

УДК 622.245.01

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

Шифр специальности ВАК: 1.6.21, 1.6.6, 2.8.6

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вблизи нагнетательной скважины на пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов

С.Н. Попов¹, О.Н. Кокорев^{2✉}, Т.Ю. Заведий³, А.И. Маневич⁴

¹ Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, г. Москва

² Филиал «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, г. Северск

³ АО «Сибирский химический комбинат», Россия, г. Северск

⁴ Геофизический Центр РАН, Россия, г. Москва

✉ Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью прогноза деформаций земной поверхности вблизи нагнетательных скважин, закачивающих жидкие радиоактивные отходы, а также их устойчивости при изменении давления в скважине в процессе закачки. *Цель:* с помощью метода конечных элементов произвести численный анализ напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов нагнетательной скважины, а также окружающего массива горных пород, определить величины деформаций земной поверхности и оценить устойчивости скважины и прочности цементного камня при максимальном давлении нагнетания жидких радиоактивных отходов. *Объекты:* околоскважинная зона одной из нагнетательных скважин, расположенных на пунктах или полигонах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. *Методы:* численный конечно-элементный метод расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом распределения упругих свойств пород по моделируемому разрезу и основных конструктивных элементов скважины. *Результаты.* Разработана численная конечно-элементная схема одной из нагнетательных скважин с учетом ее основных конструктивных элементов, позволяющая задавать распределение давления внутри эксплуатационного горизонта в процессе закачки отходов. В модели задавалось распределение упругих свойств пород по разрезу с учетом их литологических особенностей. Проведен анализ гидродинамических показателей работы скважины и определено максимальное давление на устье скважины при закачке жидких радиоактивных отходов, равное 1,71 МПа. Выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны в два этапа: для условий неработающей скважины и с учетом распределения давления при максимальном давлении нагнетания отходов. Получено распределение вертикальных перемещений на уровне земной поверхности, а также на кровле эксплуатационного горизонта при максимальном давлении закачки жидких радиоактивных отходов. Показано, что при таком давлении наибольшие поднятия составят: на земной поверхности – 4,5 см, на кровле эксплуатационного горизонта – 11 см. Оценка устойчивости конструктивных элементов скважины на максимальной глубине нагнетания отходов 280 м, соответствующей максимальному давлению, показала, что напряжения в скважине и цементном камне гораздо ниже значений, которые могут привести к их нарушению. Для цементного камня коэффициент запаса прочности при максимальном давлении 1,71 МПа составил 7,8.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, нагнетательная скважина, жидкие радиоактивные отходы, околоскважинная зона, вертикальные перемещения, коэффициент запаса прочности

Благодарности: Авторы благодарят главного геолога Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» Андрея Александровича Зубкова, сотрудников лаборатории геоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук Сергея Юрьевича Малышкова, Виталия Игоревича Поливач и Андрея Викторовича Зуева, специалистов службы по ремонту и обслуживанию контрольно-измерительных приборов и автоматики цеха эксплуатации филиала «Северский» Федерального государственного унитарного предприятия «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» Дмитрия Николаевича Кузнецова и Павла Александровича Каткова за помощь, консультацию и предоставление материалов и методических рекомендаций при написании статьи.

Для цитирования: Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вблизи нагнетательной скважины на пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / С.Н. Попов, О.Н. Кокорев, Т.Ю. Заведий, А.И. Маневич // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 101–110. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

UDC 622.245.01

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

Numerical simulation of the stress-strain state near the injection well at deep disposal facilities for liquid radioactive waste

S.N. Popov¹, O.N. Kokorev²✉, T.Y. Zavedy³, A.I. Manevich⁴

¹ Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

² "Seversky" branch, National operator for radioactive waste management, Seversk, Russian Federation
Siberian chemical plant, Seversk, Russian Federation

⁴ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Abstract. Relevance. The need to predict deformations of the earth's surface near injection wells pumping liquid radioactive waste, as well as their stability when pressure changes in the well during injection. **Aim.** To perform a numerical analysis of the stress-strain state of the structural elements of the injection well and the surrounding rock mass using the finite element method, to determine the magnitude of the deformations of the earth's surface and define the stability of the well and the strength of the cement stone at the maximum injection pressure of liquid radioactive waste. **Objects.** Near-wellbore zone of one of the injection wells located at the liquid radioactive waste injection site. **Methods.** Numerical finite element method for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone, taking into account the distribution of the elastic properties of rocks along the simulated section and the main structural elements of the well. **Results.** The authors have developed the numerical finite element scheme of one of the injection wells, taking into account its main structural elements, as well as allowing you to set the pressure distribution within the exploited horizon during the injection of waste. In the model, the distribution of the elastic properties of rocks along the section was set, taking into account their lithological features. The authors carried out the analysis of the hydrodynamic parameters of the well operation and determined the maximum pressure at the wellhead during the injection of liquid radioactive waste, equal to 1.71 MPa. Numerical modeling of the stress-strain state of the near-wellbore zone was performed in two stages: for the conditions of an idle well and taking into account the pressure distribution at the maximum waste injection pressure. The distribution of vertical displacements at the level of the earth's surface, as well as at the top of the operational horizon at the maximum pressure of liquid radioactive waste injection, is obtained. It is shown that at such a pressure, the largest uplifts will be: on the earth's surface – 4.5 cm, on the top of the production horizon – 11 cm. An assessment of the stability of the well structural elements at a maximum waste injection depth of 280 m, corresponding to the maximum pressure, showed that the stresses in the well and cement stone are much lower than the values that can lead to their violation. For cement stone, the safety factor at a maximum pressure of 1.71 MPa was equal to 7.8.

Keywords: stress-strain state, finite element method, injection well, liquid radioactive waste, near-wellbore zone, vertical displacements, safety factor

Acknowledgements: The authors thank Andrey A. Zubkov, the chief geologist of the Joint-Stock Company «Siberian Chemical Plant», Sergey Yu. Malyshkov, Vitaly I. Polivach and Andrey V. Zuev, employees of the laboratory of geoinformation technologies of the Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Dmitry N. Kuznetsov and Pavel A. Katkov, specialists of the service for repair and maintenance of control and measuring instruments and automation of the operation shop of the «Seversky» branch of the National Operator for Radioactive Waste Management for assistance, consultation and provision of materials and methodological recommendations when writing the article.

For citation: Popov S.N., Kokorev O.N., Zavedy T.Yu., Manevich A.I. Numerical simulation of the stress-strain state near the injection well at deep disposal facilities for liquid radioactive waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 101–110. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

Введение

Одним из наиболее безопасных и распространенных способов изоляции жидких радиоактивных отходов (ЖРО) является их глубинное захоронение в геологические формации [1–3]. Для таких целей используются нагнетательные скважины, вскрывающие фильтром эксплуатационные горизонты. Для

контроля за закачкой ЖРО и физико-химическими процессами, происходящими в пласте, выполняется геотехнологический мониторинг [3–7]. При захоронении жидкие отходы закачиваются в целевые пласты, при этом на устье скважины может создаваться давление до нескольких МПа. В таком случае аналогичный перепад давления будет иметь

место и в околоскважинной зоне в эксплуатационном горизонте, что приведет к трансформации напряженно-деформированного состояния (НДС) самого пласта, окружающего массива пород и земной поверхности. Для прогноза возможных деформаций земной поверхности на территории эксплуатационных объектов, на которых происходит изменение давления в пласте, обычно прибегают к методам аналитического или численного моделирования. Одним из таких методов является метод конечных элементов, позволяющий учесть неоднородность физико-механических свойств пород, связанных с геологическим строением разреза вблизи скважин, а также распределение давления в исследуемом пласте [8–10]. На основе полученных результатов численных расчетов делается вывод о целесообразности применения различных методов мониторинга деформаций земной поверхности на территории пункта глубинного захоронения.

Изменение давления в скважине может также привести к существенному увеличению напряжений в ее конструктивных элементах – колонне и цементном камне [11–15]. Для анализа НДС в околоскважинной зоне в последнее время применяют 1D геомеханическое моделирование скважин [16–18], однако данные модели предназначены для определения напряжений только в открытом стволе скважины и не учитывают напряженное состояние колонны и цементного камня. В таком случае требуется анализ поля распределения напряжений в элементах конструкции скважины для предотвращения аварийных ситуаций, способных привести к деформации скважины, заколонным перетокам и проникновению ЖРО на земную поверхность. В рамках данной работы была проведена оценка поля напряжений и деформаций на примере одной из скважин пункта глубинного захоронения (ПГЗ) ЖРО.

Численная модель для расчета напряжений в околоскважинной зоне

Моделирование НДС околоскважинной зоны осуществлялось в программном комплексе ANSYS, в котором реализовано численное решение дифференциальных уравнений, описывающих линейно-упругое поведение твердого тела, подробно рассмотренных в работах [19–21]:

- уравнения движения (моментов):

$$\sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = 0; i, j = 1, 2, 3,$$

где σ_{ji} – компоненты тензора напряжений; ∂x_j – производная по j -й координате; ρf_i – массовые силы;

- геометрические соотношения:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2, 3,$$

где ε_{ji} – компоненты тензора деформаций; u – компоненты вектора перемещений;

- физические соотношения (в данном случае закон линейной упругости Гука):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\},$$

где $\{\sigma\}$ – тензор напряжений; $[D]$ – матрица упругих констант; $\{\varepsilon\}$ – тензор деформаций.

Для расчета НДС в околоскважинной зоне была разработана осесимметричная конечно-элементная модель разреза вблизи нагнетательной скважины Н-33 радиусом 500 м. Для рассматриваемой скважины фиксировалась наибольшая величина давления при нагнетании жидких радиоактивных отходов, равная 1,71 МПа. Разрез модели включал основные геологические пласты, разделенные на основе литологической характеристики пород, а также основные конструктивные элементы скважины (рис. 1, 2, табл. 1).

Конструкция скважины задавалась согласно данным, приведенным в деле и в паспорте скважины, которая состояла из следующих элементов: направление, спущенное до глубины 1,9 м; кондуктор, спущенный до глубины 160 м; колонна, спущенная до глубины 280 м; фильтр, находящийся в интервале глубин 272,8–357,8 м (рис. 1).

На рис. 2 представлена осесимметричная конечно-элементная схема, использованная для численного анализа поля распределения напряжений в околоскважинной зоне в процессе закачки ЖРО. Как видно из рисунка, в разрезе были учтены пласты, имеющие различные литологические свойства. Для каждого из выделенных интервалов задавались упругие свойства, приведенные в табл. 2, в которой также указаны интервалы разбиения модели по разрезу. В связи с тем, что отсутствовали данные об экспериментальных исследованиях упругих свойств пород в разрезе скважины, такие данные определялись на основе справочных данных [22–24] и на основе опыта моделирования подобных задач геомеханики авторов данной публикации. Так как деформации земной поверхности в наибольшей степени зависят от упругих свойств эксплуатационного горизонта, по данному пласту такие свойства адаптировались на основе результатов измерений деформаций геофизическим методом [2].

В расчетах использовались четырехугольные конечные элементы plane183, имеющие восемь узлов для большей точности интерполяции определяемых характеристик. Для данных элементов включалась опция осесимметричного моделирования.

При численных расчетах использовались следующие граничные условия:

- на правой (внешней) границе модели закреплялись перемещения вдоль горизонтальной оси;
- на нижней границе модели закреплялись перемещения вдоль вертикальной оси;

- в скважине задавалось давление, увеличивающееся по линейной зависимости с глубиной начиная с давления на ее устье.

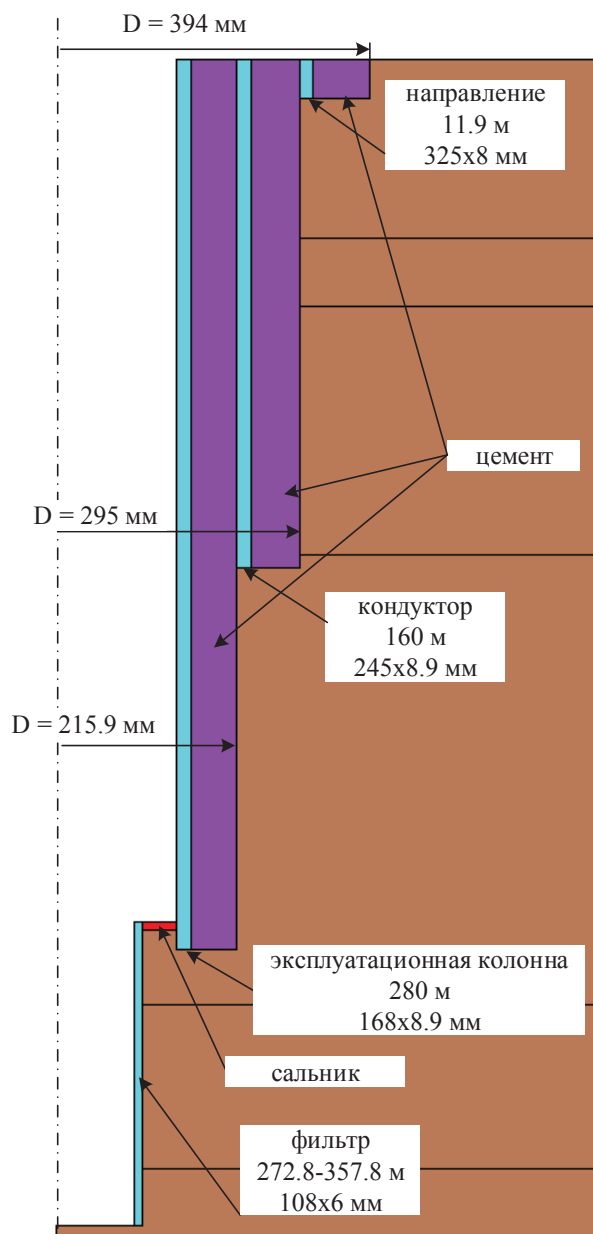


Рис. 1. Схема конструкции нагнетательной скважины, использованная в расчетах

Fig. 1. Scheme of the design of the injection well used in the calculations

Для всех элементов модели задавалось влияние объемных сил в виде силы тяжести. Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе расчет проводился при исходном состоянии пласта без учета нагнетания. В скважине задавалось линейное распределение давления по глубине с учетом того, что давление на устье равно атмосферному.

Таблица 1. Упруго-прочностные и геометрические характеристики конструктивных элементов скважины, использованные в расчетах

Table 1. Elastic-strength and geometric characteristics of the structural elements of the well, used in the calculations

Характеристика Characteristic	Единицы измерения Units	Элемент конструкции Structural element				
		направление direction	кондуктор conductor	экспл. колонна casing	фильтр filter	сальник wall packer
глубина спуска descent depth	м m	11,9	160	280	272,8–357,8	272,8–274
внешний диаметр outer diameter	мм mm	325	245	168	108	150,2
толщина стенки wall thickness	мм mm	8	8,9	8,9	6	21,1
модуль Юнга стали Young modulus of steel	ГПа GPa	200				100
коэффициент Пуассона стали Poisson's ratio of steel	д.е. u.f.	0,2				0,3
предел текучести стали yield strength of steel	МПа MPa	352				–
модуль Юнга цемента Young modulus of cement	ГПа GPa	12,2				–
коэффициент Пуассона цемента Poisson's ratio of steel	д.е. u.f.	0,104				–
предел прочно- сти цемента при сжатии compressive strength of cement	МПа MPa	42				–
угол внутреннего трения цемента angle of internal friction of cement	градусы degrees	28				–

На втором этапе на верхней и нижней границе эксплуатационного горизонта задавался прирост давления в виде нижеприведенной логарифмической зависимости с максимальным значением 1,71 МПа, при этом радиус зоны изменения давления был равен 250 м:

$$p = p_b - \Delta p \frac{\ln\left(\frac{r}{r_b}\right)}{\ln\left(\frac{r_w}{r_b}\right)},$$

где p – определяемая величина давления; p_b – давление на удалении от скважины; Δp – величина перепада давления; r_b – радиус, на котором определялось давление на удалении от скважины; r_w – радиус скважины; r – радиус от оси скважины, для которого определяется величина давления.

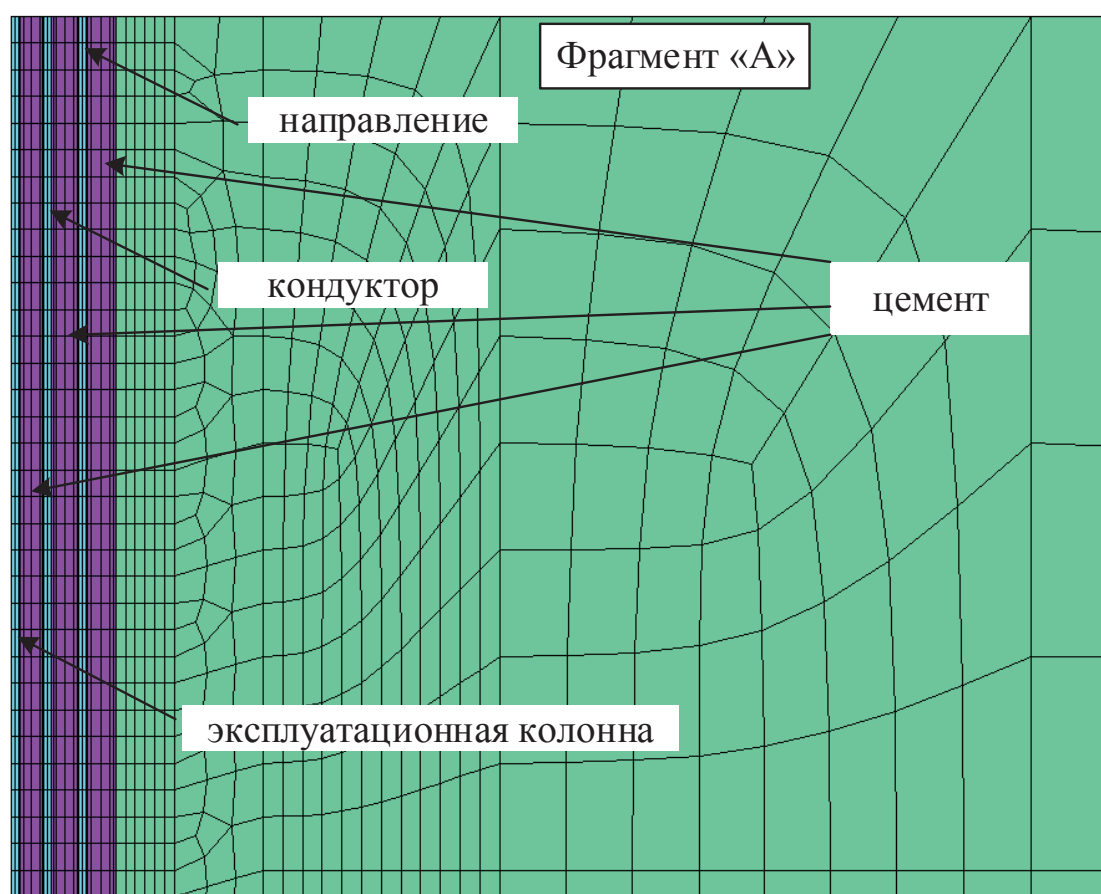
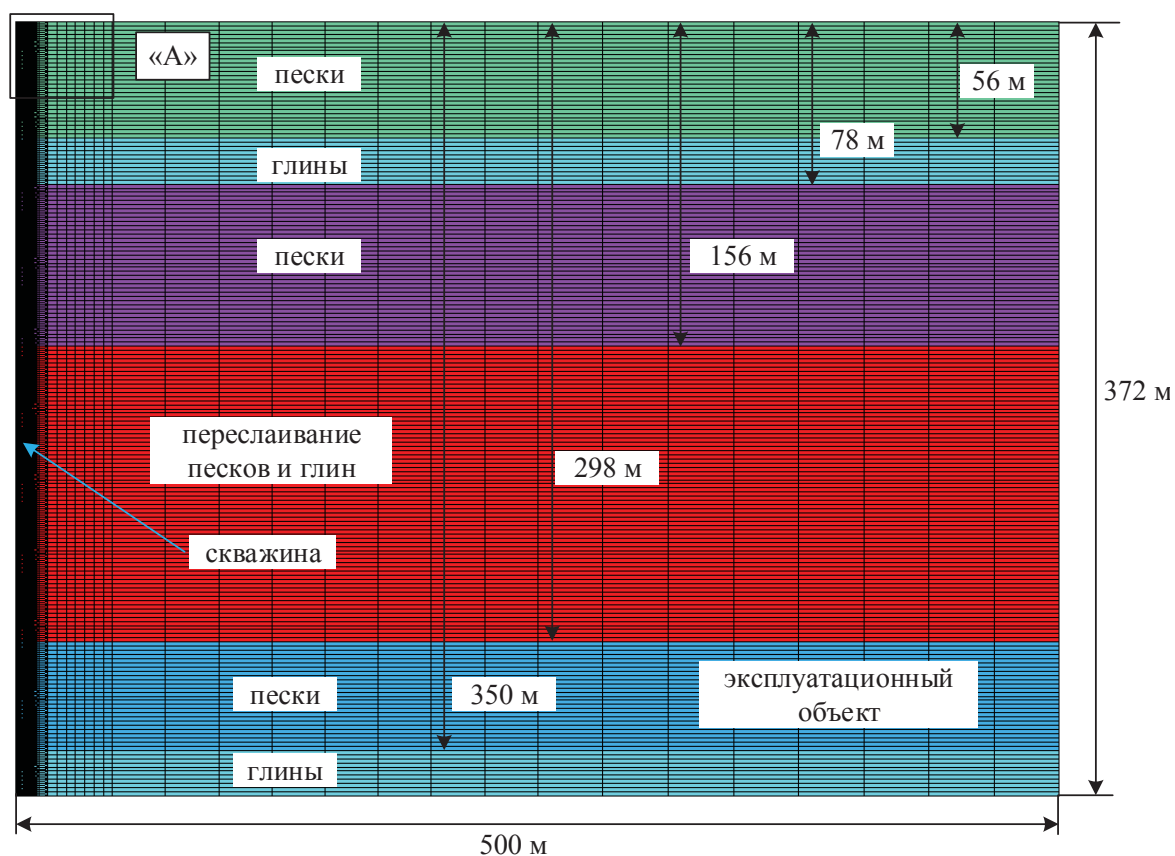


Рис. 2. Осесимметричная конечно-элементная схема для расчета НДС околоскважинной зоны
Fig. 2. Axisymmetric finite element scheme for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone

Таблица 2. Геомеханические свойства окружающего массива пород, использованные в расчетной модели

Table 2. Geomechanical properties of the surrounding rock mass used in the calculation model

Интервал залегания Occurrence interval, м/м	Литология Lithology	Модуль Юнга Young modulus, МПа/МПа	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio, д.е./u.f.
0–56	преимущественно пески predominantly sands	100	0,3
56–78	преимущественно глины predominantly sands	300	0,4
78–156	преимущественно пески predominantly sands	200	0,3
156–298	переслаивание песков и глин interbedding of sands and clays	500	0,4
298–350 (экспл. объект operational deposit)	преимущественно пески predominantly sands	100	0,3
350–372	глины/clay	600	0,4

Давление в скважине прикладывалось по линейной зависимости от глубины залегания пород с учетом того, что давление на устье стало равно давлению 1,71 МПа.

Результаты численного моделирования НДС скважины и околоскважинной зоны

На рис. 3 приведено распределение изменения вертикальных напряжений, полученное при увеличении давления на устье скважины на 1,71 МПа.

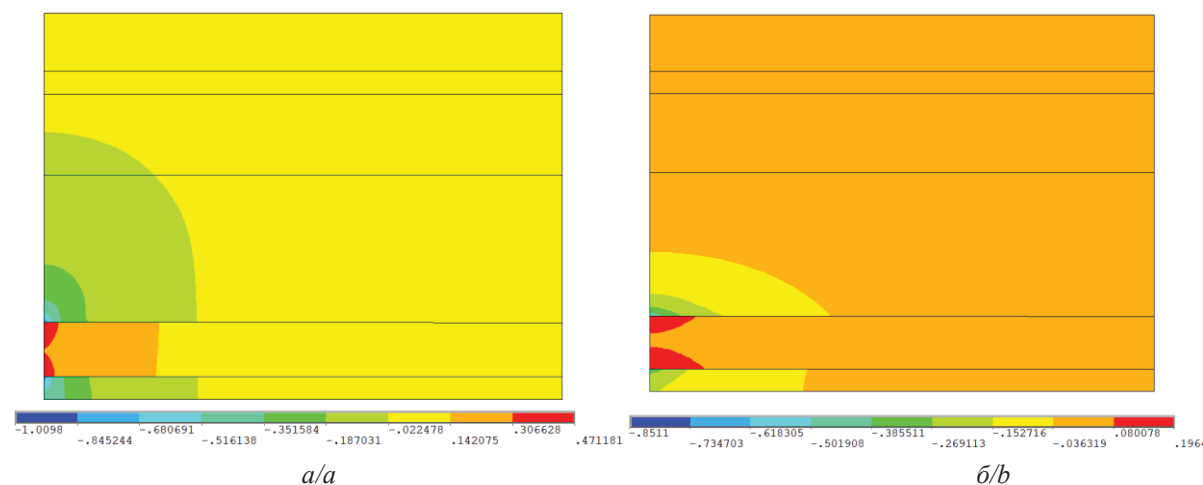


Рис. 3. Изменение величины вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений (МПа) при увеличении давления на устье скважины от 0 до 1,71 МПа

Fig. 3. Change in the value of vertical (a) and horizontal (b) stresses (MPa) with increasing pressure at the wellhead from 0 to 1,71 MPa

Как видно из рисунка, в эксплуатационном горизонте происходит увеличение вертикальных напряжений на 0,47 МПа, горизонтальные напряжения увеличиваются на гораздо меньшее значение, равное 0,2 МПа. Следствием роста напряжений в рассматриваемом пласте должно быть его расширение и поднятие земной поверхности.

В выше- и нижележащих пластах происходит уменьшение напряжений: вертикальных – на 1 МПа, горизонтальных – на 0,85 МПа. Вышеприведенные значения трансформации напряжений говорят о том, что конструктивные элементы скважины, находящиеся в данном интервале, не подвергаются существенному увеличению нагрузок и должны сохранить свою устойчивость.

Для того чтобы определить перемещения пласта и земной поверхности, производилось вычитание результатов расчета первого расчетного шага (без учета давления нагнетания) из второго расчета (при давлении на устье скважины 1,71 МПа). В итоге было получено распределение вертикальных перемещений вблизи нагнетательной скважины на уровне кровли эксплуатационного горизонта, а также поднятия земной поверхности (рис. 4). Как показали расчеты, величина максимального значения деформаций земной поверхности (вблизи устья скважины) составляет примерно 2,5 см/МПа и при давлении 1,71 МПа равно 4,5 см. В целом полученные результаты численного моделирования совпадают с результатами дополнительных геофизических исследований, проведенных на исследуемом полигоне ЖРО [4].

Как видно из рис. 4, величина максимальных вертикальных перемещений на кровле эксплуатационного горизонта почти в 2 раза больше, чем на земной поверхности, и составила около 11 см.

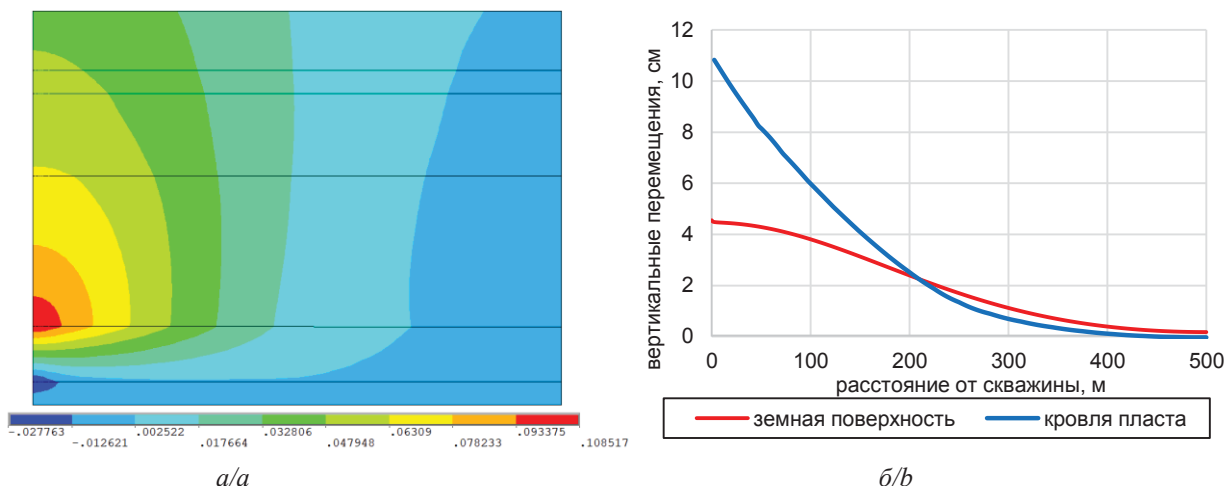


Рис. 4. Распределение вертикальных перемещений вблизи скважины по всему разрезу в метрах (а) (положительное направление вертикальной оси соответствует положительным вертикальным перемещениям), а также на уровне кровли эксплуатационного объекта и земной поверхности (б) при давлении на устье скважины 1,71 МПа

Fig. 4. Distribution of vertical displacements near the well over the entire section (a) and at the top surface of the operation deposit and the earth's surface (b) at a pressure at the wellhead of 1,71 MPa

На следующем этапе была произведена оценка сохранности эксплуатационной колонны и цементного камня нагнетательной скважины. В связи с тем, что наибольшее давление в скважине и напряжения в околоскважинной зоне действуют на максимальной глубине, оценка проводилась для цементного камня эксплуатационной колонны и ее максимальной глубины 280 м. Предварительный анализ напряжений в эксплуатационной колонне показал очень высокий коэффициент ее запаса прочности, поэтому ниже приведены результаты определения запаса прочности только для цементного камня.

Возможность разрушения цементного камня оценивалась на основе критерия Кулона–Мора в следующем виде:

$$k_{zap} = \frac{\sigma_3 \frac{(1+\sin\varphi)}{(1-\sin\varphi)} + \sigma_{USC}}{\sigma_1}, \quad (1)$$

где k_{zap} – коэффициент запаса прочности цемента; σ_1 , σ_3 – максимальное и минимальное главное напряжение в цементе; σ_{USC} – предел прочности цемента при одноосном сжатии; φ – угол внутреннего трения цемента.

Согласно формуле (1), если коэффициент запаса прочности больше 1, цемент находится в сохранности, если данный параметр меньше 1, происходит его разрушение. На рис. 5 показано распределение коэффициента запаса прочности цементной крепи эксплуатационной колонны на глубине 280 м. Как видно из рисунка, цементное кольцо на данной глубине обладает достаточно хорошей устойчивостью. Так, если закачка жидких радиоактивных отходов не осуществляется, коэффициент запаса

прочности изменяется от 9,2 до 11, при этом максимальное его значение наблюдается на контакте цемента с породой, наименьшее – на контакте колонны и цемента.

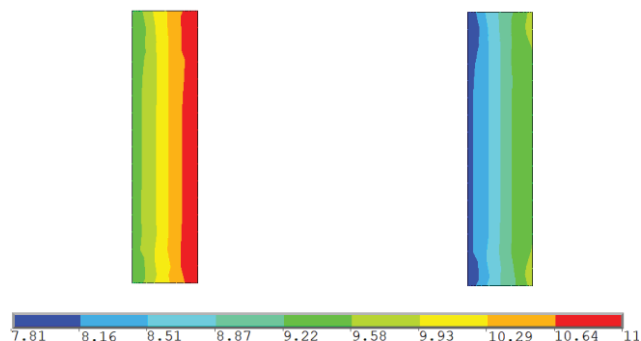


Рис. 5. Распределение коэффициента запаса прочности цементной крепи эксплуатационной колонны на глубине 280 м до начала закачки (а) и при закачке жидких радиоактивных отходов с давлением на устье скважины 1,71 МПа (б)

Fig. 5. Distribution of the safety factor of the cement stone of the casing at a depth of 280 m before the start of injection (a), and during injection of liquid radioactive waste with a pressure at the wellhead of 1,71 MPa (b)

При нагнетании ЖРО при максимальном давлении на устье 1,71 МПа коэффициент запаса прочности несколько уменьшается и находится в интервале 7,8–9,7. Высокий коэффициент запаса прочности цемента связан с небольшой максимальной глубиной спуска колонны, а также с небольшими величинами давления скважины.

В заключение следует отметить, что для более достоверного моделирования НДС на полигонах и пунктах глубинного захоронения ЖРО требуется проведение экспериментальных исследований по изучению механических свойств массива пород и, в особенности, эксплуатационного горизонта, а также образцов тампонажных материалов, применяемых при цементировании скважины.

Выводы

В рамках работы рассмотрены результаты численного моделирования НДС одной из нагнетательных скважин и окружающего массива горных пород на полигоне захоронения ЖРО. На основе анализа результатов моделирования можно сделать следующие основные выводы:

1. На примере нагнетательной скважины для закачки низкоактивных отходов, расположенной на площадке 18 ПГЗ ЖРО филиала «Северский» ФГУП «НО РАО», разработана численная конечно-элементная модель, включающая основные конструктивные элементы скважины и окружающего массива пород с учетом его литологических неоднородностей.
2. Проведен численный анализ распределения напряжений вблизи скважины, который показал, что при нагнетании ЖРО в скважину в интервале эксплу-

тационного объекта возникают растягивающие напряжения, которые приводят к его расширению и возникновению поднятий на земной поверхности. Так, при максимальном давлении нагнетания на устье скважины 1,71 МПа, наибольшие вертикальные перемещения кровли пласта составят 11 см, земной поверхности – 4,5 см.

3. Анализ напряжений в цементном камне эксплуатационной колонны на уровне эксплуатационного объекта с помощью критерия разрушения Кулона–Мора показал, что крепь скважины в данном интервале обладает очень высоким коэффициентом запаса прочности. Так, при отсутствии нагнетания данная величина находится в интервале 9,2–11. При максимальном зафиксированном давлении нагнетания на устье скважины в 1,71 МПа коэффициент запаса прочности цемента снизится незначительно – до интервала его изменения 7,8–9,7.
4. Разработанная численная конечно-элементная модель и научно-методические подходы могут быть использованы в дальнейшем для расчета НДС в других скважинах пунктов и ПГЗ ЖРО и при учете различных значений давления закачки и литологических особенностей геологического разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко А.И., Курочкин В.М. Опыт исследований и практических работ в области захоронения жидких радиоактивных отходов и промышленных сточных вод предприятий атомной промышленности // Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 99–103.
2. Оценка влияния нагнетания жидких радиоактивных отходов на изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород / С.Ю. Малышков, О.Н. Кокорев, В.Ф. Гордеев, Т.Ю. Заведий, В.И. Поливач, А.И. Маневич // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 4. – С. 43–47.
3. Анализ системы геотехнологического мониторинга полигона подземного захоронения жидких радиоактивных отходов СХК / А.А. Зубков, А.И. Рыбальченко, И.В. Токарев, В.В. Данилов // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 11. – С. 56–61.
4. Автоматизированная система гидродинамического мониторинга для обеспечения экологической безопасности пункта глубинного захоронения ЖРО / О.Н. Кокорев, Н.Р. Адонин, М.Д. Носков, Т.Ю. Заведий, А.А. Щипков // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 2-2. – С. 46–51.
5. Подход к мониторингу состояния недр и подземных сооружений и результаты мониторинга пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / И.А. Пронь, А.В. Ткаченко, В.В. Мартыанов, Ю.В. Трофимова, И.В. Яковлева // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – С. 42–48.
6. Создание автоматизированных систем радиационного мониторинга на объектах, связанных с утилизацией А\ПЛ, обращением с ОЯТ и РАО / Р.В. Арутюнян, С.А. Богатов, С.Л. Гаврилов, М.Е. Егорова, В.П. Киселев, А.В. Коноплев, В.Н. Кузьмин, Б.В. Одинок, С.А. Шикин // Изв. РАН. Энергетика. – 2009. – № 6. – С. 78–86.
7. Ranjbar A., Hassani H., Kourosh S. 3D geomechanical modelling and estimating the compaction and subsidence of Fahlian reservoir formation // Arabian journal of geoscience. – 2017. – Vol. 10:116. – P. 1–12.
8. Implementation of an elasto-viscoplastic constitutive law in Abaqus/Standard for an improved characterization of rock materials / S.K. Nguyen, G. Volonte, G. Musso, M. Brignoli, F. Gemelli, S. Mantica // Science in the age of experience. – 2016. – P. 1–15.
9. Modeling of waste injection in heterogeneous sand clay formations / S.P. Pozdnyakov, V.A. Bakshevskaia, A.A. Zubkov, V.V. Danilov, A.I. Rybalchenko, C.-F. Tsang // Underground Injection science and technology. – Berkeley, California, 2005. – P. 203–209.
10. Попов С.Н., Чернышов С.Е., Кривошеков С.Н. Сопоставительный анализ аналитического и численного методов расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны на основе упругой модели с учетом основных конструктивных элементов скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 94–102.
11. Попов С.Н. Определение коэффициента запаса прочности цементного камня на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом изменения упруго-прочностных свойств цемента в процессе его твердения и под воздействием кислотного реагента // SOCAR Proceeding. – 2021. – SI № 2. – С. 8–16.

12. Попова М.С., Харитонов А.Ю. Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 18–27.
13. Хабибуллин М.А. Исследование механизма разрушения призабойной зоны фильтрационным потоком пластовой жидкости и предотвращение пробкообразования в скважине // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 86–94.
14. Zoback M. D. Reservoir geomechanics. – Cambridge, U.K.: Cambridge University press, 2007. – 505 p.
15. Petroleum related rock mechanics / E. Fjear, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 492 p.
16. Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений при бурении / С.В. Лукин, С.В. Есипов, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.Ю. Хомутов, Т.Н. Шевчук, И.В. Сусляков // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 70–73.
17. Развитие комплексного геомеханического моделирования в ПАО «Газпром нефть» / А.А. Вашкевич, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.С. Бочков, С.В. Лукин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 12. – С. 16–19.
18. Talreja R., Bahuguna S., Havelia K. Merits of 3D numerical over 1D analytical geomechanics solution for a complex subsurface // SPE oil and gas conference and Exhibition. – Mumbai, 2019. – P. 1–16. SPE 194693.
19. Zienkiewicz O.C. The finite element method. – London: McGraw-Hill, 1977. – 787 p.
20. Settari A., Walters D. A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction // SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings. – Houston, 1999. – P. 1–13. SPE-51927-MS.
21. Charlez Ph. Rock mechanics: petroleum applications. – Paris: Editions Technip, 1997. – Vol. 2. – 661 p.
22. Справочник по механике и динамике грунтов / В.Б. Шве́ц, Л.К. Гинзбург, В.М. Гольдштейн, В.К. Капустин, В.И. Фелкин, Н.С. Шве́ц. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.
23. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / Н.В. Мельников, В.В. Ржевская, М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
24. Budhu M. Soil mechanics fundamental. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 342 p.

Информация об авторах

Сергей Николаевич Попов, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией нефтегазовой механики и физико-химии пласта Института проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. rorov@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802>

Олег Николаевич Кокорев, главный специалист-гидрогеолог филиала «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, 636035, г. Северск, пр. Коммунистический, 8. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Тарас Юрьевич Заведий, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-технолог отдела экологического контроля АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1. TYZavedy@rosatom.ru

Александр Ильич Маневич, научный сотрудник лаборатории геодинамики Геофизического Центра РАН, Россия, 119296, г. Москва, ул. Молодежная, 3. ai.manevich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7486-6104>

Поступила в редакцию: 13.12.2023

Поступила после рецензирования: 09.01.2024

Принята к публикации: 19.09.2024

REFERENCES

1. Rybalchenko A.I., Kurochkin V.M. Experience of research and practical work in the field of disposal of liquid radioactive waste and industrial wastewater from nuclear industry enterprises. *Gornyi Zhurnal*, 2021, no. 3, pp. 99–103.
2. Malyshkov S.Yu., Kokorev O.N., Gordeev V.F., Zavediy T.Yu., Polivach V.I., Manevich A.I. Evaluation of the impact of injection of liquid radioactive waste on the change in the stress-strain state of a rock mass. *Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2023, no. 4, pp. 43–48. (In Russ.)
3. Zubkov A.A., Rybalchenko A.I., Rumynin V.G., Tokarev I.V., Danilov V.V., Sukhorukov V.A., Zakharova E.V., Aleksandrova L.N. Analysis of the system of geotechnological monitoring of the underground disposal ground of liquid radioactive waste of the SCP. *Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2007, no. 11, pp. 56–61. (In Russ.)
4. Kokorev O.N., Adonin N.R., Noskov M.D., Zavediy T.Y., Schipkov A.A. An automated system of hydrodynamic monitoring for the environmental safety of a geological repository of LRW. *Russian Physics Journal*, 2021, no. 2-2 (759), pp. 46–51. (In Russ.)
5. Pron L.A., Tkachenko A.V., Martyanov V.V., Trofimova Iu.V., Yakovleva I.V. An approach to monitoring of the geosphere and underground engineer barrier system of deep geological injection facilities and some results of monitoring. *Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 42–48. (In Russ.)
6. Arutyunyan R.V., Bogatov S.A., Gavrilov S.L., Egorova M.E., Kiselev V.P., Konoplev A.V., Kuzmin V.N., Odionokov B.V., Shikin S.A. Development of automated radiation monitoring system for facilities involved in complex decommissioning of nuclear submarines and spent nuclear fuel and radwaste management. *Thermal Engineering*, 2009, no. 6, pp. 78–86. (In Russ.)
7. Ranjbar A., Hassani H., Kourosh S. 3D geomechanical modelling and estimating the compaction and subsidence of Fahlian reservoir formation. *Arabian Journal of Geoscience*, 2017, no. 10 (116), pp. 1–12.

8. Nguyen S.K., Volonte G., Musso G., Brignoli M., Gemelli F., Mantica S. Implementation of an elasto-viscoplastic constitutive law in Abaqus/Standard for an improved characterization of rock materials. *Science in the age of experience (Conference paper)*. 2016. pp. 1–15.
9. Pozdnyakov S.P., Bakshevskaya V.A., Zubkov A.A., Danilov V.V., Rybalchenko A.I., Tsang C.-F. Modeling of waste injection in heterogeneous sand clay formations. *Underground Injection science and technology*. Berkeley, 2005. pp. 203–209.
10. Popov S.N., Chernyshov S.E., Krivoshekov S.N. Comparative analysis of the analytical and numerical methods for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone based on the elastic model taking into account the main structural elements of the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 5, pp. 94–102. (In Russ.)
11. Popov S.N. Geomechanical modeling and the casing stability analysis in conditions of partial absence of cement stone. *SOCAR Proceeding*, 2021, S.I. no. 2, pp. 34–40. (In Russ.)
12. Popova V.S., Kharitonov A.Yu. Computer simulation of processes at well drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 18–27. (In Russ.)
13. Khabibullin M.Ya. Research of a reservoir bottom zone destruction by filtering flow of the formation liquid and prevention of call formation in the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 86–94. (In Russ.)
14. Zoback M. D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge, U.K., Cambridge University press, 2007. 505 p.
15. Fjær E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. *Petroleum related rock mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 492 p.
16. Lukin S.V., Esipov S.V., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Khomutov A.Yu., Shevchuk T.N., Suslyakov I.V. Borehole stability prediction to avoid drilling failures. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 6, pp. 70–73. (In Russ.)
17. Vashkevich A.A., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Bochkov A.S., Lukin S.V. Development of integrated geomechanical modeling in Gazprom нефть PJSC. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 12, pp. 16–19. (In Russ.)
18. Talreja R., Bahuguna S., Havelia K. Merits of 3D numerical over 1D analytical geomechanics solution for a complex subsurface. *SPE oil and gas conference and Exhibition*. Mumbai, 2019. pp. 1–16. SPE 194693.
19. Zienkiewicz O. C. *The finite element method*. London, McGraw-Hill, 1977. 787 p.
20. Settari A., Walters D.A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction. *SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings*. Houston, 1999. pp. 1–13. SPE-51927-MS.
21. Charlez Ph. *Rock mechanics: petroleum applications*. Paris, Editions Technip, 1997. Vol. 2, 661 p.
22. Shvets V.B., Ginzburg L.K., Goldstein V.M., Kapustin V.K., Felkin V.I., Shvets N.S. *Handbook of soil mechanics and dynamics*. Kiev, Budivelnik Publ., 1987. 232 p. (In Russ.)
23. Melnikov N.V., Rzhetskaya V.V., Protodyakonov M.M., Teder R.I. *Distribution and correlation of indicators of physical properties of rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1981. 192 p. (In Russ.)
24. Budhu M. *Soil mechanics fundamental*. Chichester, John Wiley & Sons, 2015. 342 p.

Information about the authors

Sergey N. Popov, Dr. Sc., Chief Researcher, Head of the Laboratory, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science, 3, Gubkin street, Moscow, 119333, Russian Federation. popov@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802>

Oleg N. Kokorev, Chief Specialist-Hydrogeologist, “Seversky” branch, National operator for radioactive waste management, 8, Kommunisticheskyy avenue, Seversk, 636035, Russian Federation. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Taras Y. Zavedy, Cand. Sc., Engineer-Technologist, Siberian chemical plant, 1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russian Federation. TYZavedy@rosatom.ru

Alexander I. Manevich, Researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 3, Molodezhnaya street, Moscow, 119296, Russia. ai.manevich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7486-6104>

Received: 13.12.2023

Revised: 09.01.2024

Accepted: 19.09.2024