

Г. М. Эфендиев, член-корр. НАН Азербайджана¹; **О. Г. Кирисенко**, д-р философии по техн. наукам¹; **И. И. Джанзаков**, д-р техн. наук²;
С. К. Буктыбаева, канд. техн. наук²

¹Институт Нефти и Газа Национальной Академии наук Азербайджана, ул. Ф. Амирова, 9, AZ1000, г. Баку, e-mail: galib_2000@yahoo.com, oleg.kirisenko@gmail.com

²Атырауский Университет Нефти и Газа, просп. Азаттык 1, Атырау, Республика Казахстан, e-mail: dzhanzakov-aing@mail.ru, saulek1@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Статья посвящена проблеме изучения геологических разрезов. В основе выполненного анализа лежат результаты геомеханического моделирования на базе геолого-технологических исследований в процессе бурения скважин. Значение геомеханического моделирования заключается в том, что геомеханическое моделирование позволяет значительно обогатить и расширить объем информации о проходимых в процессе бурения породах и в последнее время является необходимым научным методом, позволяющим производить анализ процесса бурения, прогнозировать оптимальные типы долот и режимных параметров, возможные осложнения.

Выполнены сравнительный анализ теоретических исследований напряженного состояния горных пород по упрощенной схеме формирования напряженного состояния и состоянии, принятом в рамках трехмерной теории устойчивости гипотез, а также расчеты напряжений на примере одной из скважин месторождения Карабаглы. С помощью соответствующих уравнений выполнены расчеты и сравнительный анализ результатов для скважины, пробуренной на данном месторождении. Сравнительный анализ результатов расчетов с помощью известных теоретических подходов показал, что разность между главными напряжениями является максимальной на контуре ствола скважины, что позволяет оценить место начала потери устойчивости, и когда действующие напряжения превысят предел прочности породы, деформация примет характер пластического течения, образуя предельную область, которая начинается со стенок скважины и ограничивается областью упругих деформаций.

Информацию о напряженном состоянии в геологической среде можно дополнить по сейсмическим данным.

При бурении скважин в различных геологических условиях возможны осложнения, связанные с аномально высокими пластовыми давлениями, неустойчивостью стенок скважин, поглощением вследствие встречи с проницаемыми пластами или гидроразрыва. При этом геолого-технологические исследования скважин позволяют получить информацию, необходимую для геомеханического моделирования. По результатам геолого-технологических исследований получены зависимости, выражающие изменения с глубиной петрофизических (пористости, проницаемости), прочностных (твердости, абразивности) и упругих (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) характеристик пород.

Ключевые слова: скважина, бурение, горные породы, напряжения, геомеханическое моделирование, геолого-технологические исследования.

Введение

Как известно, бурение скважин обычно проходит в условиях отсутствия или недостаточного объема информации, в связи с чем реализация данного процесса требует обязательного оперативного и квалифицированного контроля со стороны геологических и технологических служб и принятия технологических решений с помощью геолого-

технологических исследований, роль которых в последнее время сильно возросла. К настоящему времени разработаны и успешно внедряются различные системы, позволяющие получать необходимую информацию в процессе бурения по технологическим данным и сформировать тем самым основу для разработки геомеханической модели.

Внедряемое в последнее время геомеханическое моделирование в процессе бурения приводит к существенному повышению эффективности эксплуатации месторождений за счет уменьшения затрат и средств, связанных с непроизводительными операциями, снижения рисков при бурении скважин. Так, например, благодаря геолого-технологическим исследованиям и геомеханическому моделированию можно получить оптимальную траекторию скважины, оптимальную плотность бурового раствора, оптимальные типы долот и режимные параметры, конструкцию скважины, прогнозировать пластовое (поровое) давление, давление гидроразрыва, интервалы с АВПД, потери устойчивости, потери циркуляции и др. В связи с этим в различных организациях составлены программы, в целом позволяющие решать следующие задачи: расчет механических свойств (твердость, абразивность, коэффициент Пуассона) горных пород по стволу скважины [1, 2]; расчет градиента порового давления [1, 2, 3]; расчет констант напряженного состояния [1]; определение градиента обрушения пород [1]; определение градиента поглощения буровой промывочной жидкости [1]; определение градиента давления гидроразрыва [1,2]; определение чувствительности стенки скважин при изменении плотности [1]; определение оптимального профиля скважины, при котором минимизируются риски обрушения, поглощения и гидроразрыва [1]; оптимизация конструкции скважин по результатам геомеханического моделирования (оптимальные глубины спуска обсадных колонн) [1]; оптимизация режимно-технологических параметров бурения по результатам геомеханического моделирования [1, 2]; определение оптимальной плотности бурового раствора [2]; оценка пористости и проницаемости пород разреза [2, 3].

Исходные данные и основные принципы геомеханического моделирования

Значение геомеханического моделирования заключается в том, что геомеханическое моделирование позволяет также значительно расширить объем информации о проходимых в процессе бурения породах и в последнее время является необходимым научным методом, позволяющим производить анализ процесса бурения, прогнозировать оптимальные типы долот и режимных параметров, возможные осложнения.

Задачей геомеханического моделирования является реализация мультидисциплинарного подхода к решению возникающих задач на всех этапах строительства скважин [4, 5]. Представления о существующих мультидисциплинарных связях между математикой, механикой, процессами, происходящими при строительстве скважин, позволяют решить целый ряд технологических задач, связанных с напряженно-деформированным состоянием горных пород и его связью с принятием решений.

При этом являющаяся важной на каждом этапе ведения буровых работ геомеханическая модель позволяет решать прикладные задачи, а также сформировать и сформулировать рекомендации для оптимальной реализации технологических процессов с целью снижения затрат и увеличения скоростей бурения.

Все авторы работ в целом придерживаются одной методологически обоснованной схемы, согласно которой на первом этапе производится сбор и обработка данных (производство информации), затем анализ полученной информации и принятие решений (использование информации). Вся полученная информация вводится в модель механических свойств в процессе ее построения, далее наступает этап использования модели. При этом данная модель позволяет прогнозировать такие геомеханические параметры, как напряжения, пластовое (поровое) давление, петрофизические, прочностные и упругие характеристики горных пород.

Анализ напряженно-деформированного состояния горных пород

Выражения, характеризующие напряженное состояние массива пород вокруг скважинной выработки, предложены С. Г. Лехницким [7]. Согласно [7], распределение напряжений в упругих изотропных плотных породах описывается известной системой уравнений, включающих параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние пород вокруг скважины.

Из выражений, приведенных в отмеченной работе, следует, что кольцевые напряжения имеют наибольшее значение на контуре ствола и по мере удаления от скважины уменьшаются до величины напряжения в нетронутом горном массиве [7, 8]; радиальные напряжения по мере удаления от скважины увеличиваются от значений на контуре ствола, равных давлению столба бурового раствора, до величины напряжения в нетронутом горном массиве. В работе [9] в рамках трехмерной линеаризированной теории дана строгая постановка задач о потере устойчивости состояния равновесия полупространства в окрестности цилиндрической полости, развиты методы решения ранее рассмотренных задач при однородных и неоднородных начальных напряженных состояниях. В работе [9] в рамках принятых предположений рассматривается напряженное состояние вокруг отмеченной цилиндрической полости. Приводится система уравнений, характеризующих напряженное состояние в отмеченных условиях.

Сравнительный анализ результатов расчетов с помощью отмеченных теоретических подходов показал, что разность между главными напряжениями является максимальной на контуре ствола скважины [6, 8], что позволяет оценить место начала потери устойчивости, и, когда действующие напряжения превысят предел прочности породы, деформация примет характер пластического течения, образуя предельную область, которая начинается со стенок скважины и ограничивается областью упругих деформаций.

Известно, что в условиях естественного залегания горных пород они находятся в состоянии равномерного всестороннего сжатия, обусловленного весом вышележащей толщи, тектоническими, а иногда химическими процессами [7]. В работе [7] рассмотрена упрощенная схема формирования напряженного состояния пород в предположении отсутствия тектонических сил и напряжений, обусловленных химическими процессами.

По С. Г. Лехницкому, распределение напряжений в упругих изотропных плотных породах описывается системой уравнений. С помощью этих уравнений, а также уравнений, приведенных в работе [9], выполнены расчеты и сравнительный анализ результатов для скважины, пробуренной на месторождении Карабаглы. Результаты расчетов для пород, залегающих на глубине 3500 м, представлены на рис.1.

Из рис.1, а видно, что на стенке скважины, т.е. при $\frac{r^2}{R^2} = 1$ радиальные напряжения максимальны, а тангенциальные минимальны по абсолютной величине; по мере удаления от стенки скважины первые резко уменьшаются, а вторые—возрастают асимптотически приближаются к пределу, равному коэффициенту бокового распора λ в случае уравнений (а). В случае, который моделируется с помощью выражений, полученных в работе [9], асимптотами являются линии $\lambda+1$ (в случае всестороннего равномерного сжатия; рис. 1, б и λ соответственно для случая неравномерного сжатия (рис.1, в); установлено также [7], что осевые и радиальные напряжения на стенке всегда являются сжимающими, а тангенциальные—растягивающими. Значит, как и следовало ожидать, порода в окрестности скважины находится в более сложном напряженном состоянии, чем порода в нетронутом массиве.

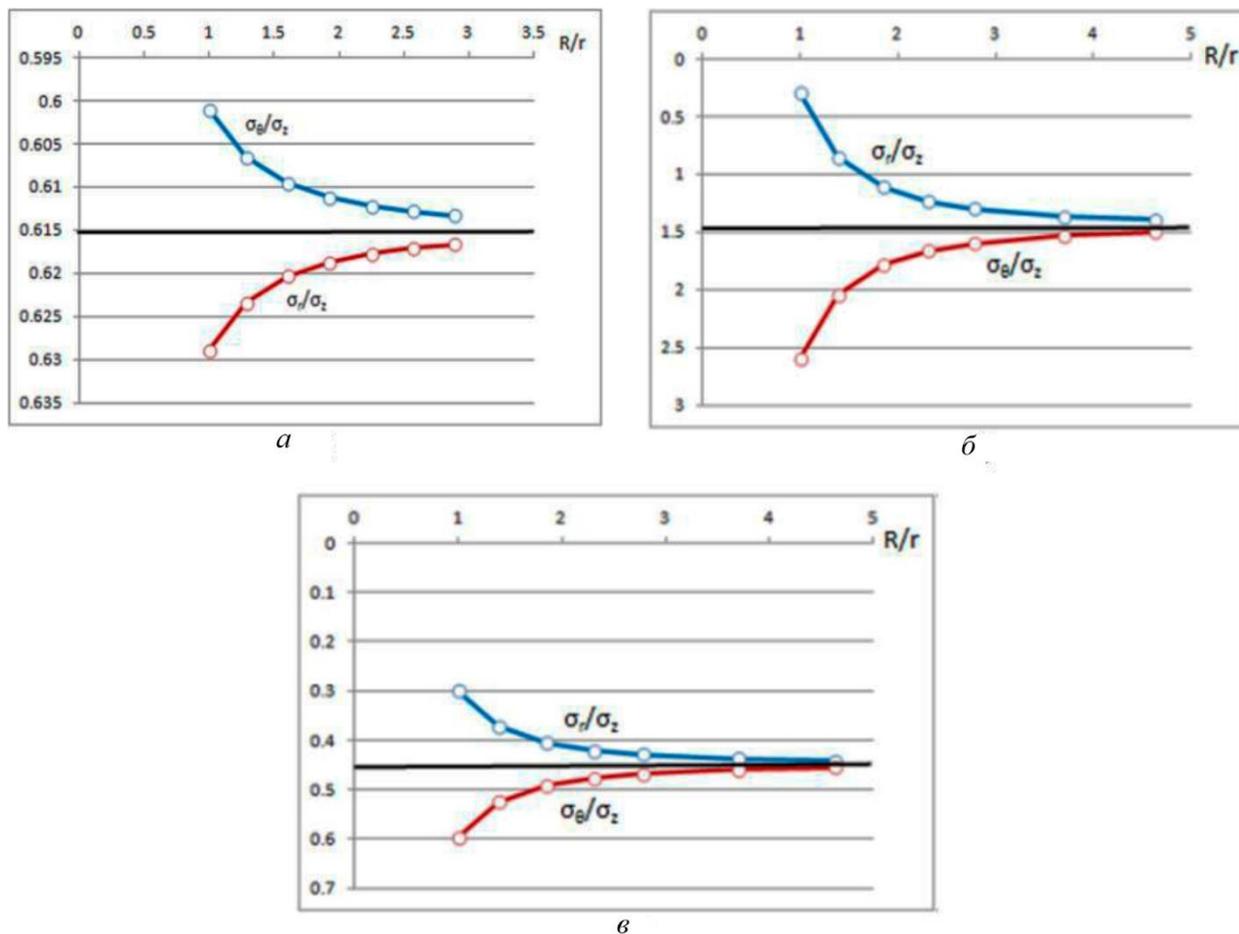


Рис.1. Распределение напряжений вокруг ствола скважины (на примере скважины месторождения Карабаглы для глубины 3500 м)

Значение геолого-технологических исследований и геомеханического моделирования при бурении скважин

При бурении скважин в различных геологических условиях возможны осложнения, связанные с аномально высокими пластовыми давлениями, неустойчивостью стенок скважин, поглощением вследствие встречи с проницаемыми пластами или гидроразрыва. При этом геолого-технологические исследования скважин позволяют получить информацию, необходимую для геомеханического моделирования. На основе данных геолого-технологических исследований по нескольким скважинам с применением соответствующей программы получены физико-механические и барические характеристики разрезов некоторых месторождений. Кроме того, по данным геолого-технологических исследований рассчитаны напряжения вокруг скважины. На рис. 2 показано изменение показателей физико-механических свойств пород разреза месторождения Карабаглы.

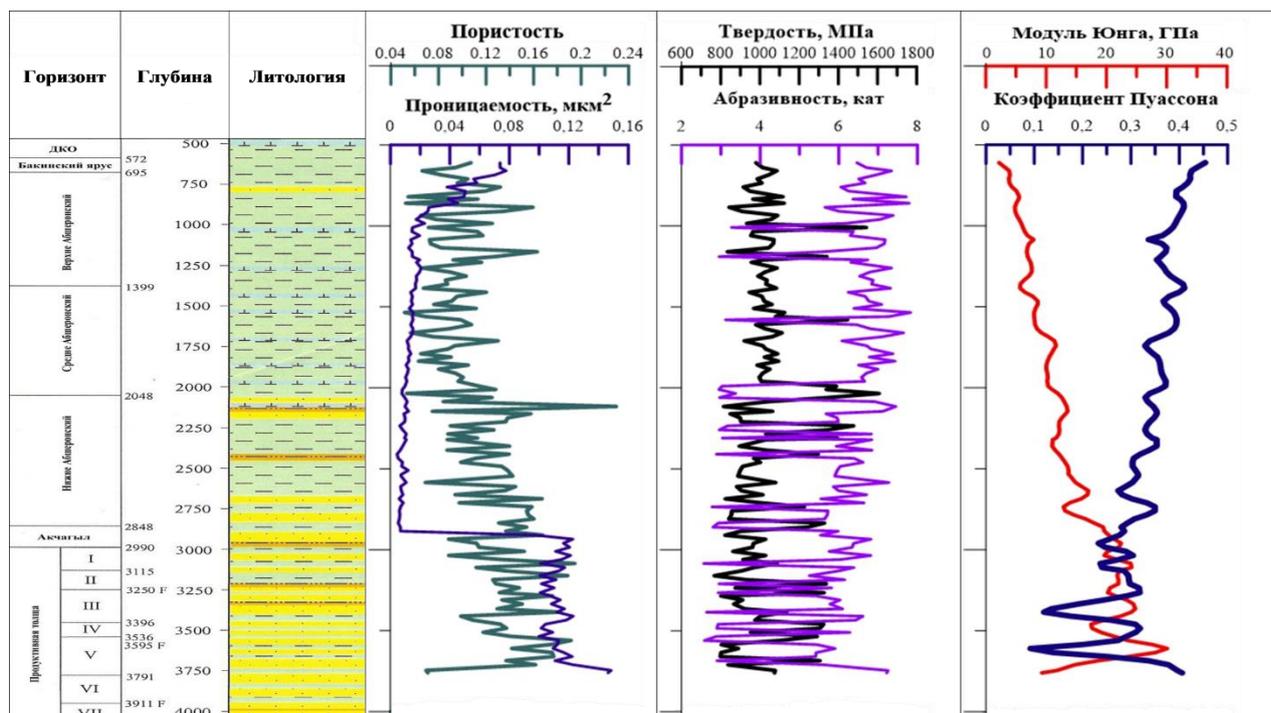


Рис. 2. Изменение показателей физико-механических свойств пород разреза месторождения Карабаглы

На рисунке приводятся литолого-стратиграфические характеристики разреза, графики изменения с глубиной петрофизических (пористости, проницаемости), прочностных (твердости, абразивности) и упругих (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) характеристик пород.

В результате обобщения исследований напряженно-деформированного состояния горных пород, анализа результатов геолого-технологических исследований в процессе бурения скважин можно прийти к следующим выводам:

- выполнены расчеты и сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния вокруг скважины на примере скважины одного из месторождений по упрощенной схеме формирования напряженного состояния, а также состоянию, принятом в рамках трехмерной теории устойчивости гипотез;
- по результатам геолого-технологических исследований получены зависимости, выражающие изменения с глубиной петрофизических (пористости, проницаемости), прочностных (твердости, абразивности) и упругих (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) характеристик пород.

Г. М. Ефендієв¹, О. Г. Кірісенко¹, І. І. Джанзаков², С. К. Буктибасва².

¹Інститут Нафти і Газу Національної Академії наук Азербайджану,

²Атирауський Університет Нафти і Газу, Казахстан

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИВЧЕННЯ ГЕОЛОГІЧНОГО РОЗРІЗУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ І ГЕОЛОГО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Стаття присвячена проблемі вивчення геологічних розрізів. В основі виконаного аналізу лежать результати геомеханічного моделювання на базі геолого-технологічних досліджень в процесі буріння свердловин. Значення геомеханічного моделювання полягає в тому, що геомеханічне моделювання дозволяє значно збагатити і розширити обсяг інформації про проходні в процесі буріння

породи і останнім часом є необхідним науковим методом, що дозволяє проводити аналіз процесу буріння, прогнозувати оптимальні типи доліт і режимних параметрів, можливі ускладнення.

Виконано порівняльний аналіз теоретичних досліджень напруженого стану гірських порід за спрощеною схемою формування напруженого стану та стану, прийнятому в рамках тривимірної теорії стійкості гіпотез, а також розрахунки напружень на прикладі однієї з свердловин родовища Карабагли. За допомогою відповідних рівнянь виконані розрахунки і порівняльний аналіз результатів для свердловини, пробуреної на даному родовищі. Порівняльний аналіз результатів розрахунків за допомогою відомих теоретичних підходів показав, що різниця між головними напруженнями є максимальною на контурі стовбура свердловини, що дозволяє оцінити місце початку втрати стійкості, і коли діючі напруги перевищать границю міцності породи, деформація прийме характер пластичної течії, утворюючи граничну область, яка починається зі стінок свердловини і обмежується областю пружних деформацій.

Інформацію про напружений стан в геологічному середовищі можна доповнити за сейсмічними даними.

При бурінні свердловин в різних геологічних умовах можливі ускладнення, пов'язані з аномально високими пластовими тисками, нестійкістю стінок свердловин, поглинанням внаслідок зустрічі з проникними пластами або гідророзриву. При цьому геолого-технологічні дослідження свердловин дозволяють отримати інформацію, необхідну для геомеханічного моделювання. За результатами геолого-технологічних досліджень отримані залежності, що виражають зміни з глибиною петрофізичних (пористості, проникності), міцності (твердості, абразивності) і пружних (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона) характеристик порід.

Ключові слова: свердловина, буріння, гірські породи, напруги, геомеханічне моделювання, геолого-технологічні дослідження.

G. M. Efendiyev¹, O. G. Kirisenko¹, I. I. Dzhanzakov², S. K. Buktybayeva²

¹Institute of Oil and Gas of Azerbaijan National Academy of Sciences

²University of Oil and Gas, Kazakhstan

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF STUDYING GEOLOGICAL SECTIONS BY RESULTS OF AN ANALYSIS OF STRESS STATE AND GEOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL INFORMATION

The report is devoted to the problem of studying geological sections. The analysis is based on the results of geomechanical modeling on the base of geological and technological research in the process of drilling wells. The importance of geomechanical modeling lies in the fact that geomechanical modeling can significantly enrich and expand the amount of information about rocks passed during the drilling process and it has recently been a necessary scientific method for analyzing the drilling process, predicting the optimal types of bits and operating parameters, possible complications.

A comparative analysis of theoretical studies of the stress state of rocks is carried out according to a simplified scheme of stress state formation and the state adopted in the framework of the three-dimensional theory of stability of hypotheses, as well as stress calculations using the example of one of the wells of the Karabagly field. Using the appropriate equations, calculations and a comparative analysis of the results for the well drilled in this field were performed. A comparative analysis of the calculation results using known theoretical approaches showed that the difference between the main stresses is maximum on the wellbore contour, which allows us to estimate the place where buckling begins and when the acting stresses exceed the rock tensile strength, the deformation will take the form of plastic flow, forming a limiting region that starts from the walls of the well and is limited by the area of elastic strain.

Information on the stress state in the geological environment can be supplemented by seismic data.

When drilling wells in various geological conditions, there may occur complications associated with abnormally high formation pressures, instability of the walls of the wells, lost circulation due to encounters with permeable layers or hydraulic fracturing. At the same time, geological and technological research of wells allows us to get the information necessary for geomechanical modeling. According to the results of

geological and technological studies, dependencies are obtained that express changes of petrophysical (porosity, permeability), strength (hardness, abrasiveness) and elastic (Young's modulus, Poisson's ratio) rock characteristics with depth.

Key words: well, drilling, rocks, stresses, geomechanical modeling, geological and technological research.

Литература

1. Геомеханическое моделирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.unofactor.ru/geomechanics.
2. Джевандшир Р. Д., Эфендиев Г. М. Система геолого-технологического прогнозирования в бурении-основные принципы и задачи //Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1992. – №. 9. – С. 17.
3. Bellotti P., Gerard G. E. Instantaneous log indicates porosity and pore pressure // World Oil. – 1976. – Oct. – P. 90–94.
4. Лукин С. В., Есипов С. В., Жуков В. В., Овчаренко Ю. В., Хомутов А. Ю., Шевчук Т. Н., Сусликов И. В. Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений в бурении // Нефтяное хозяйство. – 2016. – №6. С. 70–73.
5. Вашкевич А. А., Жуков В. В., Овчаренко Ю. В., Бочков А. С., Лукин С. В. Развитие подходов комплексного геомеханического моделирования в ПАО «Газпром нефть» // Нефтяное Хозяйство. – 2016. – № 12. – С.16–19.
6. Моделирование механических свойств геологической среды как средство расшифровки напряжений в горных породах //Анвар Хусен Акбар Али, Тим Браун, Роджер Дельгадо и др. // Нефтегазовое обозрение. – 2005. – Осень. С. 4–23.
7. Лехницкий С. Г. Определение напряжений в упругом изотропном массиве вблизи вертикальной цилиндрической выработки кругового сечения // Изв. АН СССР. ОТН. – 1938. – № 7. – С. 69–76.
8. Деркач А. С., Масленников В. И. Способ повышения устойчивости горных пород в прискважинной зоне. Патент РФ RU 2341638 С1. Общество с ограниченной ответственностью "Газпром геофизика", 2008.
9. Кулиев Г. Г. Основы математической теории устойчивости скважин. Баку, ЭЛМ, 1988, 172 с.

Поступила 30.06.20

References

1. Geomekhanicheskoe modelirovanie. [Geomechanical modeling]. (n.d.). *unofactor.ru*. Retrieved from www.unofactor.ru/geomekhanics [in Russian].
2. Dzhevanshir, R. D. & Efendiev, G. M. (1992) Sistema geologo-tekhnologicheskogo prognozirovaniia v burenii – osnovnye printsipy i zadachi [The system of geological and technological forecasting in drilling, the basic principles and objectives] *Azerbaydzhanskoe nefyanoie khoziaystvo – Azerbaijan oil industry*, 9, 17 [in Russian].
3. Bellotti, P.&Gerard, G. E. (1976). Instantaneous log indicates porosity and pore pressure *World Oil. Oct.*, 90–94.
4. Lukin, S. V., Esipov, S. V., Jukov, V. V., et al. (2016). Raschet ustoichivosti stvola skvazhiny dlia predotvrashcheniia oslozhnenii v burenii [Calculation of the stability of the wellbore to prevent complications in drilling]. *Neftyanoie khoziaistvo – Oil industry*, 6, 70–73 [in Russian].
5. Vashkevich, A. A., Zhukov V. V., Ovcharenko, Yu. V., Bochkov, A. S. & Lukin, S. V. (2016) Razvitie podhodov kompleksnogo geomekhanicheskogo modelirovaniia v PAO «Gazprom nef» [Development of integrated geomechanical modeling approaches at PJSC «Gazprom Neft»]. *Neftyanoie khoziaistvo – Oil industry*, 12, 16–19 [in Russian].

6. Anvar Husen Akbar Ali, Tim Braun, Rodjer Delgado et al. (2005) Modelirovanie mekhanicheskikh svoystv geologicheskoi sredy kak sredstvo rasshifrovki napriazhenii v gornykh porodakh [Modeling the mechanical properties of the geological environment as a means of deciphering stresses in rocks]. *Neftegazovoe obozrenie – Oil and Gas Review, Osen – Fall*, 4–23 [in Russian].
7. Lekhnitskii, S. G. (1938) Opredelenie napryazhenii v uprugom izotropnom massive vblizi vertikalnoi tsilindricheskoi vyrabotki krugovogo secheniia [Determination of stresses in an elastic isotropic array near a vertical cylindrical output with circular section]. *Izv. AN SSSR. OTN. – Proceedings of the USSR Academy of Sciences. DES*, 7, 69–76 [in Russian].
8. Derkach, A. S., & Maslennikov V. I. (2008). Patent of Proceedings of the USSR Academy of Sciences 2341638 [in Russian].
9. Kuliev, G. G. (1988). *Osnovy matematicheskoi teorii ustoichivosti skvazhin [Fundamentals of the mathematical theory of well stability]*. Baku, Elm, [in Russian].

УДК 622.24

DOI: 10.33839/2708-731X-23-1-10-16

М. Є. Чернова, д-р. техн. наук¹; **В. С. Школьна**, ст. викладач²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
76018 м. Івано-Франківськ, Україна,
e-mail: miracherril@gmail.com

²Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Технічний коледж,
вул. Леся Курбаса, 13, 46016 м. Тернопіль, Україна,
e-mail: shkolna13@gmail.com

ДО ТЕХНОЛОГІЇ ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОМПОНОВКИ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Втомно-корозійне руйнування елементів бурильної колони в свердловині, що виникає у процесі буріння глибоких свердловин, є однією з проблем нафтогазової промисловості. Заразом зменшення сил тертя між елементами компоновки низу бурильної колони та стінками стовбура свердловини як із застосуванням гвинтових вибійних двигунів, так і за умов роторного буріння є надзвичайно актуальним питанням. Наявність значних сил тертя перешкоджає доведенню ефективного осьового навантаження у вибій свердловини, що призводить до зменшення механічної швидкості буріння, збільшення тривалості буріння, а отже, і підвищення собівартості буріння нафтогазових свердловин.

У статті розглядається можливість зменшення тертя та корозійно-втомного руйнування за рахунок технології полімерного покриття як елементів компоновки низу бурильної колони, так і її найбільш прихопленебезпечних ділянок.

Основні напрямки проведення досліджень полягали у створенні технології полімерного покриття для труб нафтового сортаменту, зокрема у виборі матеріалів та складових для отримання такого покриття і у розробленні технології його нанесення.

Такий техніко-технологічний комплекс здатний забезпечити підвищення швидкості будівництва нафтогазових свердловин, і, відповідно, знизити її собівартість до 35%.

Важливими залишаються результати промислових досліджень, які можуть бути проведені буровими компаніями України, оскільки дана технологія враховує геологічні умови родовищ Дніпрово-Донецької западини та шельфу Чорного моря.

Ключові слова: бурильна колона, полімерне покриття, тертя, технологія, зносостійкість.

Сучасний напрям у бурінні вимагає зниження сил тертя та забезпечення доведення оптимального навантаження на породоруйнівний інструмент. Дослідженнями доведено, що