

УДК 622.276

ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КОЛОННЫ И ЦЕМЕНТНОЙ КРЕПИ

А. М. ЖУКОВСКИЙ, П. П. ПОВЖИК

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

Аннотация. Посвящена определению величины уплотнения коллектора и оценке влияния этого параметра на напряженно-деформированное состояние системы «горная порода – цементная крепь – эксплуатационная колонна». При разработке месторождений в ходе снижения пластового давления меняется напряженно-деформированное состояние горных пород. Это приводит к сжатию пор и уплотнению коллектора. Величина уплотнения напрямую зависит от механических свойств горных пород, которые определяются по результатам керновых лабораторных испытаний. Все больше в производственные процессы нефтегазовой отрасли внедряются современные методы компьютерного моделирования, основанные на применении различных численных методов. Это направлено на оптимизацию работы оборудования и минимизацию рисков, связанных с производственными процессами. Рассмотрено применение метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния системы «горная порода – цементная крепь – эксплуатационная колонна». Результаты расчета уплотнения коллекторов изученных объектов показали, что изученные объекты не подвергаются критическим нагрузкам в области цементной крепи и обладают достаточным запасом прочности, однако в условиях значительной депрессии возможно превышение критических значений напряжений с нарушением целостности системы «горная порода – цементная крепь – эксплуатационная колонна».

Ключевые слова: уплотнение коллектора, керновые испытания, сжимаемость, цементный камень, метод конечных элементов.

Для цитирования. Жуковский, А. М. Влияние уплотнения коллектора на напряженно-деформированное состояние эксплуатационной колонны и цементной крепи // Нефтегазовый инжиниринг / А. М. Жуковский, П. П. Повжик. – 2025. – № 2 (3). – С. 83–90.

EFFECT OF COLLECTOR COMPACTION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE PRODUCTION STRING AND CEMENT SUPPORT

A. M. ZHUKOVSKY, P. P. POVZHİK

RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel

Annotation. The article is devoted to determining the reservoir compaction value and evaluating the effect of this parameter on the stress-strain state of the rock – cement support – production column system. During the development of deposits, the stress-strain state of rocks changes during the reduction of reservoir pressure. This leads to compression of the pores and compaction of the collector. The amount of compaction directly depends on the mechanical properties of rocks, which are determined by the results of core laboratory tests. More and more modern methods of computer modeling based on the application of various numerical methods are being introduced into the production processes of the oil and gas industry. This is aimed at optimizing the operation of equipment and minimizing the risks associated with production processes. The application of the finite element method for determining the stress-strain state of the “rock – cement support – production column” system is considered. The results of calculating the reservoir compaction of the studied objects showed that the studied objects are not subjected to critical loads in the area of cement support and have a sufficient margin of safety, however, in conditions of significant depression, critical stress values can be exceeded with a violation of the integrity of the “rock – cement support – production column” system.

Keywords: reservoir compaction, core testing, compressibility, cement stone, finite element method.

For citation. Zhukovsky A. M., Povzhik P. P. Influence of collector compaction on the stress-strain state of the production string and cement support. *Oil and gas engineering*, 2025, no. 2 (3), pp. 83–90 (in Russian).

Введение. Разработка месторождений сопровождается снижением пластового давления, что влечет за собой изменение напряженно-деформированного состояния пород и, как следствие, уплотнение коллектора. На месторождениях США, Венесуэлы и Северного моря зафиксированы случаи аномальных просадок земной поверхности (более 1 м), вызванных данным процессом, которые приводят к значительному экономическому и экологическому ущербу [1]. При снижении пластового давления возрастает нагрузка на цементную крепь, что может привести к разрушению хрупкого цементного камня и, как следствие, возникновению заколонных перетоков. Проблема заколонных перетоков сохраняет свою актуальность, несмотря на многочисленные исследования и разработки, направленные на создание долговечной и герметичной цементной крепи [2, 3].

Величина уплотнения напрямую зависит от механических свойств горных пород, которые определяются по результатам керновых лабораторных испытаний. Для расчета величины уплотнения использовались результаты лабораторных испытаний керна по определению сжимаемости методом эффективного напряжения и методом истощения.

Все больше в производственные процессы нефтегазовой отрасли внедряются современные методы компьютерного моделирования, основанные на применении различных численных методов. Это направлено на оптимизацию работы оборудования и минимизацию рисков, связанных с производственными процессами. В данной работе рассмотрено применение метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния системы «горная порода – цементная крепь – эксплуатационная колонна».

Актуальность работы заключается в научном обосновании и практическом решении вопросов оптимизации разработки месторождений и подборе тампонажных материалов для цементирования скважин.

Целью работы. Определение напряженно-деформированного состояния сопряженных элементов системы «горная порода – цементная крепь – эксплуатационная колонна» в условиях усадки продуктивного интервала с учетом выявленных значений сжимаемости коллекторов на основании построения компьютерных моделей.

Материалы и методика проведения исследований. Лабораторные испытания керна, численное моделирование физических процессов.

Описание работы. Оценка степени уплотнения коллектора является одной из задач, которые решает геомеханическое моделирование. Отмечается актуальность мониторинга процесса уплотнения коллектора в непосредственной близости от обсадной трубы для выявления влияния воронки депрессии. Факторами неблагоприятного воздействия на конструкцию скважины являются знакопеременные нагрузки на цементную крепь, заполняющую пространство между стенкой пробуренной скважины и наружной поверхностью обсадной трубы. В случае организации периодической работы нагнетательных скважин пластовое давление в области воронки депрессии может изменяться по знакопеременной зависимости, что, в свою очередь, обеспечит работу цементной крепи в условиях, сходных с усталостным нагружением. Механизм взаимодействия различных по жесткости материалов – стали, цемента и горной породы – будет определяться градиентом деформаций и напряжений в окрестности стенки трубы. Размах напряжений и деформаций в этом случае будет определять степень вероятности повреждения цементной крепи. Очевидно, что оценка напряженно-деформированного состояния в окрестности обсадной трубы с учетом деформации

коллектора, вызванной его уплотнением, позволит проанализировать вероятность повреждения цементной крепи.

Для определения величины уплотнения коллектора использовались результаты проведения лабораторных исследований по оценке сжимаемости горных пород. Расчет величины уплотнения коллектора выполнялся по формуле [4]:

$$\Delta H = C_m H_{yes} (P_i - P_{final}), \quad (1)$$

где H_{yes} – эффективная вертикальная высота коллектора, м; P_i – начальное пластовое давление, МПа; P_{final} – конечное пластовое давление (после истощения), МПа;

C_m – коэффициент одноосного уплотнения; $C_m = \frac{1}{3} \left[\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \right] (1-\beta) C_b$; C_b – общая сжимаемость, 1/МПа; ν – коэффициент Пуассона; β – соотношение сжимаемости материнской породы (зерен) и общей сжимаемости породы $\left(\frac{C_g}{C_b} \right)$.

Величина общей сжимаемости, сжимаемости зерна и коэффициент Пуассона определялись в ходе лабораторных экспериментов на сжимаемость образцов керна горной породы [5]. Испытания проводились на установке псевдотрехосного сжатия RTR-1000, воспроизводящей пластовые условия залегания (температура, всестороннее и поровое давление). Исследования на сжимаемость проводились по схеме, включающей методы эффективного напряжения и истощения, с интегрированными стадиями нагружения для определения упругих характеристик (рис. 1).

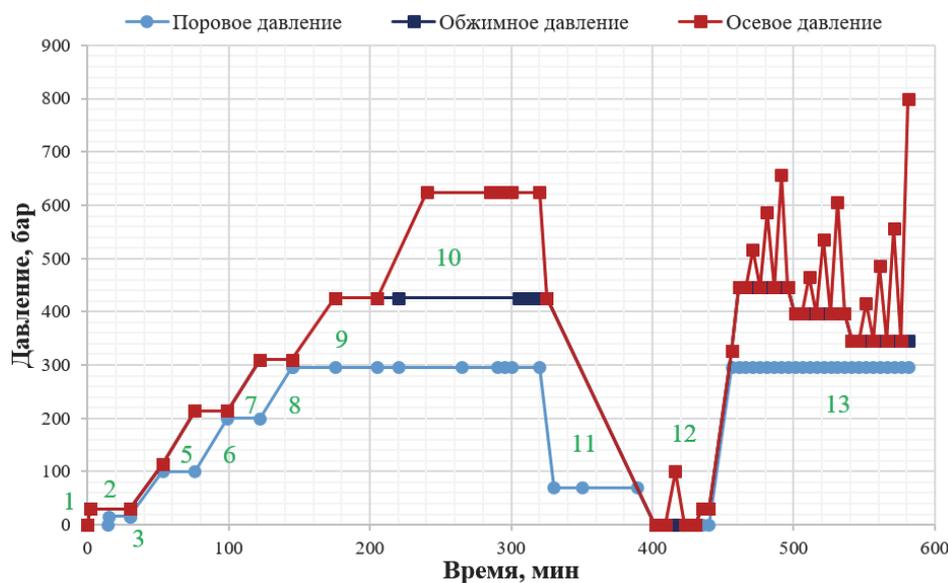


Рис. 1. Схема проведения испытаний по определению сжимаемости и упругих характеристик образцов керна горной породы

Fig. 1. Test scheme for determining compressibility and elastic properties of rock core samples

В результате проведения испытаний, а также используя фактические параметры скважин, по формуле (1) была получена величина уплотнения коллектора для скважин (см. таблицу).

Таблица 1. Характеристики моделей коллекторов

Table 1. Reservoir model characteristics

Наименование объекта	Скважина	Пласт	Мощность, м	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Уплотнение коллектора, м
Бескопыльновское	3	D3sr	13	56,2	0,34	0,00317
Речицкое	414	D3lb(brh)	5,5	40,0	0,41	0,00148
Речицкое	342	D3lb(brh)	3,8	48,9	0,33	0,00583
Мармовичское	160q	D3el	13	38,0	0,27	0,00707
Мармовичское	160q	D3zd	13	39,0	0,22	0,0158
Речицкое	601	D3vr	13,5	51,6	0,25	0,0025
Речицкое	601	D2vtb + pr	3,9	31,6	0,21	0,00685
Речицкое	601	PR2	6,0	22,5	0,21	0,0043
Ю-Сосновское	140n2	D3el	15,6	38,0	0,27	0,0315

Численный расчет напряжений вблизи скважины проводился с использованием программного комплекса конечно-элементного моделирования ANSYS. Разработанная конечно-элементная модель включает участок породы-коллектора, цементный камень, обсадную колонну (рис. 2).

Модель коллектора имеет форму цилиндра с осесимметричным расположением скважины. Высота и диаметр цилиндра принимались равными мощности коллектора. Влияние пластового давления на внешнюю поверхность цементной крепи считали уравновешенным со стороны столба жидкости во внутреннем пространстве трубы. Собственный вес трубы не учитывали.

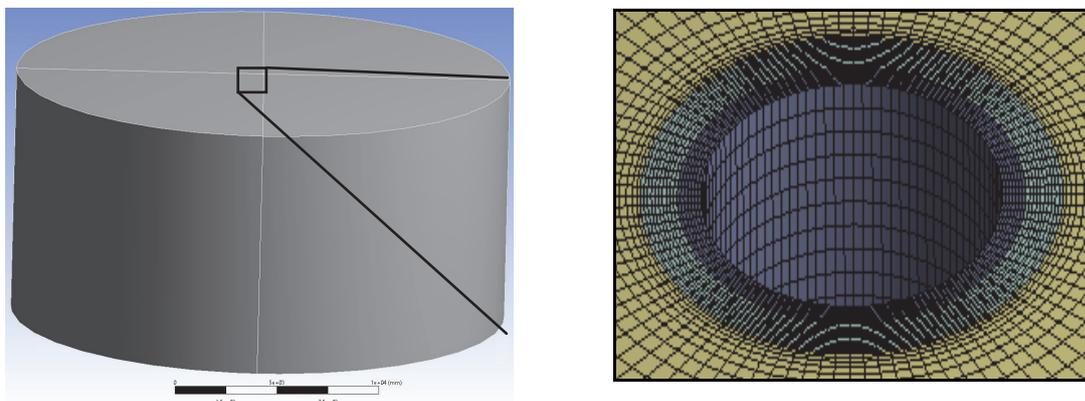


Рис. 2. Расчетная модель в ПО ANSYS

Fig. 2. Simulation model in ANSYS

Упругие характеристики тампонажного цемента принимали следующими: модуль Юнга – 4,4 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,226. Аналогичные характеристики для материала эксплуатационной колонны: модуль Юнга – 200 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Размеры колонны – внешний диаметр 140 мм, толщина стенки – 10,5 мм.

При задании граничного условия в виде вертикальных напряжений на верхнюю границу конечно-элементной схемы при выборе модели со сплошными контактами за счет различных значений упругих характеристик обсадной колонны, цементного камня и горных пород возникают концентраторы напряжений на контактах указанных материалов. Для исключения данного эффекта в большинстве случаев исследователи в своих моделях задают на верхней границе условие в виде перемещений, закрепленных по нормали к поверхности. Такой подход возможен, когда рассматривается скважина с крепью, но без перфорационных каналов [6]. В данной работе не учитывались перфорационные каналы, поэтому для горной породы прикладывалось перемещение, закрепленное по нормали к поверхности, равное величине уплотнения коллектора.

На границе «горная порода – цемент» выбрана модель со сплошным контактом, учитывая адгезию цементного камня и горной породы [7]. На границе «колонна – цемент» использовались контактные элементы и создан эффект проскальзывания материалов, при котором концентрации напряжений будут отсутствовать, а радиальные напряжения от породы к цементному камню и колонне, а также в обратном направлении будут передаваться естественным образом.

В связи с вышеизложенным в расчетной модели задавались следующие граничные условия:

- 1) на нижней границе закреплялись вертикальные перемещения;
- 2) на внешней боковой поверхности закреплялись перемещения по нормали к данным границам;
- 3) на верхней границе для колонны и цементного камня закреплялись перемещения по вертикали (имитация закрепленной скважины), для породы прикладывалось перемещение, закрепленное по нормали к поверхности, равное величине уплотнения коллектора.

Для описания свойств материала цементного камня была выбрана математическая модель, ориентированная на описание упругохрупкого поведения бетона, Вильяма и Варнке, используемая совместно с конечным элементом SOLID65 [8]. SOLID65 – восьмиузловой конечный элемент, специально предназначенный для моделирования бетона и железобетона, способного к растрескиванию при растяжении и дроблению при сжатии.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния с учетом описанных условий приведены на рис. 3. Расчет проведен на примере горной породы D3e1 горизонта скважины № 160q Мармовичского месторождения.

Как видно из рис. 3, использование упругой модели для описания поведения системы «горная порода – цементная крепь – эксплуатационная колонна» сопровождается перераспределением деформаций в теле горной породы. Основные изменения происходят в окрестности покрышки коллектора, к которой приложено перемещение, соответствующее изменению толщины коллектора на величину его уплотнения.

Для скважины 140n2 Ю-Сосновская рассмотрен случай, при котором происходит снижение пластового давления от начального до давления насыщения. В этом случае величина уплотнения коллектора составит 31,5 мм. Зенитный угол наклона скважины в рассматриваемом интервале составляет $51,2^\circ$, мощность коллектора – 15,6 м.

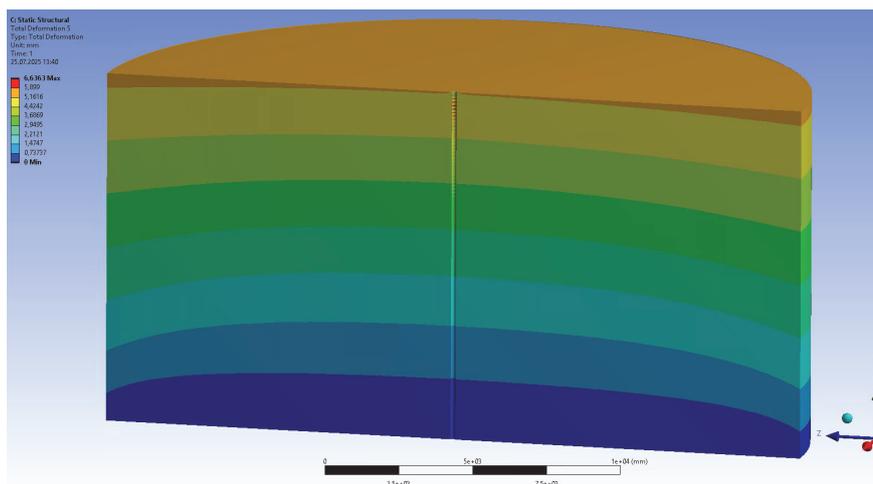


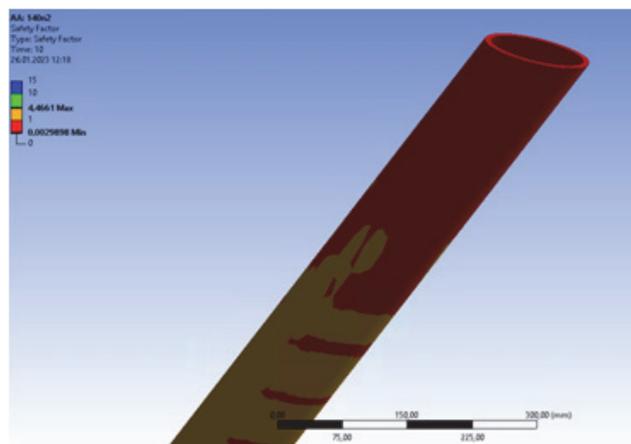
Рис. 3. Распределение суммарных деформаций в окрестности эксплуатационной колонны скважины № 160q Мармовичская

Fig. 3. Total Strain Distribution around the wellbore casing of Well N 160q Marmovychskaya

В качестве критерия разрушения цементной крепи принимался предел прочности тампонажного цемента на сжатие – 40 МПа, предел прочности на растяжение – 4,2 МПа. Выполнен анализ распределения напряжений в объеме цементной крепи. Области, в которых величина напряжений превышала предел прочности, окрашены в темно-красный цвет, спрогнозировано очаговое разрушение цементной крепи. Результаты анализа показали, что значительная часть объема цементной крепи подвергается воздействию нагрузок, превышающих прочностной критерий (рис. 4).



a)



b)

Рис. 4. Участок вероятного разрушения цементной крепи скважины № 140n2 Ю-Сосновская: а – вид в плане; б – вид сбоку

Fig. 4. Section of probable failure in the well cement of Well N 140n2 Yu-Sosnovskaya
a – plan view; b – side view

Результаты расчета уплотнения коллекторов показали, что изученные объекты не подвергаются критическим нагрузкам в области цементной крепи: запас прочности для цементного камня составил 1,5–2 ед. Для скважины 140n2 Ю-Сосновская при снижении пластового давления от начального до давления насыщения наблюдается очаговое разрушение цементной крепи. Таким образом, по скважине 140n2 Ю-Сосновская для сохранения целостности цементного камня и предотвращения заколонных перетоков рекомендуется не снижать давление до давления насыщения.

Заключение. В результате выполненной работы были получены величины уплотнения коллектора для рассмотренных объектов. С применением численной конечно-элементной модели с учетом полученных значений уплотнения коллектора проведен анализ напряженного-деформированного состояния обсадной колонны, цементного камня и участка горной породы вблизи скважины.

Результаты расчета уплотнения коллекторов изученных объектов показали, что изученные объекты не подвергаются критическим нагрузкам в области цементной крепи и обладают достаточным запасом прочности. Отмеченный результат объясняется малой мощностью коллекторов. На примере скважины 140n2 Ю-Сосновская показано, что в условиях значительной депрессии возможно превышение критических значений напряжений с нарушением целостности системы «пласт – цементная крепь – эксплуатационная колонна».

Данные результаты можно использовать для подбора оптимальной рецептуры цементного раствора, параметры которого должны соответствовать ожидаемым нагрузкам при уплотнении коллектора.

В дальнейшем планируется оценить влияние изменения упругих и прочностных параметров цементного камня на величину возникающих напряжений, учесть эксцентричное расположение обсадной колонны и геометрию перфорационных каналов.

Литература

1. Кузьмин, Ю. О. Парадоксы аномальных оседаний на длительно разрабатываемых месторождениях нефти и газа / Ю. С. Кузьмин // Геофизические процессы и биосфера. – 2025. – Т. 24, № 2. – С. 30–41. – DOI/10.21455/GPB2025.2-3
2. Анализ устойчивости крепи нефтедобывающих скважин при проведении кумулятивной перфорации на основе результатов геомеханического моделирования / С. Е. Чернышов, С. Н. Попов, А. Д. Савич, В. В. Дерендяев // Георесурсы. – 2023. – № 25 (2). – С. 245–253. – DOI 10.18599/grs.2023.2.18
3. Оценка сохранности крепи скважин после проведения кумулятивной перфорации с учетом критерия разрушения цементного камня / С. Е. Чернышов, С. Г. Ашихмин, Ю. А. Кашников [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2021. – С. 50–53. – DOI 10.24887/0028-2448-2021-6-50-53
4. МакФи, К. Лабораторные исследования керн: гид по лучшим практикам / К. МакФи, Дж. Рид, И. Зубизаррета. – М. ; Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2018. – 924 с.
5. Жуковский, А. М. Определение сжимаемости горных пород по результатам испытаний на предел прочности при трехосном сжатии / А. М. Жуковский, П. П. Повжик // Инженер-нефтяник. – 2025. – № 2. – С. 53–58.
6. Анализ изменения напряженно-деформированного состояния и проницаемости терригенного коллектора на основе численной модели околоскважинной зоны с элементами крепи и перфорационными каналами / С. Е. Чернышов, С. Н. Попов, К. Ван [и др.]. – Георесурсы. – 2024. – № 26 (4). – С. 209–217. – DOI 10.18599/grs.2024.4.6
7. Effect of Rock Physical and Mechanical Properties on Adhesion Strength at the Rock-Cement Paste Interface / B. Pires, V. N. Lima, R. Q. Velloso [et al.] // Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, Oct. 2025. – DOI 10.2118/228104-MS

8. Willam, K. J. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete / K. J. Willam, E. D. Warnke // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. – Bergamo : ISMES, 1975. – Vol. 19. – P. 174.

References

1. Kuz'min Ju. O. Paradoksy anomal'nyh osedaniy na dlitel'no razrabatyvaemyh mestorozhdenijah nefti i gaza. Geofizicheskie processy i biosfera = *Geophysical Processes and Biosphere*, 2025, vol. 24, no. 2, pp. 30–41 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/GPB2025.2-3>
2. Chernyshov S. E., Popov S. N., Savich A. D., Derendyaev B. B. Analiz ustojchivosti krepki neftedobyvajushhih skvazhin pri provedenii kumuljativnoj perforacii na osnove rezul'tatov geomechanicheskogo modelirovaniya. *Georesursy = Georesources*, 2023, no. 25 (2), pp. 245–253 (in Russian). <https://doi.org/10.18599/grs.2023.2.18>
3. Chernyshov S. E., Ashihmin S. G., Kashnikov Ju. A., Savich A. D., Mosin A. V., Chuhlov A. S. Evaluation of the well lining integrity after cumulative perforation taking into account the cement stone destruction criterion. *Neftjanoe hozjajstvo*, 2021, no. 6, pp. 50–53 (in Russian). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-6-50-53>
4. MakFi K., Rid Dzh., Zubizarreta I. *Laboratory core analysis: a guide to best practices*. Moscow, Izhevsk, Inctitut komp'yuternykh issledovaniy, 2018. 924 p. (in Russian).
5. Zhukovskii A. M., Povzhik P. P. Determination of the compressibility of rocks based on the results of tests for ultimate strength under triaxial compression. *Inzhener-neftyanik*, 2025, no. 2, pp. 53–58 (in Russian).
6. Chernyshov S. E., Popov S. N., Van K., Derendjaev V. V., Jan Ja., Huacze L. Analysis of changes in the stress-strain state and permeability of a terrigenous reservoir based on a numerical model of the borehole zone with support elements and perforation channels, *Georesursy = Georesources*, 2024, no. 26 (4), pp. 209–217 (in Russian). <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.6>
7. Pires B., Lima V. N., Velloso R. Q., Silva F. A. Effect of Rock Physical and Mechanical Properties on Adhesion Strength at the Rock-Cement Paste Interface. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, october 2025. <https://doi.org/10.2118/228104-MS>
8. Willam K. J., Warnke E. D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 19. Bergamo, ISMES Publ., 1975. P. 174.

Информация об авторах

Жуковский Андрей Михайлович – ведущий инженер службы геомеханического моделирования. Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (ул. Книжная, 15Б, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: a.zhukovskij@beloil.by

Повжик Петр Петрович – доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора. РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (ул. Рогачевская, 9, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: povzhik@beloil.by

Information about the authors

Zhukouski Andrey Mikhailovich – lead engineer of the geomechanical modeling department. Belarusian Scientific Research and Design Institute of Oil RUE “Production Association “Belorusneft” (15B, Knizhnaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: A.Zhukovskij@beloil.by

Povzhik Petr Petrovich – doctor of technical sciences, associate professor, deputy general director. RUE “Production Association “Belorusneft” (9, Rogachevskaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: povzhik@beloil.by

Поступила в редакцию 30.10.2025