pilenvari A.A., Azar Z.Z. Sovershenstvovanie novoi modeli transporta shlama v skvazhinakh s bol'shimi zenitnymi uglami i gorizont'al'nymi uchastkami [Development of a New Cuttings-Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells]. *Soobshchestvo neftnykh inzhenerov — Society of Petroleum Engineers*, 1997, No. 2, Document ID: SPE-25872-PA.

9. Rubiandini R.S.R. *Uравнение rascheta minimal'nogo raskhoda burovogo rastvora dlya transporta shlama v naklonnykh i gorizont'al'nykh skvazhinakh* [Equation for Mud Estimating Minimum Rate for Cuttings Transport in an Inclined-Until-Horizontal Well]. *Soobshchestvo neftnykh inzhenerov — Society of Petroleum Engineers*, 1999, Document ID: SPE-57541-MS.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Левинсон Лев Михайлович, канд. техн. наук, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Lev M. Levinson, Candidate of Engineering Sciences, Professor of Oil and Gas Wells Drilling Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Нгуен Конг Кхак, магистрант, кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Nguyen Cong Khac, Undergraduate Student of Oil and Gas Wells Drilling Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: khacnguyenqb@gmail.com

Янгиров Фарит Наилович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Farit N. Yangirov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Wells Drilling Department, USPTU, Ufa, the Russian Federation

Ганиев Роберт Габбасович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация.

Robert G. Ganiev, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Wells Drilling Department, USPTU, Ufa, Russian Federation