

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.124-140>

УДК 622.24

Анализ обвальнoй породы в процессе бурения как инструмент для безопасного строительства скважины

¹Габитов С.И., ¹Гоцуляк А.С., ¹Чебышев И.С., ²Ахметшин Т.Р.

¹Газпромнефть научно-технический центр, Санкт-Петербург, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Rock cavings analysis during drilling as tool for safe well construction

¹S.I. Gabitov, ¹A.S. Gotsulyak, ¹I.S. Chebyshev, ²T.R. Akhmetshin

¹Gazpromneft-Science&Technology Center LLC, Saint-Petersburg, Russia

²Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

E-mail: Gabitov.SI@gazpromneft-ntc.ru

Аннотация. Фактические физико-механические свойства пласта и его напряженно-деформированное состояние (НДС) могут отличаться от прогнозных значений модели устойчивости на предбуровом этапе.

Глинистые, трещиноватые, слабосцементированные или хрупкие горные породы, испытывающие НДС или химическое воздействие бурового раствора, изменяют свои упруго-прочностные свойства и склонны к обрушению, что приводит к целому комплексу нежелательных последствий.

Обвальнoй шлам является ценным источником информации о НДС околоскважинного пространства в процессе бурения. В данной статье рассматриваются условия возникновения и характеристики обвальнoх фрагментов. Проанализированы различные виды обвальнoх шлама, полученного при бурении на месторождениях периметра группы компаний Газпромнефть, приведены корреляции с 1Д геомеханическими моделями устойчивости скважин.

Ключевые слова: обвальнoй шлам, неустойчивость стенок скважины, геомеханическое сопровождение, геомеханическое моделирование, эффективность бурения, мониторинг выбуренной породы, напряженно-деформированное состояние, геолого-технологические исследования

Для цитирования: Габитов С.И., Гоцуляк А.С., Чебышев И.С., Ахметшин Т.Р. Анализ обвальнoй породы в процессе бурения как инструмент для безопасного строительства скважины//Нефтяная провинция.-2021.-№1(25).-С.124-140. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.124-140>

© Габитов С.И., Гоцуляк А.С., Чебышев И.С., Ахметшин Т.Р., 2021

Abstract. The actual physical and mechanical properties of the reservoir and its stress-strain state (SSS) may differ from the predicted values of the stability model at the pre-drilling stage.

Clay, fractured, weakly cemented or brittle rocks that are exposed to SSS or chemical effects of drilling mud change their elastic-strength properties and are prone to collapse, which leads to a whole range of undesirable consequences.

Rock caving is a valuable source of information about the SSS of the near-well space during drilling. This article discusses the conditions for the appearance and characteristics of rock cavings. Various types of rock cavings obtained during drilling at the perimeter fields of the Gazpromneft group companies are analyzed, and correlations with 1D geomechanical models of well stability are shown.

Key words: *cavings, wellbore instability, geomechanical support, geomechanical modeling, drilling efficiency, monitoring of drilled rock, stress-strain state, geological and technological research*

For citation: S.I. Gabitov, A.S. Gotsulyak, I.S. Chebyshev, T.R. Akhmetshin Analiz obval'noj porody v processe burenija kak instrument dlja bezopasnogo stroitel'stva skvazhiny [Rock cavings analysis during drilling as tool for safe well construction]. Neftyanaya Provintsija, No. 1(25), 2021. pp. 124-140. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.124-140> (in Russian)

Введение

Фактические механические свойства пласта могут отличаться от прогнозных значений предбурового этапа по причине отсутствия комплексного представления о текущих свойствах горной породы и пластовых давлений (отсутствие прямых замеров в процессе бурения). Глинистые, трещиноватые, слабосцементированные или хрупкие горные породы, испытывающие НДС или химическое воздействие бурового раствора, изменяют свои упруго-прочностные свойства и вероятность к обрушению стенок скважины увеличивается, что приводит к целому комплексу нежелательных последствий при строительстве скважин [1,2].

В связи с этим необходимо оперативно реагировать на изменение параметров во время бурения и своевременно корректировать плотность бурового раствора [3].

В большинстве случаев первый признак проблемы неустойчивости ствола скважины сопровождается появлением незначительного количества

обвальной породы, наблюдаемой на выброситах вместе с выбуренной фракцией как в процессе бурения, так и во время промывочных действий [4,5].

Использование геомеханической модели позволяет на предбуровом этапе определить вероятные интервалы, в которых возможно обвалообразование и подобрать оптимальную плотность бурового раствора [6-8]. Мониторинг выбуренной породы и обнаружение обвального шлама информирует о неустойчивости ствола скважины и необходимости корректировок параметров бурового раствора [9].

Механизм обрушения

Вскрытие горного массива нарушает сложившийся баланс напряжений и в околоскважинной зоне формируется силовое поле с максимальной концентрацией напряжений. Когда несущая способность пород оказывается недостаточной, то около скважины образуется некоторая предельная область или область минимальных напряжений. Породы в этой области претерпевают весь спектр деформаций от упругих до упругопластических и пластических с последующим разрушением. В результате образования трещин породы увеличиваются в объеме и перемещаются в ствол скважины, т.е. или обрушаются, или набухают.

Разрушение пород в прискважинной зоне зависит от интенсивности действующих напряжений, реологических свойств породы и скорости вскрытия горного массива. При определенных условиях разрядка упругой энергии может сопровождаться осыпями и обвалами пород. Вероятность этих явлений повышается с глубиной скважины, увеличением механической скорости бурения и поровых давлений.

На напряженно-деформированное состояние горных пород в пристволевой зоне существенно влияет физико-химические воздействия бурового раствора (смачивание, кольматирование), процессы растворения, выще-

лачивания. Проникновение фильтрата бурового раствора в глиносодержащие горные породы ведет к их набуханию и обваливанию в скважину. Обвалы, как правило, имеют единичный внезапный, так и непрерывный характер в зависимости от структуры, физико-химических и механических свойств пород. В отличие от осыпей, которые имеют местный (поверхностный) характер разрушения, обвалам присущи глубокие объемные разрушения ствола. Характерные признаки обвалов: резкое повышение давления на буровых насосах и потеря циркуляции, прихват бурильных и обсадных труб [10,11].

Характеристика обвального шлама

Обвальный шлам - это фрагменты горной породы из стенки ствола скважины, которые не были получены непосредственно под действием долота. Обвальный шлам может иметь много форм. Он может быть угловатым, табулярным или осколочным по форме. В отличие от осыпей, которые происходят постепенно, обвалы случаются достаточно быстро и несут с собой гораздо больше материала горной породы [12].

Обвальный шлам может быть, как крупным, так и мелким, с типичным размером от 2 см до 6 см.

Выделяют общие типы форм обвального шлама (Рис. 1):

- угловатые куски шлама наблюдаются чаще всего из только что обрушившихся стенок скважины (Рис. 1.А);
- табулярные проявляются с большей вероятностью в зоне разлома, естественного разрушения/соединения (Рис. 1.Б);
- осколочный шлам образуется в большинстве случаев при бурении с недостаточной плотностью в твердых и прочных горных породах (Рис. 1.С).

Таким образом, размер и форма обвалившихся частиц дают ценную информацию о состоянии ствола скважины [13].

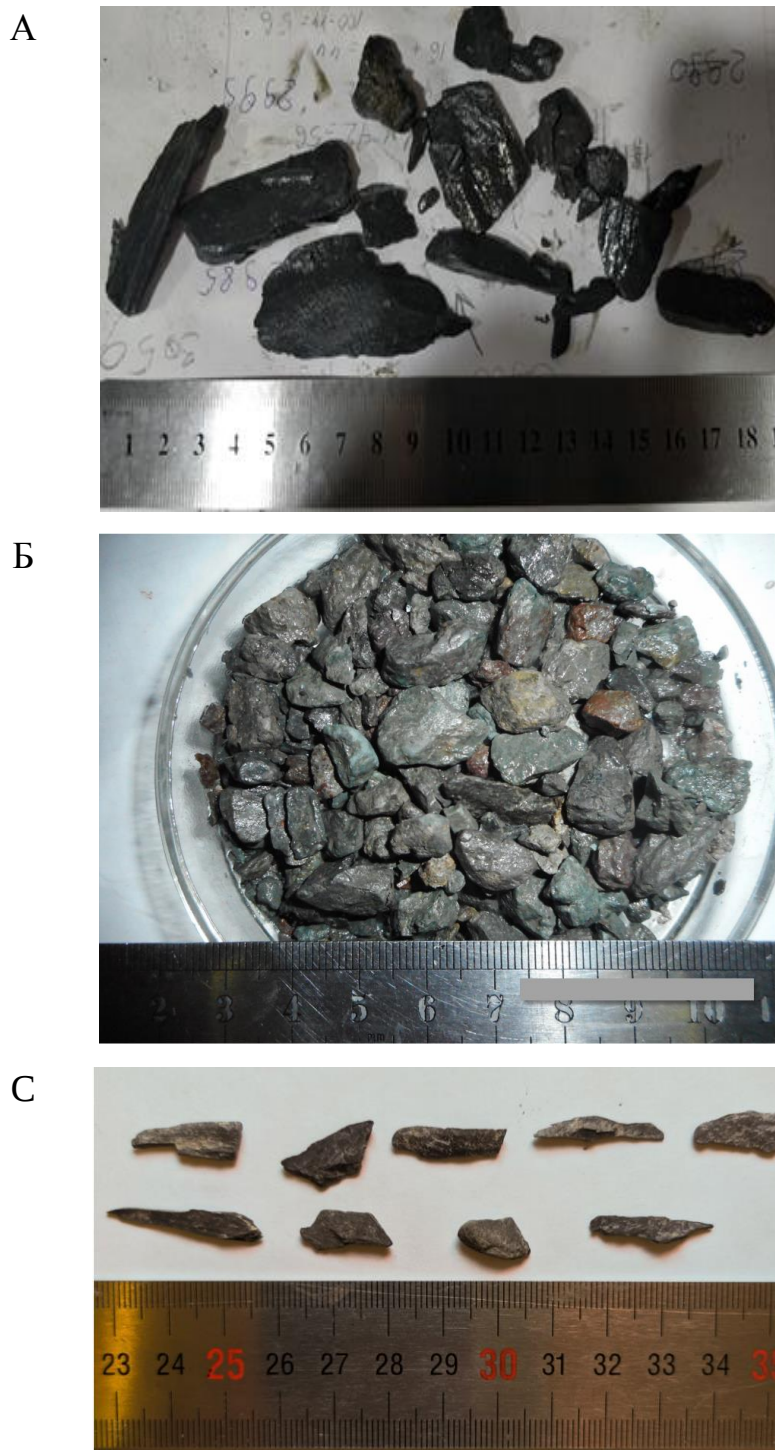


Рис. 1. Образцы обвального шлама

А – Угловатый; Б – Табулярный; С - Осколочный

Анализ морфологии шлама может указать о характере проблемы:

- мягкий и глинистый обвальный шлам - проблема в набухании глин;
- рыхлый обвальный шлам – трещиноватая порода;
- остроконечный обвальный шлам – твердая, хрупкая горная порода.

В зависимости от размера, формы и литотипа обвалившихся горных пород, совместно с данными LWD (logging while drilling) или промежуточных геофизических исследований скважины (запись гамма-каротажа позволяет обновлять численные значения угла внутреннего трения), обновляются механические свойства и градиенты геомеханической модели. На полученных данных формируются рекомендации для дальнейших корректировок плотности бурового раствора. Безопасный диапазон плотности бурового раствора представляет собой такие значения, при котором статическая плотность бурового раствора превышает градиент обрушения, а эквивалентная циркуляционная плотность (ЭЦП) не превышает градиент раскрытия существующих трещин или давление разрыва пласта в случае отсутствия естественной трещиноватости [14].

Описание и анализ обвального шлама на примере месторождений компании Газпромнефть

Инженерно-технической службой геолого-технологических исследований (ГТИ) ведется системный мониторинг выбуренного и обвального шлама при котором определяется размер, форма, литотип и процентное содержание от общего объема. По поступающим данным и фотографиям ведется геомеханическое сопровождение скважины, которое в режиме реального времени позволяет наиболее оперативно определить интервалы, склонные к обвалообразованию.

В качестве исходных данных использовались: инклинометрия, плотностной каротаж, акустический каротаж, каверномер, гамма-каротаж, данные геолого-технических исследований, события при бурении, плотность бурового раствора, шламограмма. Использовались приборы отечественного и импортного производства. При построении опорных 1Д геомеханических моделей и моделей для сопровождения бурения использовались программные продукты Techlog Schlumberger и Geonft.

Месторождение “А”

На рис. 2 и 3 представлены планшеты с двумя моделями устойчивости для секций эксплуатационной колонны (ЭК), используемых при геомеханическом сопровождении скважин 1 и 2, месторождения “А”, расположенном в Восточной Сибири.



Рис. 2. Модель устойчивости ствола скважины 1

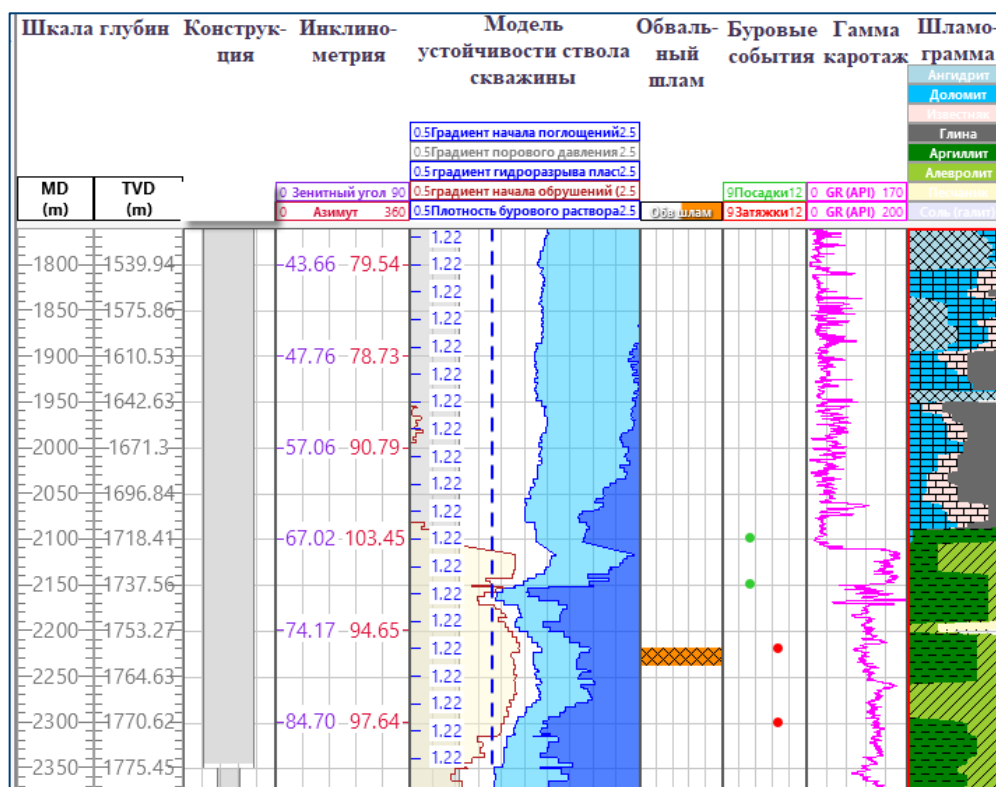


Рис. 3. Модель устойчивости ствола скважины 2

При бурении скважин в интервале секций ЭК не представляется возможным полностью перекрывать градиент обрушения плотностью бурового раствора, так как существует высокий риск поглощения при превышении уровня ЭЦП. Согласно данным геомеханической модели, градиент обрушения скважины 1 превышал статическую плотность бурового раствора на $0,37 \text{ г/см}^3$, в скважине 2 разница составляла $0,18 \text{ г/см}^3$. Бурение обеих скважин сопровождалось контролем выноса обвальной породы.

По данным ГТИ на скважинах 1 и 2 отмечался выход обвального шлама, до 5-10 % оскольчатых фрагментов аргиллита (Рис. 4, 5), в интервалах 2100-2130 м, 2220-2240 м соответственно. Полученный шлам соответствует интервалам с максимальным градиентом обрушения по разрезу.



Рис. 4. Образцы обвального аргиллита, полученного в процессе бурения с глубины 2100-2130 м по скважине 1



Рис. 5. Образцы обвального аргиллита, полученного в процессе бурения с глубины 2220-2240 м по скважине 2

Получение оскольчатых фрагментов горной породы на виброситах говорит о неустойчивости стенок скважины при данных параметрах промывочной жидкости. Позже следовавшие инциденты со скачками давления

с последующим поглощением указывают на критичность последствий данных обрушений. По итогу строительства скважин НПВ (непроизводительное время) составило до 20%. Данный случай показал, что градиент обрушения, не перекрытый плотностью бурового раствора, проявляет себя и приводит к увеличению сроков строительства скважин.

Месторождение “В”

Согласно данным геомеханической модели, прохождение неустойчивого интервала Бобриковского горизонта месторождения “В” осуществлялось при превышении градиентом обрушения плотности бурового раствора на $0,09 \text{ г/см}^3$. Плотность бурового раствора составляла $1,23 \text{ г/см}^3$, градиент обрушения $1,32 \text{ г/см}^3$. ЭЦП при бурении достигала значений $1,28 \text{ г/см}^3$. Таким образом, в процессе бурения градиент обрушения превышал плотность бурового раствора всего на $0,03 \text{ г/см}^3$ (Рис. 6).

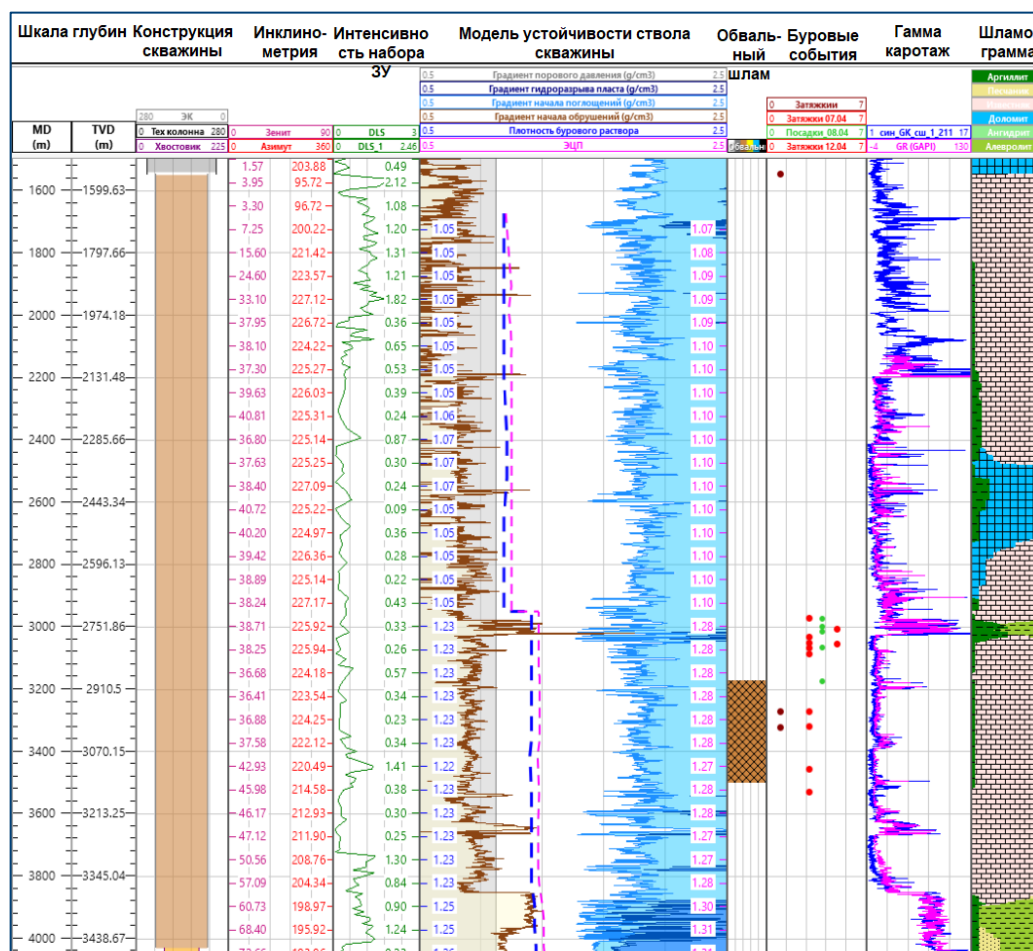


Рис. 6. Геомеханическая модель устойчивости ствола скважины

Выход обвального аргиллита зафиксирован в интервале глубин 3175-3500 м, через 150 м после прохождения Бобриковского горизонта. На фото (Рис. 7, 8) отображены обвальный шлам в общей массе и отдельно. Предположительно, факт периодической остановки циркуляции и время подъема шлама на поверхность, играют роль в образовании обвального шлама, а также в его смещение по глубине, относительно неустойчивых интервалов.



Рис. 7. Образцы обвального аргиллита, полученного в процессе бурения с глубины 3175-3500 м



Рис. 8. Образцы выбуренного шлама с частицами обвального аргиллита, полученного в процессе бурения с глубины 3175-3500 м

Основной проблемой на месторождении “В” является наличие несовместимых условий бурения – периодические поглощения бурового раствора, вплоть до полного отсутствия циркуляции, и присутствие во

вскрываемом разрезе неустойчивых пород Бобриковского горизонта и терригенной пачки франского яруса. Необходимо отметить, что спуск эксплуатационной колонны прошел без отклонений и посадок, несмотря на временной фактор. Что подтверждает правильность подбора типа и плотности бурового раствора.

Месторождение “С”

Согласно данным геомеханической модели (Рис. 9.), плотность бурового раствора не обеспечивала устойчивость стенок, т.е. бурение осуществлялось при превышении градиентом обрушения плотности бурового раствора на $0,1-0,38 \text{ г/см}^3$. На месторождение присутствуют незакартированные разломы в интервале 2800-3000 м по TVD (true vertical depth). Данные сейсмических исследований не интерпретировались на наличие разрывных нарушений. Анализ ранее сопровождаемых скважин показал наличие поглощений на некоторых из них. В виду этого бурение скважин ведется с плотности $1,05 \text{ г/см}^3$ со ступенчатым утяжелением до плотности $1,30-1,35 \text{ г/см}^3$.

На данной скважине в комплекс ГИС был включен каверномер. На рис. 9 представлен процент обрушений стенок скважины (damage), или кавернозность, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{Процент обрушения} = \frac{DS - BS}{BS} * 100\%,$$

где DS - фактические показания каверномера (мм), BS –диаметр долота (мм).

Из осложнений отмечались выход обвального шлама в виде кусков аргиллита и доломита размером до 45 мм остроугольной формы, в интервале 2870-2980 м фиксировалось поглощение бурового раствора интенсивностью $15 \text{ м}^3/\text{ч}$, а также многочисленные затяжки и посадки компоновки низа бурильной колонны до 10 т при спускоподъемных операциях.

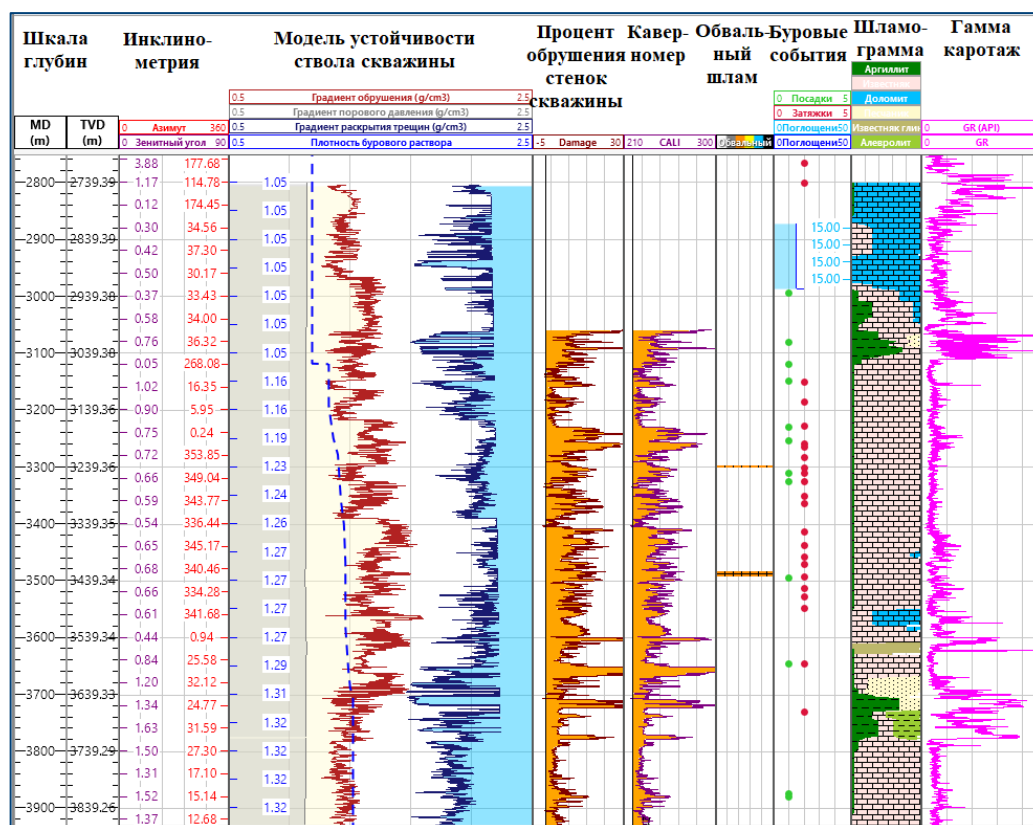


Рис. 9. Геомеханическая модель устойчивости ствола скважины

В процессе бурения в интервале 3280-3290 м был отмечен обвальный аргиллит до 5% от общего объема, размером до 25 мм (Рис. 10).



Рис. 10. Образцы обвального аргиллита, полученного в процессе бурения в интервале 3280-3290 м

При забое 3290 м во время проработки выявлен выход обвального шлама: аргиллит-60 %, доломит-40 % фракцией до 50 мм (Рис. 11). После промывки 1,5 часа, выход обвального шлама прекратился.



Рис. 11. Образцы обвального аргиллита и доломита, полученных во время проработки при забое 3290 м

При забое 3488 м во время спуска бурового инструмента с проработкой в интервале 3450-3485 м наблюдался выход обвального шлама: аргиллит - 60% фракцией до 45 мм, доломит - 40% фракцией до 20 мм (Рис. 12).



Рис. 12. Образцы обвального аргиллита и доломита, полученных во время проработки при забое 3488 м

Для качественной очистки ствола скважины рекомендовалось не превышать скорость бурения, увеличить время промежуточных промывок и минимизировать время бурения без вращения буровой колонны для лучшего выноса шлама в процессе бурения. При увеличении количества обвального шлама увеличивать плотность бурового раствора до 1,30-1,35 г/см³, с контролем объема раствора в емкостях. Спускоподъемные операции производить с контролем скорости при прохождении интервалов каверн. Перед подъемом инструмента промыть скважину не менее 1,5-2-х циклов или до полной очистки вибросит от шлама. В результате вышеперечисленных комплексных мер, несмотря на кавернозность ствола до 30% и наличие обвального шлама, спуск колонны прошел без критических отклонений.

Выводы и рекомендации

Анализ процесса бурения скважин с различных месторождений показал, что наличие обвального шлама в процессе строительства скважины свидетельствует о низкой несущей способности приствольных пород, что подтверждается геомеханическими моделями. Верное выявление и своевременные мероприятия по предотвращению осложнений, связанных с устойчивостью ствола скважины, позволили избежать последствий, приводящих к увеличению непроизводительного времени.

Там, где увеличение плотности бурового раствора ограничивается высокими рисками поглощений, геомеханическая модель устанавливает минимальные значения градиентов раскрытия трещин, т.е. безопасные рамки для уровня ЭЦП. В этой связи мониторинг обвальнoй породы и геомеханическое сопровождение бурения скважины с принятием корректирующих мер в значительной мере могут обеспечить безопасность строительства скважины и способствовать успешному заканчиванию скважины в поставленные сроки.

При прохождении интервалов с высоким градиентом обрушения, необходимо своевременно обеспечить параметры бурового раствора и операции на скважине, положительно влияющие на стабильность стенок и очистку ствола от шлама без поглощений бурового раствора.

Список литературы

1. Al-Bahrani H., Al-Yami A. Drillstring Vibrations and Wellbore Quality: Where Drillstring Design Meets Geomechanics // Society of Petroleum Engineers-2018: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE, 2018. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-193253-MS> (дата обращения: 22.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2118/193253-MS>
2. Hamid O., Qahtani A., Alamer S., Sherbeny W. Mitigating Wellbore Stability Risks through Geomechanical Solutions // Society of Petroleum Engineers-2018: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE, 2018. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-192872-MS> (дата обращения: 22.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2118/192872-MS>
3. Godwin C., Jacob N., Bariakpoa K., Samuel N. Evaluation of Optimum Mud Weight Window for Prevention of Wellbore Instability in Niger Delta Wells // IOSR Journal of Engineering. 2020. Vol. 10. Issue 10. P. 61-66. URL: <https://www.researchgate.net/publication/344929228> (дата обращения: 22.11.2020).
4. Karimi M. Drill-Cuttings Analysis for Real-Time Problem Diagnosis and Drilling Performance Optimization // Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition: Materials of SPE conference. Jakarta, Indonesia. 2013. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-165919-MS> (дата обращения: 25.11.2020). DOI: [10.2118/165919-MS](https://doi.org/10.2118/165919-MS).
5. Kumar D., Ansari S., Wang S., Ahmed S., Povstyanova M., Tichelaar B. Real-time wellbore stability analysis: an observation from cavings at shale shakers // AAPG international conference & exhibition. American Association of Petroleum Geologists (AAPG). Singapore. 2012. URL: http://www.searchanddiscovery.com/documents/2012/41095kumar/ndx_kumar (дата обращения: 23.11.2020).
6. Christopher S., Alireza R., Pouria B. An approach for wellbore failure analysis using rock cavings and image processing // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Issue 5. P. 865-878. URL: <https://www.researchgate.net/publication/326196552> (дата обращения: 23.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.011>

7. Renato G., Zuly H., Yair A. New Approach for Estimating Cavings Volume to Avoid Wellbore Instabilities // International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Source: Materials of Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure. Goiania, Brazil. 2014. URL: <https://www.researchgate.net/publication/335189023> (дата обращения: 25.11.2020).
8. Tsopela A., Bere A., Dutko M., Kato J. Wellbore Stability and Predicted Cuttings Volume in Deviated Wellbores and Bedded Formations // American Rock Mechanics Association Source: Materials for 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. 2020. URL: <https://www.researchgate.net/publication/343852034> (дата обращения: 25.11.2020).
9. Габитов С.И., Гоцуляк А.С., Чебышев И.С., Мухамадиев Р.В. Сопровождение бурения высокотехнологичных скважин на основе интеграции методов геомеханики и геонавигации // Нефтегазовое дело. 2020 т.18. №2. С.15-23. URL: <http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2020/2/ngdelo-2-2020-p15-23.pdf> (дата обращения: 22.11.2020). DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-15-23
10. Нескромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие/ В.В.Нескромных. - Сиб. Федер.ун-т. Красноярск, 2015. – 396 с.
11. Al-Rubaii M., Gajbhiye R., Al-Yami A., Alshalan M., Al-Awami M. Automated Evaluation of Hole Cleaning Efficiency While Drilling Improves Rate of Penetration // International Petroleum Technology Conference-2020: Materials of IPTC. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, 2020. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-19809-MS> (дата обращения: 23.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19809-MS>
12. Stephen W. An aid to managing wellbore stability in real time/ Stephen W. - BP cavings field guide: America, 2008.- 69 p.
13. Jose F., Lida V. Wellbore Stability Improvement Using Caving Analysis // International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering: Materials of 8th International Symposium Geomechanics. Bucaramanga, Colombia. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISRM-ISG-2019-09> (дата обращения: 25.11.2020). 2019
14. Anjanava D., Rohit R., Rajeev R., Jayanta B., Rahul T., Amit S. Cavings Morphology Analysis: A Critical Geomechanical Tool in Optimizing Drillability // International Petroleum Technology Conference: Materials of IPTC. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia. 2020. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-19981-MS> (дата обращения: 22.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19981-MS>

References

1. Al-Bahrani H., Al-Yami A. (2018). Drillstring Vibrations and Wellbore Quality: Where Drillstring Design Meets Geomechanics. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference «Society of Petroleum Engineers». Abu Dhabi, UAE. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-193253-MS> (accessed: 22.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2118/193253-MS> (in English)
2. Hamid O., Qahtani A., Alamer S., Sherbeny W. (2018). Mitigating Wellbore Stability Risks through Geomechanical Solutions. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference «Society of Petroleum Engineers». Abu Dhabi, UAE. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-192872-MS> (accessed: 22.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2118/192872-MS> (in English)
3. Godwin C., Jacob N., Bariakpoa K., Samuel N. (2020). Evaluation of Optimum Mud Weight Window for Prevention of Wellbore Instability in Niger Delta Wells. IOSR Journal of Engineering, 10, 10, 61-66. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/344929228> (accessed: 22.11.2020) (in English)
4. Karimi M. (2013). Drill-Cuttings Analysis for Real-Time Problem Diagnosis and Drilling Performance Optimization. Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition «Society of Petroleum Engineers». Jakarta, Indonesia. Available at:

- https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-165919-MS (accessed: 25.11.2020). DOI: 10.2118/165919-MS (in English)
5. Kumar D., Ansari S., Wang S., Ahmed S., Povstyanova M., Tichelaar B. (2012). Real-time wellbore stability analysis: an observation from cavings at shale shakers. AAPG international conference & exhibition «American Association of Petroleum Geologists (AAPG)». Singapore. Available at: http://www.searchanddiscovery.com/documents/2012/41095kumar/ndx_kumar (accessed: 23.11.2020) (in English)
6. Christopher S., Alireza R., Pouria B. (2018). An approach for wellbore failure analysis using rock cavings and image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 5, 865-878. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/326196552> (accessed: 23.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.011> (in English)
7. Renato G., Zuly H., Yair A. (2014). New Approach for Estimating Cavings Volume to Avoid Wellbore Instabilities. *Materials of Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure «International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Source»*. Goiania, Brazil. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/335189023> (accessed: 25.11.2020).
8. Tsopela A., Bere A., Dutko M., Kato J. (2020). Wellbore Stability and Predicted Cuttings Volume in Deviated Wellbores and Bedded Formations. *Materials for 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium «American Rock Mechanics Association Source»*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/343852034> (accessed: 25.11.2020) (in English)
9. Gabitov S.I., Gotsulyak A.S., Cheby`shev I.S., Muxamadiev R.V. (2020). Soprovozhdenie bureniya vy`sokotekhnologichny`x skvazhin na osnove integracii metodov geomexaniki i geonavigacii [Support of drilling high-technological wells based on the integration of geomechanics and geosteering] *Neftgazovoe delo. - Oil and gas business*, 2, 15-23. Available at: <http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2020/2/ngdelo-2-2020-p15-23.pdf> (accessed: 22.11.2020). DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-15-23 (in Russian).
10. Neskromny`x V.V. (2015) Razrushenie gornyx porod pri provedenii geologorazvedochnyx rabot [Destruction of rocks during geological exploration]. *Sib. Feder.un-t. Krasnoyarsk* (in Russian).
11. Al-Rubaii M., Gajbhiye R., Al-Yami A., Alshalan M., Al-Awami M. (2020). Automated Evaluation of Hole Cleaning Efficiency While Drilling Improves Rate of Penetration. *Materials of IPTC «International Petroleum Technology Conference»*. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-19809-MS> (accessed: 23.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19809-MS> (in English)
12. Stephen W. (2008). An aid to managing wellbore stability in real time. *BP cavings field guide. America*. (in English)
13. Jose F., Lida V. (2019). Wellbore Stability Improvement Using Caving Analysis. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering «Materials of 8th International Symposium Geomechanics»*. Bucaramanga, Colombia. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISRM-ISG-2019-09> (accessed: 25.11.2020). (in English)
14. Anjanava D., Rohit R., Rajeev R., Jayanta B., Rahul T., Amit S. (2020). Cavings Morphology Analysis: A Critical Geomechanical Tool in Optimizing Drillability. *Materials of IPTC «International Petroleum Technology Conference»*. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/IPTC-19981-MS> (accessed: 22.11.2020). DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19981-MS> (in English)

Сведения об авторах

Габитов Салават Илдарович, ведущий специалист, Газпромнефть научно-технический центр
Россия, 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 75-79, литер Д
E-mail: Gabitov.SI@gazpromneft-ntc.ru

Гоцуляк Андрей Сергеевич, главный специалист, Газпромнефть научно-технический центр
Россия, 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 75-79, литер Д
E-mail: Gotsulyak.AS@gazpromneft-ntc.ru

Чебышев Игорь Станиславович, главный специалист, Газпромнефть научно-технический центр
Россия, 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 75-79, литер Д
E-mail: Chebyshev.IS@gazpromneft-ntc.ru

Ахметшин Тагир Рустэмович, аспирант, Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
E-mail: atr93@mail.ru

Authors

S.I. Gabitov, Lead-specialist, Gazpromneft-Science&Technology Center LLC
75-79 D, Moika River Embankment, Saint Petersburg, 190000, Russia
E-mail: Gabitov.SI@gazpromneft-ntc.ru

A.S. Gotsulyak, Chief-specialist, Gazpromneft-Science&Technology Center LLC
Saint-Petersburg, Russian Federation
E-mail: Gotsulyak.AS@gazpromneft-ntc.ru

I.S. Chebyshev, Chief-specialist, Gazpromneft-Science&Technology Center LLC
Saint-Petersburg, Russian Federation
E-mail: Chebyshev.IS@gazpromneft-ntc.ru

T.R. Akhmetshin, PhD student, Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation
E-mail: atr93@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 06.01.2021
Принята к публикации 13.03.2021
Опубликована 30.03.2021*