

Требования к упруго-прочностным свойствам цементного камня для наклонных и горизонтальных скважин

Салихов А.Р., Ахметова З.И.

ООО «РН-БашНИПнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия
zi_akhmetova@bnipi.rosneft.ru

Аннотация

В работе исследована проблема разрушения цементной крепи вследствие превышения создаваемых нагрузок на цементное кольцо, отсутствия расчетов при выборе требуемых упруго-прочностных свойств цемента для принятых/рассмотренных условий. Представлено теоретическое обоснование подхода к подбору оптимальных упруго-прочностных свойств цементного камня, способного противостоять нагрузкам на разных этапах жизненного цикла и сопротивляться растрескиванию. Работа посвящена численному моделированию устойчивости цементного камня при различных напряжениях в течение срока службы скважины. При анализе использовались фактические данные по модулю Юнга цементного камня, обсадной колонне, напряжений в пласте, свойств горных пород, по опрессовке обсадной колонны, инклинометрии, центрации, коэффициента кавернозности. В результате моделирования выявлена зависимость устойчивости цементного камня к стрессам при выполнении опрессовки от зенитного угла скважины, а также упругих свойств горных пород и цементного камня. Полученные прогнозы могут использоваться для выбора требуемых параметров цементного камня с колонной и породой. Предлагаемое технологическое решение не имеет отрицательных последствий, не требует значительного увеличения затрат, в свою очередь снижает риски разрушения цементного камня в процессе строительства и эксплуатации скважины, а также уменьшает дополнительные временные и финансовые затраты на проведение ремонтно-изоляционных работ.

Материалы и методы

Численное моделирование участка ствола скважины при стационарном статическом нагружении методом конечных элементов в уравнениях теории упругости в специализированном программном обеспечении.

Ключевые слова

цементирование, заколонная циркуляция, упруго-прочностные свойства цементного камня, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, моделирование разрушения кольцевой изоляции

Для цитирования

Салихов А.Р., Ахметова З.И. Требования к упруго-прочностным свойствам цементов для наклонных и горизонтальных скважин // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 6. С. 68–71. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-6-68-71

Поступила в редакцию: 09.09.2024

DRILLING

UDC 622.24 | Original Paper

Requirements for stress-strained properties of cements for inclined and horizontal wells

Salikhov A.R., Akhmetova Z.I.

“RN-BashNIPneft” LLC (“Rosneft” PJSC Group Company), Ufa, Russia
zi_akhmetova@bnipi.rosneft.ru

Abstract

In this paper, the problem of obtaining a behind-the-casing flow (hereinafter - BCF) at the stage of well construction and operation is raised. The fundamental and theoretical explanation of the approach to the selection of optimal stress-strained properties of cement brick capable of withstanding loads at different stages of the life cycle and resisting cracking is presented. The grounds for this paper is numerical simulation of a cement column under reservoir conditions. As part of the study, various stresses affecting on the cement brick during the well construction and completion were simulated. Calculations have been performed to assess the limiting stresses on the cement column, to predict the destruction of cement brick, based on actual data on cement brick, casing string, mechanical properties of rocks, stresses in the formation (rock mass). As a result of the research conducted, the maximum loads on the cement brick were determined depending on: the elastic properties of formation and cement brick, the thickness of the cement column, the loads during the casing pressure testing. The obtained forecasts can be used to select the appropriate parameters of the cement brick, to reduce the risk of damage to the cement column and, as a result, to minimize the risks of annular fluid migration to the surface. The proposed process solution has no negative consequences, does not require significant cost increases, in turn, reduces the risks of destruction of cement brick during the well operation, reduces additional well logging and repair and insulation work.

Materials and methods

Numerical modeling of a wellbore section under stationary static loading using the finite element method in the equations of elasticity theory in specialized software.

Keywords

cementing, behind-the-casing flow, stress-strained properties of cement brick, Young's modulus, Poisson's ratio, modeling of annular protection failure

For citation

Salikhov A.R., Akhmetova Z.I. Requirements for stress-related properties of cement for controlled directional and horizontal well. Exposition Oil Gas, 2024, issue 6, P. 68–71. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2024-6-68-71

Received: 09.09.2024

Введение

Строительство горизонтальных скважин остается одной из наиболее важных областей для нефтяной промышленности [1]. Эффективность и окупаемость горизонтальных скважин зачастую обусловлены их дебитом и сроком службы. Успешное выполнение работ по цементированию остается обязательным фактором для продления срока службы скважины.

Качество цементной крепи скважины обеспечивается: 1) соблюдением требуемых параметров цементного раствора (водоотдача, водоотделение, прочность, стабильность, расширение, время переходного периода и т. д.) путем регулирования его состава; 2) соблюдением технологии цементирования (обеспечение наилучшей центрации, использование эффективных буферных жидкостей, вращение и/или расхаживание обсадной колонны, увеличение производительности закачки продажной жидкости, подготовка ствола скважины к цементированию) [2].

Стоит отметить, что выполнение первых двух условий не гарантирует целостность цементного камня в течение срока службы скважины. Поэтому обязательным условием качественного цементирования является подбор цемента с упруго-прочностными параметрами, которые обеспечивают целостность цементного кольца при длительной эксплуатации [3]. Несоответствие упруго-прочностных свойств цементного камня требуемым влечет за собой разрушение цементной крепи, что влечет за собой негерметичность межколонного пространства и заколонную циркуляцию [4].

Общепринятые стандарты ГОСТ 1581-96, API 10A регламентируют требования только для чистых цементов. Требования для цементных растворов, приготовленных из цемента с добавками, подбираются исходя из скважинных условий и устанавливаются регламентами компаний. В настоящее время в регламентах компаний отсутствуют методики и алгоритмы расчетов требуемых упруго-прочностных свойств цементного камня, учитывающих конструкцию скважины, ее траекторию, упругие свойства горной породы, вертикальное и горизонтальные напряжения в пласте, пластовое давление, а также давление в обсадной колонне, требования к упруго-прочностным свойствам цементного камня [5]. Целью данной работы является определение упруго-прочностных свойств цементного камня, которые обеспечивают целостность цементной крепи наклонных и/или горизонтальных участков скважины в пластовых условиях в процессе опрессовки колонны. Для выполнения данной цели была поставлена следующая задача — получение предельных напряжений, возникающих в цементном кольце при определенных значениях модуля Юнга цемента и породы, путем численного моделирования методом конечных элементов системы «обсадная колонна — цементное кольцо — горная порода» в условиях всестороннего давления горных пород и давления в обсадной колонне в процессе опрессовки.

Подход к определению требований к упруго-прочностным свойствам цементного камня

Цементное кольцо находится в сложно-напряженном состоянии вследствие изначального сложно-напряженного состояния горного массива [6, 7]. Вертикальное и горизонтальные напряжения в пласте

совместно с избыточным давлением в обсадной колонне воздействуют на цементное кольцо, создавая в нем напряжения, которые распределяются в объеме неравномерно. Для сохранения целостности в областях цементного кольца с максимальными значениями напряжений предел прочности цемента должен быть выше этих напряжений. Упругие свойства каждого элемента системы «обсадная колонна — цементное кольцо — горная порода» напрямую влияют на напряженное состояние всей системы целиком и не могут быть проигнорированы [8]. Важную роль играют конструкция и геометрия скважины, а также расположение центрации и наклона ствола скважины относительно главных напряжений в пласте [9].

Ранее были проведены исследования влияния модулей Юнга породы, цемента, вертикального и горизонтальных напряжений в пласте, давления опрессовки и толщины цементного кольца на предельные напряжения, возникающие в цементном кольце в вертикальных скважинах [5]. Влияние зенитного угла скважины на предельные напряжения, возникающие в цементном кольце, было рассмотрено только на данном этапе исследований.

Определение максимальных напряжений, возникающих в цементном кольце, производится путем численного моделирования методом конечных элементов в уравнениях теории упругости системы «обсадная колонна — цементное кольцо — горная порода». Результатом моделирования являются зависимости предельных нагрузок, возникающих

в цементном кольце, от модуля Юнга и коэффициента Пуассона (цементного камня и горных пород) для различных зенитных углов скважины.

Требуемые значения модуля Юнга, при которых обеспечивается целостность цементного кольца при фактических скважинных условиях, определяются зависимостью предельных напряжений ($\sigma_{пр}$) от модуля Юнга (E) (рис. 1). Если упруго-прочностные свойства цементного камня, определенные путем лабораторных испытаний, окажутся ниже кривой, то данный цементный камень не будет способен выдерживать нагрузки в скважине [10–12].

Параметры численного моделирования

Применяемая в численном моделировании трехмерная модель описывает участок скважины с параметрами, указанными в таблице 1. Параметры конструкции скважины, плотности цемента, модуля Юнга породы и напряжений в пласте приняты для удобства расчетов и как усредненные и распространенные по нескольким регионам. Значения модулей Юнга цемента 5–15 ГПа приняты как охватывающие большую часть диапазона фактических значений по модулю Юнга тампонажных цементов. Обсадная колонна представлена полым цилиндром (рис. 2) с модулем упругости 200 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,32 д. ед. Для моделирования центрация принята 70 % во всем интервале цементирования.

Скважина находится на диагонали куба (рис. 3), который представляет массив

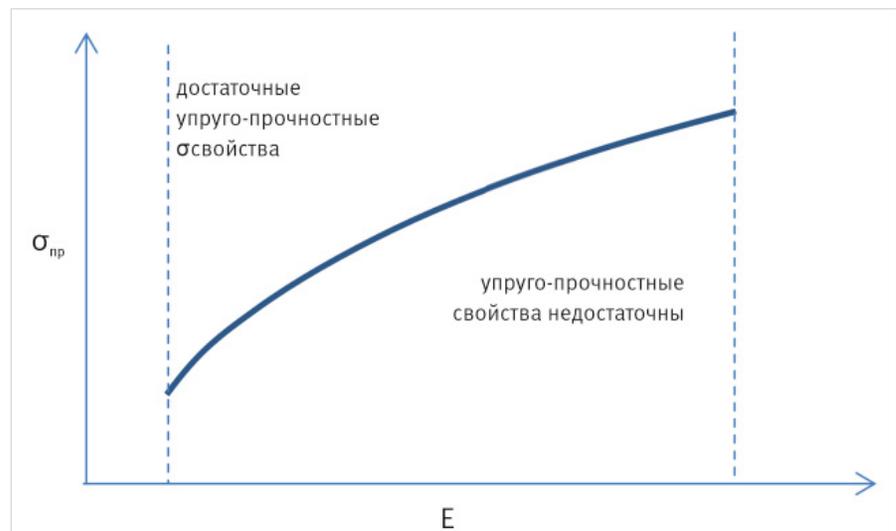


Рис. 1. Требования к упруго-прочностным свойствам цементного камня
Fig. 1. Requirements for stress-strained properties of set cement

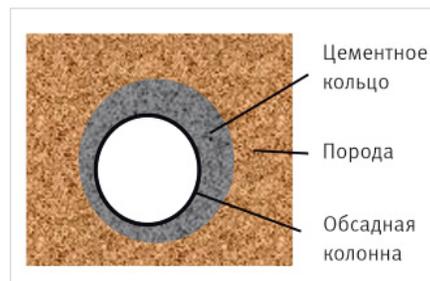


Рис. 2. Схема скважины. Вид перпендикулярно оси скважины
Fig. 2. Well diagram. perpendicular to borehole axis

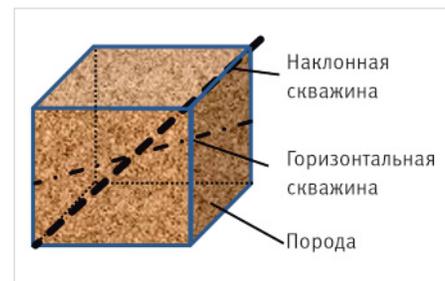


Рис. 3. Расположение скважины в массиве горных пород
Fig. 3. Borehole in rock mass

горных пород, в случае горизонтальной скважины — расположение по диагонали среднего сечения куба (штрихпунктирная линия на рис. 3). Горизонтальные напряжения принимались равными друг другу [9].

Результаты численного моделирования

Результаты представлены в виде графиков зависимостей максимальных напряжений от зенитного угла и модуля Юнга цемента и породы. Для удобства рассмотрим два случая.

Случай № 1: моделирование участка скважины для значений зенитного угла: 35°, 62°, 90°, модуля Юнга цементного камня: 5 ГПа, 10 ГПа, 15 ГПа, при модуле Юнга породы 35 ГПа.

Из рисунка 4 видно, что с увеличением зенитного угла максимальные напряжения в цементном кольце нарастают нелинейно до предельного значения при зенитном угле равном 90°. Полученные зависимости не являются линейными. Между зенитными углами в 62° и 90° разница между максимальными напряжениями практически отсутствует для модуля Юнга цементного камня в 5 ГПа и составляет 0,1 МПа, в то же время для модуля Юнга цементного камня в 15 ГПа разница составила немногим больше 0,5 МПа. Больше влияние на максимальные напряжения оказывает модуль Юнга цементного камня.

Табл. 1. Исходные данные для моделирования
Tab. 1. Modeling Input Data

Глубина спуска обсадной колонны по стволу/ по вертикали, м	2 500/1 700
Диаметр обсадной колонны в интервале от 0 до 2 500 м, мм	177,8×9,19
Диаметр открытого ствола скважины в интервале от 480 до 2 500 м, мм	220,7
Кэф. кавернозности в открытом стволе (Кк) в интервале от 480 до 2 500 м	1,25
Интервал расположения цементного раствора 1,9 г/см ³ , м по стволу	330–2 500
Модуль Юнга горной породы, ГПа	25, 35, 45
Модуль Юнга тяжелого цементного камня, ГПа	5, 10, 15
Давление опрессовки обсадной колонны на глубине 1 700 м по вертикали, МПа	11,0
Вертикальный стресс на глубине 1 700 м по вертикали, МПа	36,3
Горизонтальный стресс на глубине 1 700 м по вертикали, МПа	15,5
Зенитный угол	35°, 62°, 90°

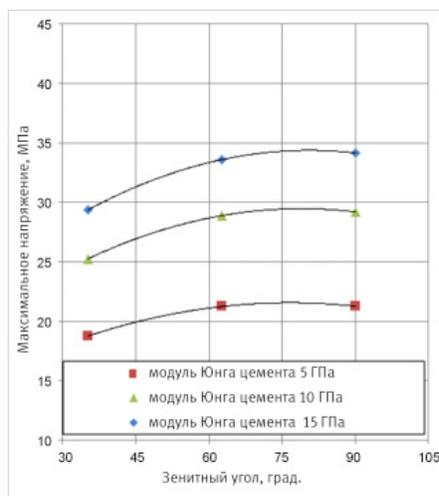


Рис. 4. Зависимость максимального напряжения в цементном кольце от зенитного угла
Fig. 4. Maximum stress in cement sheath vs. slope angle

В случае № 2 моделировались варианты со значениями модуля Юнга цементного камня: 5 ГПа, 10 ГПа, 15 ГПа и породы: 25 ГПа, 35 ГПа, 45 ГПа для горизонтального участка скважины (зенитный угол 90°).

Из рисунка 5 видно, что увеличение модуля Юнга цемента влечет за собой увеличение максимальных напряжений в цементном кольце.

В результате моделирования выявлено, что большие значения модуля Юнга горной породы уменьшают максимальные напряжения в цементе (рис. 6). Следовательно, игнорирование влияния породы может приводить к ошибкам, т. к. диапазон модуля Юнга горных пород сильно варьируется (от 15 до 80 ГПа).

Итоги

В результате численного моделирования цементного кольца сделаны следующие выводы:

- горизонтальный ствол для цементного кольца является наиболее нагруженным участком;
- разница между максимальными напряжениями для случаев с зенитными углами в 62° и 90° незначительна;
- сильное влияние на максимальные напряжения в цементном кольце оказывает модуль Юнга цементного камня и горных пород;

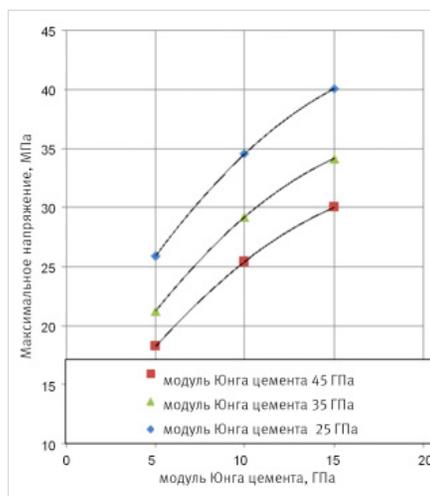


Рис. 5. Зависимость максимального напряжения в цементном кольце от модуля Юнга цементного камня
Fig. 5. Maximum stress in cement sheath vs. Young's modulus of set cement

- игнорирование влияния породы приводит к ошибочным требованиям для упруго-прочностных свойств цементного камня;
- достоверные данные по модулю упругости горных пород необходимы для определения обоснованных требований к упруго-прочностным свойствам цементного камня.

Корректный расчет требуемых параметров упруго-прочностных свойств цементного камня, при которых обеспечивается целостность цементного кольца при фактических скважинных условиях, путем численного моделирования позволяет актуализировать технические требования для включения в тендерную документацию по закупке сервиса по цементированию, а именно:

- смягчить требования к цементу в тех случаях, когда модули упругости горных пород завышены, что снизит стоимость дизайна цементного раствора;
- ужесточить требования к цементу в геологических условиях с низким модулем Юнга горных пород, что приведет к удорожанию дизайна цементных растворов и повышению устойчивости цементного камня к разрушениям.

Выводы

Применение обоснованных численным моделированием требований к упругим модулям цементного камня позволит допускать в работу лишь те цементные системы, которые способны выдерживать пластовые напряжения и рабочие нагрузки без разрушения в процессе эксплуатации, что, в свою очередь, приведет к сокращению количества ремонтно-изоляционных работ, снизит риски колонной циркуляции и увеличит срок службы скважины.

Литература

1. Kinzel H., Martens J.G. Application of new centralizer types to improve zone isolation in horizontal wells. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, SPE-50438-MS. (In Eng).
2. Логвиненко С.В. Цементирование нефтяных и газовых скважин. Москва: Недра, 1986. 280 с.
3. Усманов Р.Х., Шарапов Р.Р.,

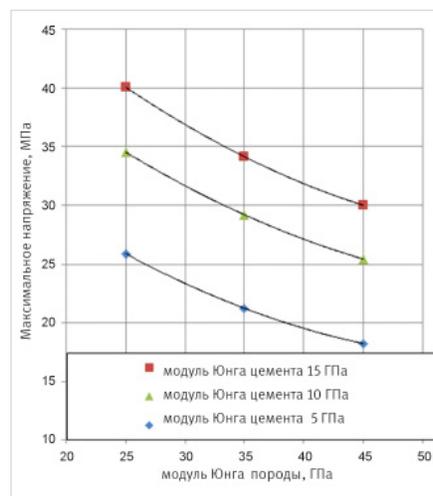


Рис. 6. Зависимость максимального напряжения в цементном кольце от модуля Юнга породы
Fig. 6. Maximum stress in cement sheath vs. Young's modulus of rock

- Муллаянов А.И., Левченко Е.А. Исследование упругопрочностных свойств цементного камня тампонажного материала при одноосном сжатии // Нефтегазовое дело. 2022. № 6. С. 106–113.
4. Feng Y., Gray K.E. Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, Vol. 152, P. 511–522. (In Eng).
5. Салихов А.Р., Ахметова З.И., Мардаганиев Т.Р. Оптимизация требований к упругопрочностным свойствам цементного камня для минимизации рисков заколонных перетоков // Нефть. Газ. Новации. 2023. № 10. С. 77–81.
6. Литвинский Г.Г. Основы горной геомеханики. Том 1. Механические свойства горных пород и массивов. Алчевск: ДонГТУ, 2012. 312 с.
7. Кацауров И.Н. Механика горных пород. М.: Недра, 1981. 160 с.
8. Khodami E., Ramezanzadeh A., Noroozi M. Numerical modeling of oil well integrity with a particular view to cement (case study: Maroon Oilfield in southwest of Iran). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, Vol. 196, 107991. (In Eng).
9. Jo H., Gray K.E. Mechanical behavior of concentric casing, cement, and formation using analytical and numerical methods. *ARMA US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. 2010. ARMA-10-142. (In Eng).
10. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. Введ. 01.07.1992. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
11. ASTM D7012-14 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. DOI:10.1520/D7012-14e01. (In Eng).
12. Рекомендованные практики АНИ 10В-2/ ISO 10426-2. Промышленность нефтяная и газовая. Цементы и материалы для цементирования скважин. Часть 2. Испытания цемента для скважин. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005.

ENGLISH

Results

As a result of numerical modeling of the cement sheath, the following conclusions were made:

1. The horizontal borehole for the cement sheath is the most loaded section.
2. The difference between the maximum stresses for slope angles 62° and 90° is not significant.
3. Young's modulus of the set cement and rocks has a strong influence on the maximum stresses in the cement sheath.
4. Ignoring the influence of the rock leads to erroneous requirements for the stress-strained properties of the set cement.
5. Reliable data on the elastic modulus of rocks are necessary for the calculation of justified requirements for the stress-strained properties of the set cement.

The correct calculation of requirements for stress-strained properties of cement brick, i.e., determination of the values of Young's modulus at which the integrity of the cement sheath is ensured under actual

well conditions, by numerical modeling helps updating technical requirements for inclusion in tender documentation for the purchase of cementing services, namely:

- to relax the requirements for cement in cases where the elastic moduli of rocks are too high, which will reduce the cost of cement slurry design;
- tighten the requirements for cement in geological conditions with a low Young's modulus of rocks, which will lead to an increase in the cost of cement slurry design and an increase in the resistance of the set cement to destruction.

Conclusions

The use of requirements for elastic moduli of cement brick, substantiated by numerical modeling, will allow only those cement systems to be used that are capable of withstanding formation stresses and loads without destruction during operation, which, in turn, will lead to a reduction in the amount of repair and insulation work, reduce the risks of behind-the-casing circulation and increase the service life of the well.

References

1. Kinzel H., Martens J.G. Application of new centralizer types to improve zone isolation in horizontal wells. *SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*, SPE-50438-MS. (In Eng).
2. Logvinenko S.V. *Cementing of oil and gas wells*. Moscow: Nedra, 1986, 280 p. (In Russ).
3. Usmanov R.Kh., Sharapov R.R., Mullayanov A.I., Levchenko E.A. Research of the elastic-strength properties of well cementing plugging material under uniaxial compressive strength. *Petroleum Engineering*, 2022, issue 6, P. 106–113. (In Russ).
4. Feng Y., Gray K.E. Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, Vol. 152, P. 511–522. (In Eng).
5. Salikhov A.R., Akhmetova Z.I., Mardaganiev T.R. Improvement of requirements for stress-strained properties of cement brick to minimize risks of wellbore leakage. *Oil. Gas. Innovations*, 2023, issue 10, P. 77–81. (In Russ).
6. Litvinsky G.G. *Fundamentals of mining geomechanics*. Volume 1. Mechanical properties of rocks and rock mass. Alchevsk: DonSTU, 2012, 312 p. (In Russ).
7. Katsaurov I.N. *Rock mechanics*. M.: Nedra, 1981, 160 p. (In Russ).
8. Khodami E., Ramezanzadeh A., Noroozi M. Numerical modeling of oil well integrity with a particular view to cement (case study: Maroon Oilfield in southwest of Iran). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, Vol. 196, 107991. (In Eng).
9. Jo H., Gray K.E. Mechanical behavior of concentric casing, cement, and formation using analytical and numerical methods. *ARMA US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. 2010. ARMA-10-142. (In Eng).
10. State Standard 28985-91. *Rocks. Method for determining deformation characteristics under uniaxial compression*. Effective since 01.07.1992. Moscow: Standards Publishing and Printing Complex, 2004. (In Russ).
11. ASTM D7012-14 Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. DOI:10.1520/D7012-14e01. (In Eng).
12. Recommended Practices ANI 10V-2 / ISO 10426-2. *Petroleum and natural gas industries. Cements and materials for well cementing. Part 2. Testing of well cements*. Moscow: FSUE "Standartinform", 2005. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Салихов Амур Раилевич, заведующий лабораторией геомеханических исследований, ООО «РН-БашНИПнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия
Для контактов: salikhovar@bniipi.rosneft.ru

Ахметова Зульфия Ишбулдовна, главный специалист отдела техники и технологии строительства скважин, ООО «РН-БашНИПнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия
Для контактов: zi_akhmetova@bniipi.rosneft.ru

Salikhov Amur Railevich, head of the geomechanical research laboratory, "RN-BashNIPneft" LLC ("Rosneft" PJSC Group Company), Ufa, Russia
Corresponding author: salikhovar@bniipi.rosneft.ru

Akhmetova Zulfiia Ishbuldovna, chief specialist of the well construction equipment and technology department, "RN-BashNIPneft" LLC ("Rosneft" PJSC Group Company), Ufa, Russia
Corresponding author: zi_akhmetova@bniipi.rosneft.ru