

В.Н. Татаринов, В.Н. Морозов, А.И. Каган, В.А. Пятыйгин
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИЗОЛЯЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА ПОРОДНЫХ МАССИВОВ
ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Представлены результаты исследований по оптимизации расположения подземных выработок при захоронении радиоактивных отходов как с точки зрения геодинамической безопасности, так и с точки зрения сохранности изоляционных свойств горных пород. Приведены результаты моделирования температурных полей в области скважины по прошествии 20, 100, 400 лет после помещения в нее контейнера с РАО без учета и с учетом воздействия тектонических напряжений.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, захоронение, изоляционные свойства, породный массив, температура, интенсивность напряжений.

Проектирование подземной части пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) требует прогноза возможных негативных проявлений горного давления, как в процессе строительства, так и последующей эксплуатации подземного сооружения. ПГЗРО представляет собой подземное сооружение на глубине 500–600 м с размерами порядка 1,2×0,8 км, имеющее 5 шахтных стволов и два горизонта протяженных горизонтальных выработок в почве которых бурятся скважины для закладки туда контейнеров с РАО.

По имеющимся оценкам контейнеры с РАО при температуре порядка 150–200 °С генерируют тепло в окружающий массив в течение интервала времени, превышающего 500–1000 лет. Таким образом, в ближней зоне ПГЗРО возникают локальные температурные поля, имеющие тенденцию к постепенному спаду во времени в результате полураспада радионуклидов, содержащихся в контейнерах РАО. При проектировании подземной части ПГЗРО неизбежно встает вопрос об оптимальном размещении горных выработок, предназначенных для захоронения РАО. С экономиче-

ской точки зрения желательно разместить их на небольшом расстоянии друг от друга, чтобы уменьшить размеры ПГЗРО, с другой стороны желательно увеличить расстояние между ними, чтобы уменьшить взаимное влияние выработок и наложение зон концентрации напряжений. В этой связи цель исследований оптимизация расположения подземных выработок ПГЗРО как с точки зрения геодинамической безопасности, так и с точки зрения сохранности изоляционных свойств горных пород. При анализе использованы расчеты изменения температуры в области шпуров и скважин с контейнерами РАО, приведенные в работах [1]. Объектом исследований являются породы Нижнеканского гранитоидного массива, представленного гранитами, гранитогнейсами и другими породами, где в настоящее время планируется создание подземной научно-исследовательской лаборатории [2]. Воздействие высоких температур на деформационно-прочностные свойства горных пород исследовались в приложении к разработке методов термического воздействия на массив горных пород при проходке и расширении скважин [3].

На геодинамическую устойчивость вмещающих пород ПГЗРО и соответственно подземных выработок влияют два фактора, работающих совместно: внешнее градиентное поле тектонических напряжений; поле температурных напряжений, от тепловыделяющих контейнеров с РАО.

Для учета этих факторов нами было проведено моделирование температурных полей и напряженно деформированного состояния вмещающих пород с теплоизлучающими РАО. Моделирование проводилось методом конечных элементов (МКЭ) [4, 5, 6].

На рис. 1 представлена зависимость температуры внешней стенки выработки с РАО от времени [7]. Видно, что температура меняется со временем существенно нелинейно и, следовательно, для анализа температурного поля, создаваемого выработкой с РАО необходимо решить нестационарную задачу теплопроводности.

В общем виде уравнение теплопроводности записывается в следующем виде [11]:

$$c_p \rho \frac{\partial T(t)}{\partial t} + c_p \rho (\nabla_j T(t)) V_j - \nabla_j (\lambda_{ij} \nabla_j T(t)) = \omega \quad (1)$$

где λ_{ij} – коэффициент теплопроводности Вт/(м·град); c_p – коэффициент теплоемкости Дж/(кг·град); ρ – плотность материала тела (кг/м³); ω – мощность внутреннего источника (или стока) тепла; T – температура материала тела (зависит от времени); t – время.

Граничные условия по температуре поверхности (ее части S_T) выглядят следующим образом:

$$T(x^i, t) = T_{in}(x^i, t) \quad (2)$$

где T_{in} – заданные значения температуры.

Для твердых тел характерны относительно малые перемещения точек тела поэтому можно пренебречь конвективным переносом тепла в материале. Учтем также, что для изотропного материала который мы рассматриваем $\lambda_{ij} = \lambda$, и в рассматриваемом случае $\omega = 0$. С учетом выше сказанного уравнение теплопроводности переписывается в следующем виде:

$$c_p \rho \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \lambda \nabla^2 T(t) = 0 \quad (3)$$

Уравнение (2) вместе с граничными условиями (3) представляет собой нестационарную задачу теплопрово-

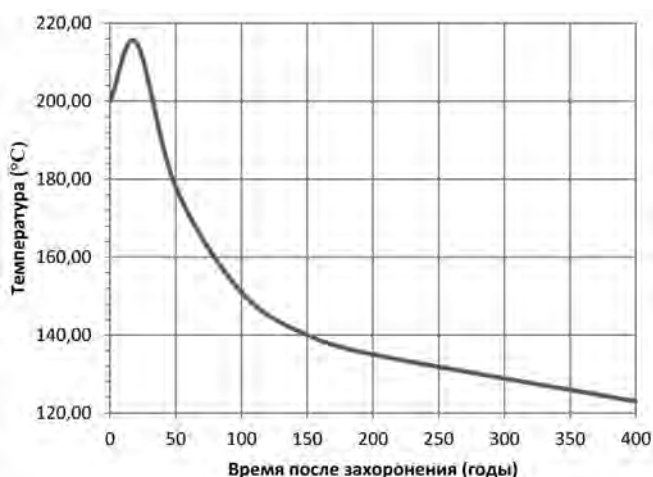


Рис. 1. Изменение температуры поверхности скважины (или шпура) от времени

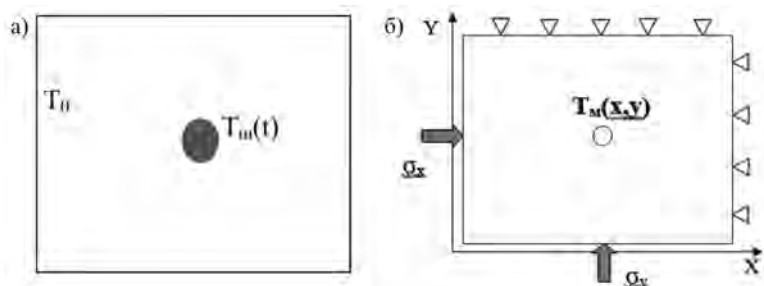


Рис. 2. Расчетные схемы задач нестационарной теплопроводности (а) и расчета НДС вмещающих пород с тепловыделяющими РАО в условиях воздействия тектонических напряжений (б) (масштаб несоблюден)

дности. Для ее численного решения был применен метод Фурье, в соответствии с которым решение задачи ищется в виде усеченной суммы следующего ряда:

$$T = T(x, t) \approx \sum_{m=1}^J \theta_m(t) \Phi(x) \quad (4)$$

Далее в соответствии с идеологией метода конечных элементов функция Φ определяется суммой следующего ряда:

$$\Phi_m(x^i) = \sum_{\Omega \in \Lambda_m} \chi^e(x^i) \cdot \varphi_m^e(x^i) \quad (5)$$

где Λ_m – множество конечных элементов содержащих узел m ; $\varphi_m^e(x^i)$ – базисная функция, соответствующая узлу m в пределах Ω^e . Решение нелинейной задачи осуществлялось по неявной схеме, на каждом шаге по времени для разрешения нелинейности делалось небольшое число (5–7) итераций типа Ньютона [8].

На рис. 2, а представлена расчетная схема нестационарной задачи теплопроводности, а на рис. 2, б – схема расчета НДС вмещающих

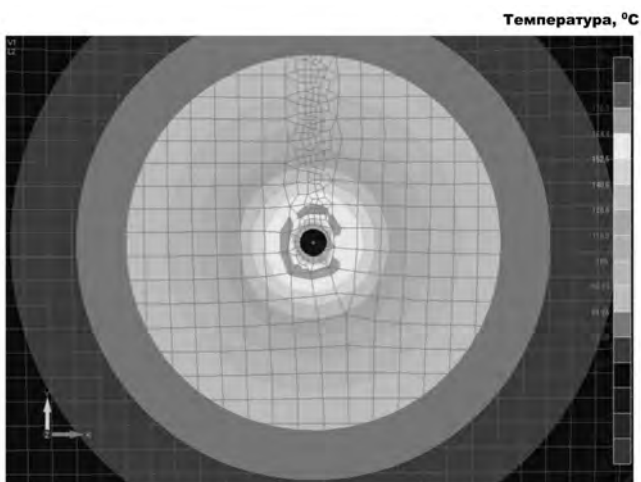


Рис. 3. Распределение температур в области шпура по прошествии 20 лет после захоронения

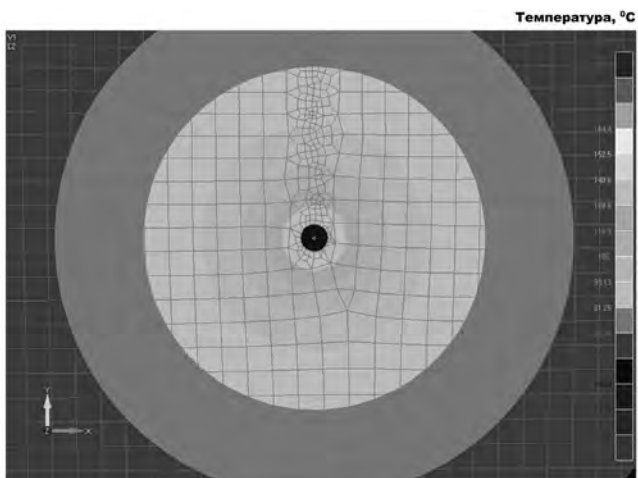


Рис. 4. Распределение температур в области шпура по прошествии 100 лет после захоронения

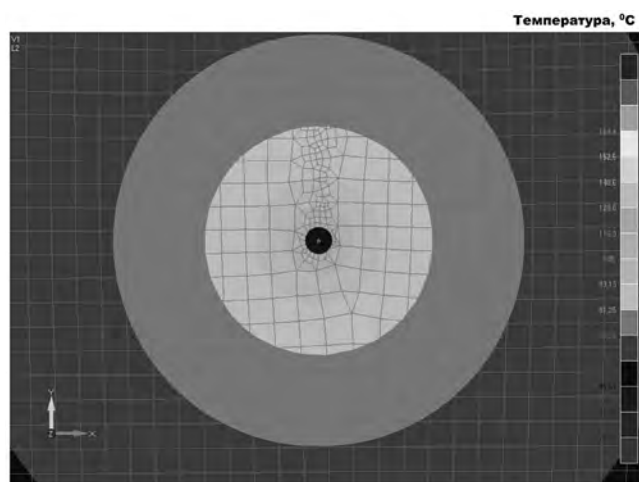


Рис. 5. Распределение температур в области шпура по прошествии 400 лет после захоронения лет после захоронения

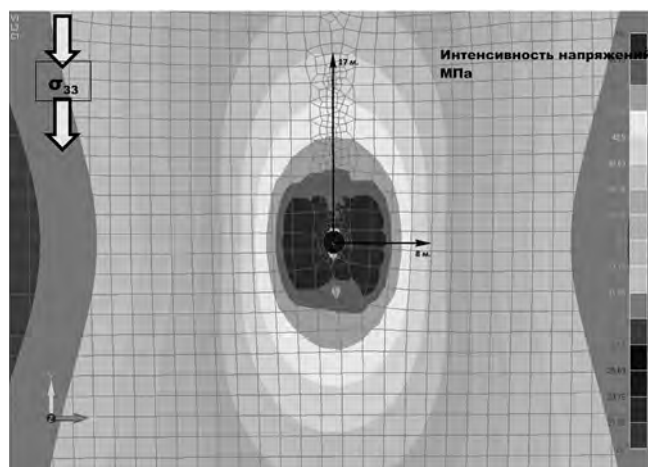


Рис. 6. Интенсивность напряжений в области скважины по прошествии 20 лет после захоронения с учетом тепловых нагрузок

пород с тепловыделяющими РАО в условиях воздействия тектонических напряжений.

На рис. 3, 4, 5 представлены полученные в результате моделирования температурные поля в области скважины по прошествии 20, 100, 400 лет соответственно после помещения в нее контейнера с РАО. Как видно температурное поле че-

рез 20 лет после закрытия объекта значительно отличается от температурного поля, которое получено для времен 100 и 400 лет после закрытия объекта.

Для оценки геодинамической безопасности ПГЗРО необходимо оценить НДС вмещающих горные выработки пород с тепловыделяющими РАО в условиях воздействия тектонических напряжений. Было задано тектоническое поле главных напряжений (рис. 2, б), по границам выделенного ранее слоя. Кинематические граничные условия соответствуют условиям закрепления, при которых не допускаются перемещения в направлениях, нормальных окаймляющему контуру.

На рис. 6, 7, 8 представлено распределение интенсивности напряжений в области скважины по прошествии 20, 100 и 400 лет после захоронения соответственно. Данные модели рассчитывались с учетом тепловых нагрузок и были приведены выше. Видно, что в данном случае общая концентрация высоких напряжений выше, чем на рис. 3 (без учета температурных нагрузок). Так же поменялась форма распределения концентраций напряжения. Зоны наиболее высоких концентраций напряжений (~45 МПа) по-прежнему расположены вдоль оси X с двухсторон от скважины, но теперь стали более вытянутыми вдоль оси Y (рис. 6). Вдоль оси Y с двухсторон от скважины вытянуты зоны повышенных напряжений. За этот эффект в основ-

ном ответственны температурные напряжения, т.к. при тепловом расширении материала наибольшие напряжения создаются в областях наибольшего относительного сжатия материала внешними напряжениями. В нашем случае такие области расположены вдоль оси Y с двух сторон от скважины.

Общая концентрация зон повышенных напряжений в области скважины по прошествии 20 лет после захоронения (рис. 6) значительно больше, чем в двух других случаях. Это связано с более высокими значениями температур в окрестностях скважины в данном случае. Заметим, что область повышенных и высоких напряжений представляет собой эллипс с большой полуосью вытянутой вдоль оси Y , равной 17 м, и малой полуосью вдоль оси X – 8 м.

Теперь попробуем оценить наименьшее расстояние между скважинами, которое не повлечет их разрушения. Как видно из рис. 6, значение интенсивности напряжений уменьшается до средних значений (~35 МПа) на расстоянии 15 м вдоль оси X от шпура и несколько большем вдоль оси Y . Тогда можно оценить НДС вмещающих пород для 4-х скважин, расположенных в углах квадрата со стороной 30 м.

Так же, как и в предыдущей модели сначала рассчитывалось распределение температур во вмещающей области скважин через 20, 100 и 400 лет соответственно. Затем моде-

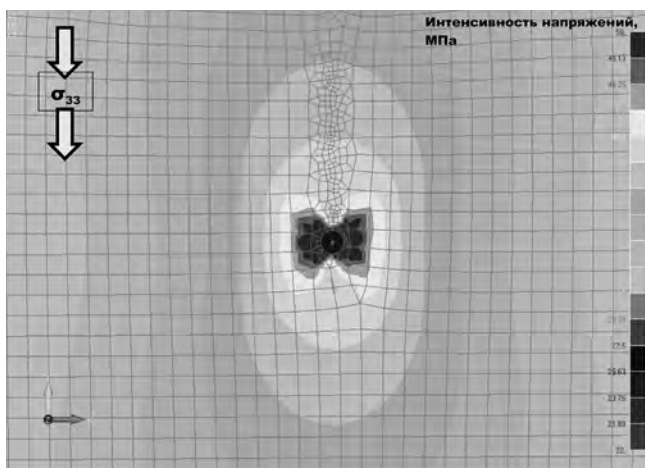


Рис. 7. Интенсивность напряжений в области скважины по прошествии 100 лет после захоронения с учетом тепловых нагрузок

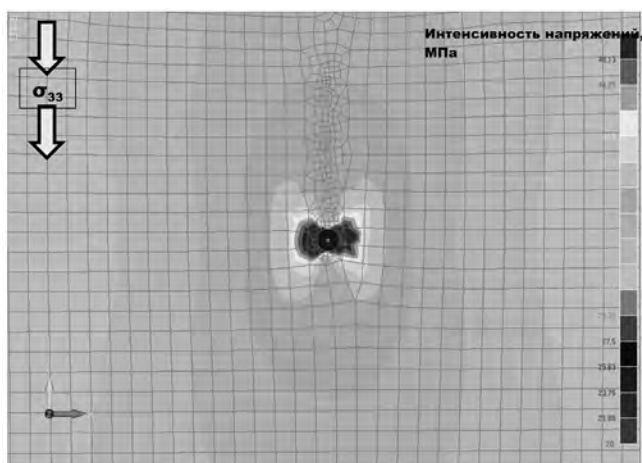


Рис. 8. Интенсивность напряжений в области скважины по прошествии 400 лет после захоронения с учетом тепловых нагрузок

лировалось НДС породного массива. На рис. 9, 10 представлено распределение интенсивности напряжений в области шпуров в МПа по прошествии 20 и 400 лет после захоронения соответственно. Наибольший интерес представляет первый рисунок, т.к. значения интенсивности напряжений в области между скважинами превышает 45 МПа. Это меньше, чем пре-

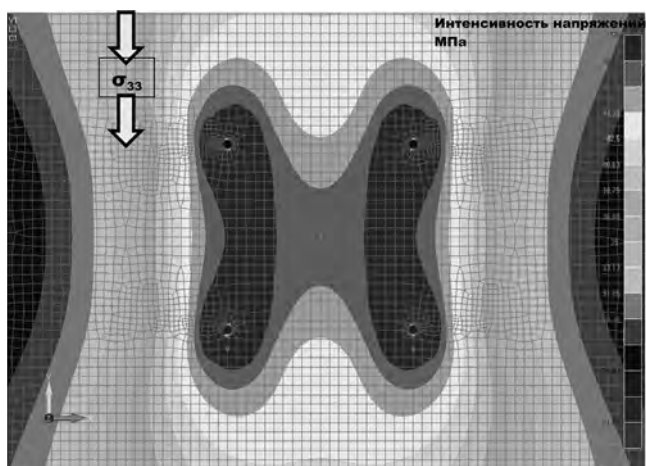


Рис. 9. Интенсивность напряжений в области скважин в МПа по прошествии 20 лет после захоронения с учетом тепловых нагрузок

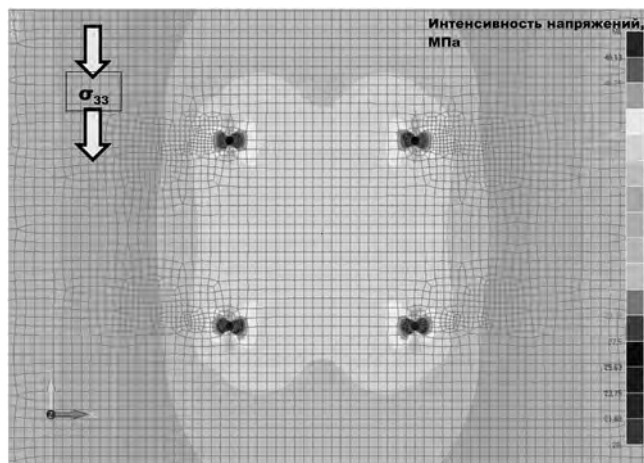


Рис. 10. Интенсивность напряжений в области скважин в МПа по прошествии 400 лет после захоронения с учетом тепловых нагрузок

дел прочности гранитов на сжатие, но с другой стороны с прошествием времени напряжение уменьшатся до более приемлемых уровней (35–40 МПа), и будут оставаться стабильными на этом уровне долгое время (сотни лет).

В заключение необходимо подчеркнуть, что пока данная работа не может дать рекомендаций по выбору оптимального расстояния между скважинами с РАО, т.к. для расчетов в ней применялись справочные характеристики материалов, которые, отличаются от реальных физико-механических характеристик пород массива. Она скорее является демонстрацией возможностей методики оценки оптимальных безопасных планировочных решений расположения выработок, скважин и шпуров друг относительно друга при проектировании ПГЗРО. Эта методика может найти применение непосредственно при исследовании в созданной подземной лаборатории ПГЗРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков Ю.Д., Лобанов Н.Ф., Бейгул В.П. Обеспечение безопасности объектов окончательной изоляции долгоживущих РАО в Красноярском крае // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2014. – № 3–4.
2. Дмитриев А.П., Кузьяев Л.С., Протасов Ю.И. и др. Физические свойства горных пород при высоких температурах. – М.: Недра, 1969. – 160 с.
3. Емелин М.Л., Морозов В.Н., Новиков Н.П. и др. Новые методы разрушения горных пород. – М.: Недра, 1990. – 240 с.
4. Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 592 с.
5. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – 1982.

6. Стренг Г. и др. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977.

7. Brady P.V. et al. Deep borehole disposal of high-level radioactive waste // Sandia Report SAND2009-4401, Sandia National

Laboratories, Albuquerque, New Mexico. – 2009.

8. Хейгеман Л., Янг Д. Прикладные итерационные методы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. **ГЛАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Татаринов Виктор Николаевич – доктор технических наук, зав. лабораторией, e-mail: v.tatarinov@gcras.ru

Морозов Владислав Николаевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: v.morozov@gcras.ru

Каган Александр Яковлевич – старший научный сотрудник, e-mail: v.kagan@gcras.ru,

Пятыгин Виктор Андреевич – кандидат технических наук, главный специалист, e-mail: v.piatigin@gcras.ru, Геофизический центр РАН.

UDC 621.039.7:504

TEMPERATURE EFFECT ON ISOLATION CHARACTERISTICS OF ROCK MASS FOR NUCLEAR WASTE DISPOSAL

Tatarinov V.N.¹, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: v.tatarinov@gcras.ru,

Morozov V.N.¹, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, e-mail: v.morozov@gcras.ru,

Kagan A. Ya.¹, Senior Researcher, e-mail: v.kagan@gcras.ru,

Piytigin V.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, e-mail: v.piatigin@gcras.ru,

¹ Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, 119296, Moscow, Russia.

The results of research on the optimization of underground workings in the disposal of radioactive waste from the point of view of geodynamic safety, and from the point of view of safety insulating properties of rocks. The results of modeling of temperature fields in the well after 20, 100, 400 years after insertion of the container with radioactive waste with and without taking into account the impact of tectonic stress.

Key words: radioactive waste, rock mass, insulating properties, temperature, stress intensity

REFERENCES

1. Polyakov Yu.D., Lobanov N.F., Beigul V.P. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologii i okruzhayushchei sredy*. 2014, no 3–4.

2. Dmitriev A.P., Kuzyaev L.S., Protasov Yu.I. *Fizicheskie svoystva gornykh porod pri vysokikh temperaturakh* (Physical properties of rocks under high temperature), Moscow, Nedra, 1969, 160 p.

3. Emelin M.L., Morozov V.N., Novikov N.P. *Novye metody razrusheniya gornykh porod* (New methods of rock failure), Moscow, Nedra, 1990, 240 p.

4. Anderson E.B., Belov S.V., Kamnev E.N., Kolesnikov I.Yu., Lobanov N.F., Morozov V.N., Tatarinov V.N. *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov* (Underground isolation of nuclear waste), Moscow, Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2011, 592 p.

5. Bate K., Wilson E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov* (Numerical analysis techniques and finite element method), 1982.

6. Strenge G. *Teoriya metoda konechnykh elementov* (Theory of finite element method), Moscow, Mir, 1977.

7. Brady P.V. et al. Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. *Sandia Report SAND2009-4401*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. 2009.

8. Kheigeman L., Yang D. *Prikladnye iteratsionnye metody*: Per. s angl. (Applied iteration methods. English–Russian translation), Moscow, Mir, 1986.