

УДК 536.2 : 519.6

## Численное моделирование теплового режима подземного объекта хранения отработавшего ядерного топлива (вариант встроенной конструкции)

П. В. Амосов

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>*

*Информация о статье*      *Реферат*

Поступила  
в редакцию  
14.11.2020;

получена  
после доработки  
25.05.2021

*Ключевые слова:*  
отработавшее  
ядерное топливо,  
объект хранения,  
объемное численное  
моделирование,  
смешанная  
конвекция,  
критерияльные  
значения  
температуры

Представлены результаты исследования методом численного моделирования теплового режима подземного объекта долговременного хранения отработавшего ядерного топлива в варианте встроенной железобетонной конструкции. Построены две компьютерные модели в объемной постановке в программе COMSOL. В основе первой модели лежит приближение несжимаемой жидкости, для второй – приближение "несжимаемого идеального газа". Математическая основа моделей: уравнение неразрывности, уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, стандартная  $(k - \epsilon)$ -модель турбулентности и общее уравнение теплопереноса. Учет условий смешанной конвекции реализован в приближении "несжимаемого идеального газа", в котором плотность воздуха является функцией только температуры. Исследована наиболее напряженная в тепловом отношении компоновка размещения ядерного топлива: U-Zr – defect – U-Be. Расход воздуха проварьирован в диапазоне от 21 до 0,656 м<sup>3</sup>/с. Численные эксперименты выполнены на срок до 5 лет хранения топлива. Подчеркнуто принципиальное отличие нестационарной структуры прогнозируемых в модели "несжимаемого идеального газа" скоростных полей от "застывшей" картины аэродинамических параметров в модели несжимаемой жидкости. Показано соблюдение требований по непревышению предельных значений температуры при функционировании объекта в консервативных условиях проветривания (расход 0,656 м<sup>3</sup>/с) с минимумом затрат по организации вентиляции. Проанализирована динамика тепловых потоков, направленных в скальный массив через основание и с поверхности встроенной конструкции отсека с U-Zr топливом в воздушную среду. Отмечено доминирование теплового потока с поверхности конструкции и различное время выхода кривых динамики теплового потока на максимальные значения. Тепловой поток в массив достигает максимума существенно быстрее, чем в воздух.

*Для цитирования*

Амосов П. В. Численное моделирование теплового режима подземного объекта хранения отработавшего ядерного топлива (вариант встроенной конструкции). Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 2. С. 228–239. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-228-239>

## Numerical simulation of the thermal regime of an underground spent fuel storage facility (built-in structure variant)

*Pavel V. Amosov*

*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>*

*Article info*

Received  
14.11.2020;

received  
in revised form  
25.05.2021

*Key words:*  
spent fuel storage facility,  
three-dimensional  
numerical simulation,  
mixed convection,  
the criterion  
of temperature values

*Abstract*

The results of a numerical simulation of the thermal regime of an underground facility for long-term storage of spent nuclear fuel in a built-in reinforced concrete structure are presented. Two computer models were constructed in a three-dimensional formulation in the COMSOL programme. The first model is based on the incompressible fluid approximation, while the second model is based on the "incompressible ideal gas" approximation. The mathematical basis of models: the continuity equation, Navier – Stokes equations averaged by Reynolds, the standard  $(k - \epsilon)$  turbulence model, and the general heat transfer equation. Consideration of mixed convection conditions is implemented in the "incompressible ideal gas" approximation, where the air density is a function of temperature only. The most thermally stressful arrangement of spent fuel placement is investigated: U-Zr – defective – U-Be. The air rate is varied in the range from 21 to 0.656 m<sup>3</sup>/s. Numerical experiments were performed for up to 5 years of fuel storage. The principal difference between the non-stationary structure of the velocity fields predicted in the "incompressible ideal gas" model and the "frozen" picture of the aerodynamic parameters in the incompressible fluid model is emphasized. It is shown that the requirements for exceeding the temperature limit values are met when the object operates under conservative ventilation conditions (rate 0.656 m<sup>3</sup>/s) with a minimum of costs for organizing ventilation. The dynamics of heat flows directed into the rock mass through the base and from the surface of the built-in structure of the U-Zr fuel compartment to the air environment are analyzed. The predominance of the heat flow from the surface of the structure and the different times when the curves of the heat flow dynamics reach their maximum values are noted. The heat flow to the array reaches its maximum significantly faster than to the air.

*For citation*

Amosov, P. V. 2021. Numerical simulation of the thermal regime of an underground spent fuel storage facility (built-in structure variant). *Vestnik of MSTU*, 24(2), pp. 228–239. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-228-239>

## Введение

Концептуальная конструктивно-компоновочная схема подземного хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) разработана в процессе исследований, выполненных специалистами Горного института КНЦ РАН по проблеме безопасного обращения с ОЯТ судовых энергетических установок на Европейском Севере России (*Мельников и др., 2003*). Подземное хранилище ОЯТ предложено создать в скальном массиве на глубине 100 м; время хранения ОЯТ – около 50 лет. Для сухого хранилища отработавшего ядерного топлива, наряду с общими требованиями ко всем типам хранилищ ОЯТ (ядерная и радиационная безопасность), предъявляется требование обеспечения безопасного температурного режима хранения топлива<sup>1</sup> (*Калинкин и др., 2009*), заключающегося в необходимости организации отвода остаточных тепловыделений ОЯТ и исключения возможности перегрева материалов и конструкций [критериальные значения температуры: в области скального массива 373 К (100 °С); на поверхности железобетонной конструкции 358 К (85 °С)] (*Калинкин и др., 2009; Наумов и др., 2019; Ржевский и др., 1978*).

Прогнозные расчеты теплового состояния материалов подземного хранилища ОЯТ на длительные сроки принято выполнять на базе методов численного моделирования. Разработчики рассматриваемого проекта использовали программу FFM (*Мельников и др., 2010*), в которой для получения системы дискретных алгебраических аналогов уравнения теплопроводности применяется метод Патанкара (*Патанкар, 1984*). В ходе исследований программа была модернизирована с учетом особенностей отвода остаточных тепловыделений ОЯТ в условиях подземного хранилища. С помощью FFM были осуществлены прогнозные расчеты теплового режима одиночного контейнера в зависимости от теплового состояния окружающей его среды под тепловым воздействием системы контейнеров, а также при хранении облученного топлива в отдельных чехлах (*Мельников и др., 2010*).

Вместе с тем известен ряд современных верифицированных компьютерных программ COMSOL<sup>2</sup>, FlowVision, ANSYS<sup>3</sup> (*Щеляев, 2018*) и т. д., которые могут быть использованы в прогнозах теплового режима подземного хранения ОЯТ в условиях смешанной конвекции.

Результаты исследований теплового режима подземного хранилища ОЯТ в вариантах либо встроенной железобетонной конструкции, либо железобетонных контейнеров и естественных (горная порода) защитных барьеров представлены в работах (*Амосов и др., 2010а; 2010б; Алексеева и др., 2013а; 2013б*). В указанных исследованиях моделирование теплового режима объекта выполнялось с помощью программы COMSOL (*Егоров, 2006; Бирулин, 2006*). Первоначально задача решалась в двухмерной постановке (*Амосов и др., 2010а; 2010б*), в дальнейшем – в объемной (*Алексеева и др., 2013а; 2013б*).

Математическая модель основывалась на уравнениях неразрывности, Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и общем уравнении теплопереноса. При этом уравнение переноса решалось отдельно (после того как была рассчитана аэродинамика объекта). В реализованной постановке отсутствовал важный член уравнений Навье – Стокса, который учитывает эффект изменения плотности воздуха в зависимости от температуры, что безусловно снизило ценность выполненных исследований. Как отметили авторы работы (*Амосов и др. 2010б, с. 134*), попытки включить в уравнения Навье – Стокса влияние силы тяжести в приближении Буссинеска для принятого в задаче начального значения мощности остаточных тепловыделений оказались неудачными.

Исправляя указанный момент с учетом накопленного за прошедшие годы опыта моделирования аэротермодинамических процессов (*Амосов и др., 2014; 2018*), в представляемом материале излагаются результаты исследования теплового режима и особенности аэротермодинамики атмосферы подземного объекта долговременного хранения ОЯТ (вариант встроенной железобетонной конструкции) в условиях смешанной конвекции в трехмерной постановке.

## Описание модели: параметры, управляющие уравнения и исходные данные

В процессе исследований рассматривается модуль, представляющий собой камерную выработку для хранения ОЯТ во встроенной железобетонной конструкции (*Мельников и др., 2003*). Геометрическое представление трехмерной модели подземного объекта хранения перерабатываемых типов ОЯТ в варианте железобетонной конструкции изображено на рис. 1. Для доставки чехлов в модуле предусмотрен транспортный заезд сечением 42 м<sup>2</sup> (вход). С противоположной стороны находится вентиляционная сбойка сечением 18 м<sup>2</sup> (выход). Для хранения чехлов в модуле разработана встроенная конструкция, состоящая из железобетонных стен и перекрытий. В перекрытия вмонтированы металлические трубы, в которых размещают чехлы

<sup>1</sup> См.: Пункты сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности НП-035-02 // Вестник Госатомнадзора России. 2002. № 3. С. 51–58 ; Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии НП-061-05 // URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/47/47340/> (дата обращения: 11.09.2016).

<sup>2</sup> Документация COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/documentation> (дата обращения: 14.12.2019).

<sup>3</sup> Release 17.0 Documentations for ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., 2016. Полная документация доступна на английском языке из меню Help во время работы с программой.

по две штуки в высоту. Трубы имеют герметичное основание и закрываются герметичной заглушкой. Тепло с поверхности отводится как за счет принудительной вентиляции, так и посредством конвекции.

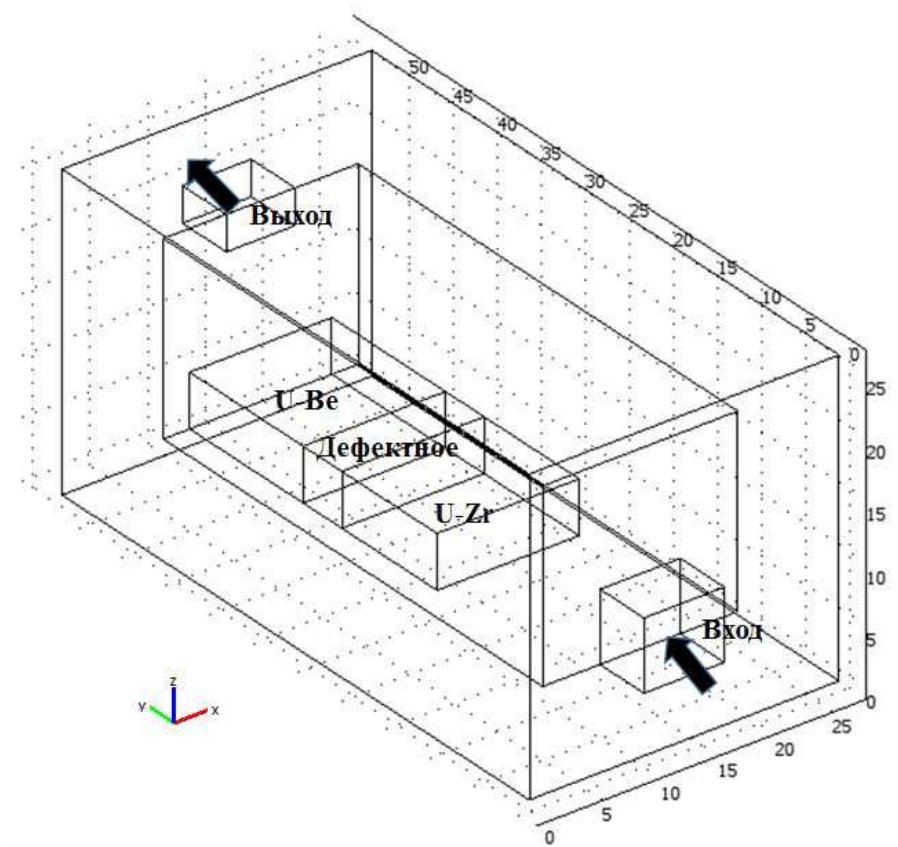


Рис. 1. Геометрическое представление трехмерной модели подземного объекта хранения неперерабатываемых типов ОЯТ в варианте железобетонной конструкции (Алексеева и др., 2013а)  
 Fig. 1. Geometric representation of a three-dimensional model of an underground storage facility of non-processed SF types in a reinforced concrete structure (Alekseeva et al., 2013a)

В модуле хранения располагаются отсеки с видами топлива [уран-циркониевым (U-Zr), дефектным (defect), уран-бериллиевым (U-Be)], извлеченными из реакторов разных типов. Указанные виды ОЯТ отличаются степенью обогащения, временем эксплуатации и т. д. Все виды топлива обладают разной мощностью остаточных энерговыделений (МОЭ), а значит, при различных компоновках размещения топлива будут иметь место различные распределения температурных полей. Исследования 2012 г. (Алексеева и др., 2013а; 2013б), выполненные без учета эффекта изменения плотности воздуха в зависимости от температуры, показали, что наиболее напряженной в тепловом отношении является компоновка "U-Zr – defect – U-Be". Именно это расположение ОЯТ рассматривается в представляемой работе.

В основе созданных компьютерных моделей лежат два приближения с позиций управляющих уравнений (математических моделей).

(1) "Несжимаемый идеальный газ" (НИГ) – уравнение неразрывности, уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, и уравнение переноса тепла с учетом конвективного и кондуктивного механизмов переноса, которые решаются совместно с учетом зависимости плотности воздуха от температуры. Для замыкания системы аэродинамических уравнений используется стандартная  $(k - \epsilon)$ -модель турбулентности (Гарбарук, 2012; Роди, 1984; Белов и др., 2001). Из-за нагрева воздуха происходят отклонения локальной плотности  $\rho$  по сравнению с плотностью воздуха на входе  $\rho_0$ . В результате появляется выталкивающая сила, выраженная как  $(\rho - \rho_0)g$  и включенная в уравнение сохранения вертикальной компоненты импульса ( $g$  – ускорение свободного падения).

(2) Несжимаемая жидкость (НЖ) – уравнение неразрывности, уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, и уравнение переноса тепла с учетом конвективного и кондуктивного механизмов переноса, которое решается совместно, но с учетом постоянной плотности воздуха и нулевой вертикальной компоненты импульса. Для замыкания системы аэродинамических уравнений также привлечена стандартная  $(k - \epsilon)$ -модель турбулентности (Гарбарук, 2012; Роди, 1984; Белов и др., 2001). Как указывалось выше, в ранних

исследованиях автора с коллегами (Амосов и др., 2010а; 2010б; Алексеева и др., 2013а; 2013б) уравнение теплопереноса решалось отдельно, "накладываясь" на заранее рассчитанную аэродинамику объекта.

Помимо общеизвестного подхода, применяемого для решения задач, в которых плотность воздуха зависит от температуры, так называемого приближения Буссинеска, в ряде программных продуктов (ANSYS FLUENT, COMSOL, FlowVision) возможно использование указанной выше модели НИГ. В обозначенной модели некоторые свойства воздуха рассматриваются как зависящие исключительно от температуры. Например, пользователи программы COMSOL для ламинарного режима течения воздуха рекомендуют следующие соотношения (Егоров, 2006):

$$\rho = p_0 \mu / (RT), \quad \lg(k) = -3,723 + 0,865 \lg(T), \quad \eta = 6,0 \cdot 10^{-6} + 4,0 \cdot 10^{-8} T,$$

где  $p_0 = 10\,1325$  Па;  $\mu = 0,0288$  кг/моль;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К);  $T$  – температура;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $\eta$  – коэффициент молекулярной вязкости. Именно такой подход автор апробировал применительно к подземному хранилищу ОЯТ в двухмерной постановке (Амосов, 2020).

Представляется, что при использовании стандартной  $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности зависимости для коэффициентов теплопроводности и вязкости будут неактуальными, поскольку величины коэффициентов молекулярной вязкости и теплопроводности существенно ниже значений коэффициентов турбулентного переноса импульса и тепла. Переход от коэффициентов турбулентного переноса импульса к коэффициентам турбулентного переноса тепла осуществляется через число Прандтля – Шмидта  $\sigma_T$  (Бакланов, 1988), которое для объемных моделей принимается равным 0,72.

Подробное описание используемых переменных, задействованных в моделях аэродинамики и переноса тепла, приведено в документации COMSOL, справочных файлах и учебных пособиях (Егоров, 2006; Бирюлин, 2006).

Неперерабатываемое ОЯТ разделяется на три вида, которые размещаются во встроенной конструкции в отдельных отсеках и характеризуются различной величиной МОЭ на момент заполнения хранилища (Мельников и др., 2010):

- 1) уран-циркониевое (начальная МОЭ ~ 7,1 кВт, число гнезд хранения – 338 ед.);
- 2) дефектное (начальная МОЭ ~ 0,7 кВт, число гнезд хранения – 307 ед.);
- 3) уран-бериллиевое (начальная МОЭ ~ 1,1 кВт, число гнезд хранения – 399 ед.).

Компьютерная модель состоит из трех областей, принципиально различающихся по своим теплофизическим характеристикам (рис. 1, 2):

- источник тепловыделений, включающий в себя железобетонную конструкцию с тремя видами ОЯТ;
- горная порода – окружающий вмещающий массив (в данном случае – гранит);
- воздух горной выработки.

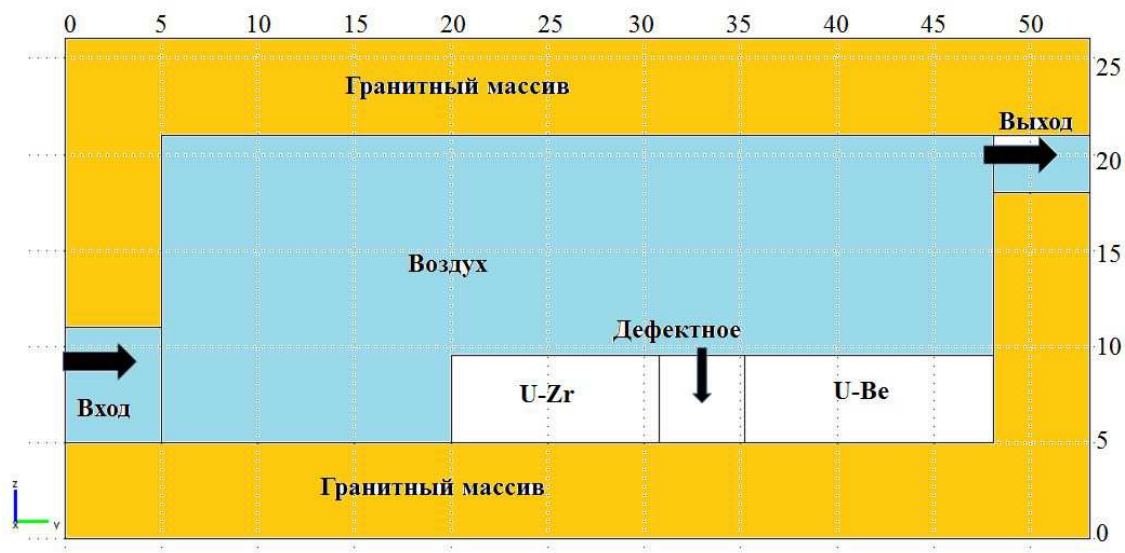


Рис. 2. Геометрия модели в центральном сечении (оси Y–Z)  
 Fig. 2. Model geometry in the central section (Y–Z axes)

Для оценки значений теплофизических параметров сложной гетерогенной системы – железобетонной конструкции – использованы рекомендуемые в работах (Ржевский и др., 1978; Мельников и др., 2010; 2001) соотношения. Для области железобетонной конструкции в различных отсеках ОЯТ рассчитаны объемные и массовые доли материалов, входящих в состав конструкций (сталь, бетон, топливо, воздух).

Значения теплофизических параметров для различных зон хранения ОЯТ (с учетом операции "взвешивания" объемной и массовой долей), горной породы и воздуха приведены в табл. 1.

Таблица 1. Принятые в расчетах значения теплофизических параметров<sup>4</sup> (Козлов и др., 2000; Чиркин, 1968; Справочник (кадастр) ..., 1975; Физические свойства ..., 1984)

Table 1. Adopted in the calculations of the values of thermophysical parameters

Теплофизический параметр	Зона хранения ОЯТ			Горная порода (гранит)	Воздух
	1	2	3		
Теплопроводность, Вт/(мК)	1,9	1,4	1,5	2,3	0,0239
Теплоемкость, Дж/(кгК)	820	840	750	790	1 000
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2 190	2 200	2 080	2 650	1,22

Примечание. Зоны, предназначенные для хранения отработавшего ядерного топлива: 1 – уран-циркониевого; 2 – уран-бериллиевого; 3 – дефектного.

Отработавшее топливо, являясь источником тепла, обладает мощностью остаточного энерговыделения, обусловленного радиоактивным распадом содержащихся в облученном топливе продуктов реакции деления и актинидов. На основе опубликованных в открытой печати данных выполнены расчеты МОЭ ОЯТ различных типов авторами монографии (Мельников и др., 2010, с. 26, рис. 2.1). Для создания модели распространения тепла на базе программного комплекса COMSOL объемную МОЭ удобно использовать в форме аналитической зависимости, что несложно выполнить по графическим зависимостям и известным объемам отсеков с разными видами ОЯТ. Сравнительный анализ кривых аппроксимации (рассмотрены полиномы разных степеней) показал приемлемость использования объемных МОЭ в форме полиномов 3-й степени.

В качестве начальных условий при решении уравнения теплопереноса приняты следующие значения температуры, °С: воздуха – 15, гранита – 7, ОЯТ – 27. Температура поступающего воздуха принята равной 15 °С.

При численном решении системы управляющих уравнений аэродинамики модели турбулентности и теплопереноса использованы стандартные граничные условия (табл. 2) (Егоров, 2006). На всех внутренних границах при решении уравнения теплопереноса установлено условие неразрывности.

Продолжительность времени моделирования во всех расчетах составила пять лет.

В зависимости от расхода подаваемого воздуха изменяются нестационарные пространственные распределения температурных полей в материалах модели. В ходе исследования рассмотрено несколько кратных значений расхода воздуха для выявления наиболее приемлемого (с позиций теплового фактора для данной конструкции) распределения температур и экономически оправданного (минимизация затрат на организацию проветривания модуля хранения) расхода:

$$Q_1 = 21; Q_2 = 10,5; Q_3 = 5,25; Q_4 = 2,625; Q_5 = 1,3125; Q_6 = 0,656 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таблица 2. Граничные условия при численном решении системы управляющих уравнений  
Table 2. Boundary conditions for the numerical solution of a system of governing equations

Граница	Уравнения аэродинамики	Уравнение теплопереноса
Вход	Горизонтальная компонента скорости	Температура поступающего воздуха
Выход	Отсутствие напряжений	Конвективный поток
Стенки модуля хранения	Логарифмическая функция стенки	Условие неразрывности
Внешние границы модели	–	Условие нулевого потока

При указанных выше геометрических размерах модуля (рис. 1, 2) выбранные значения расхода воздуха обеспечивают турбулентный режим движения, а значения скорости вблизи тепловыделяющих материалов меняются в широком диапазоне.

Для численной реализации модели использовалась тетраэдрическая расчетная сетка типа Coarser, что обеспечивало разумные временные затраты на выполнение численных экспериментов. При решении нестационарной задачи применялась временная опция FREE (Егоров, 2006) с нижней границей интервала шага по времени, равном 0,3 с, что с запасом обеспечивало выполнение критерия Куранта при всех задаваемых расходах воздуха. В качестве решателя системы уравнений использован высокоэффективный прямой решатель UMFPACK. Для обеспечения устойчивости вычислений потребовалось подключение методики искусственной вязкости Isotropic Diffusion с подбором параметра подстройки. Многочисленные

<sup>4</sup> Наука о Земле. Т. 21: Справочник физических констант горных пород. М., 1969. 543 с.



попытки получить устойчивые решения с помощью других методик (Streamline Diffusion, Crosswind Diffusion) и устранить численную неустойчивость к успеху не привели (Егоров, 2006).

### Результаты численных экспериментов и их обсуждение

#### Аэродинамические характеристики потоков

Основное принципиальное отличие в результатах численных экспериментов на базе двух моделей заключается в структуре воздушных потоков объекта хранения. Если в модели НЖ структура воздушных потоков при рассмотренных расходах воздуха идентична на всем протяжении решения нестационарной задачи теплопереноса (отличие только в значениях компонентов скорости при разных расходах), то учет влияния тепла на аэродинамику делает проблему по-настоящему нестационарной. В качестве примера на рис. 3, *a* и *б* приведены "мгновенные" картины скоростных полей на пять лет моделирования в приближении НИГ для двух значений расхода воздуха (верхний – максимальный и нижний – минимальный). Для изображения поля скорости использована опция "нормализованных" стрелок, что позволяет увидеть структуру скоростного поля и в тех областях, где модули компонентов скорости близки к нулю и при использовании опции "пропорциональных" стрелок вектора превращаются в точки.

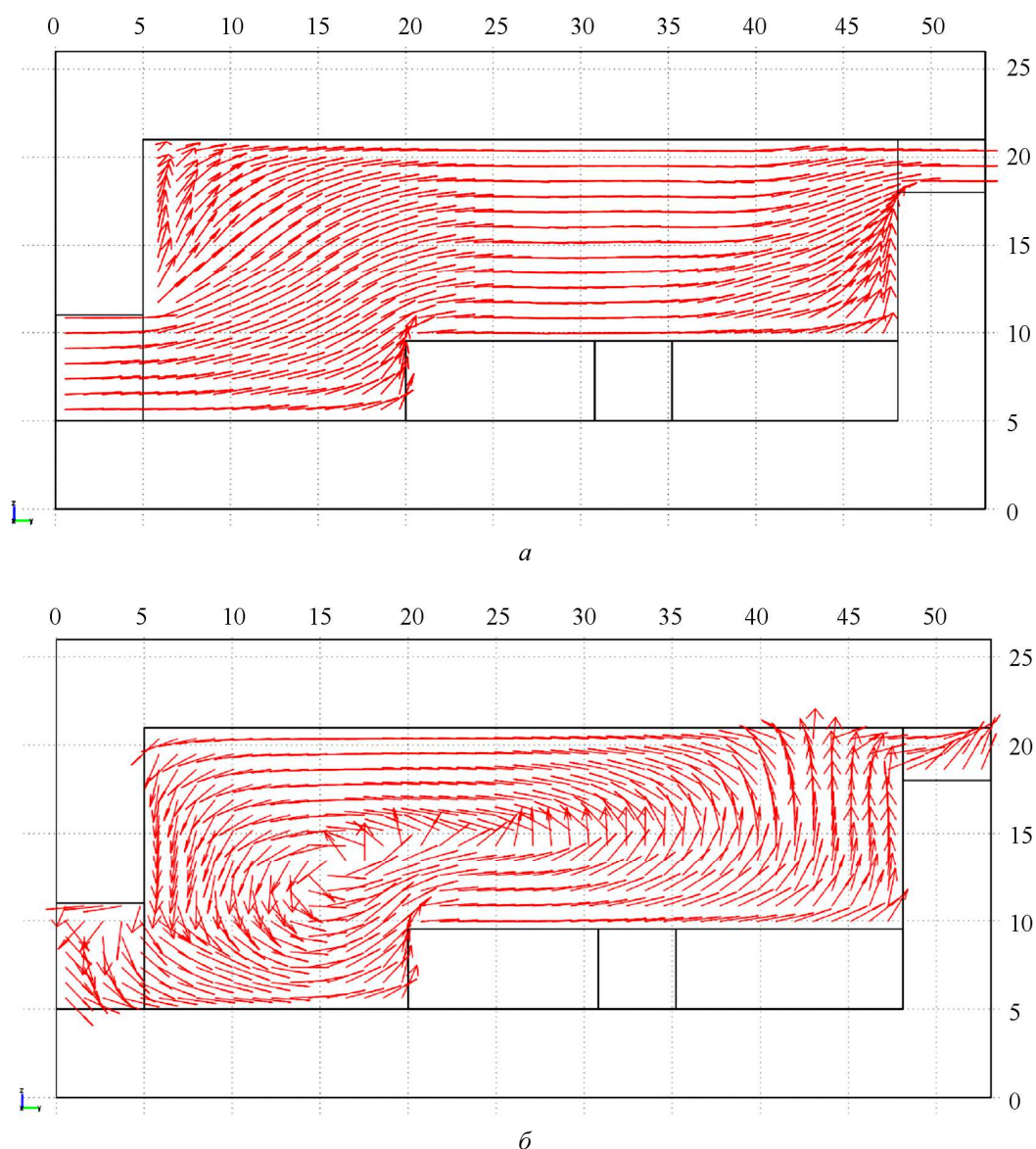


Рис. 3. "Мгновенная" картина структуры поля скорости в центральном сечении модели на пять лет моделирования в приближении НИГ для двух значений расхода воздуха:

*a* – максимальный  $Q_1$ ; *б* – минимальный  $Q_6$

Fig. 3. "Instantaneous" picture of the structure of the velocity field in the central section of the model for 5 years of modeling in the NIG approximation for two values of air rate:

*a* – maximum  $Q_1$ ; *б* – minimum  $Q_6$

Отметим, что структура полей скорости, которые рассчитываются в приближении НИГ, существенно отличается от структуры полей скорости в модели НЖ. Анализ структуры полей скорости в приближении НИГ при разных значениях расхода воздуха показывает, что в ситуациях большого расхода воздуха  $Q_1$  и  $Q_2$  с учетом монотонного спада объемной мощности остаточных тепловыделений структура потока на пять лет моделирования практически совпадает со структурой поля скорости в приближении НЖ. При меньших расходах воздуха имеются свои особенности в местоположениях и размерах вихреобразований.

Таким образом, становится очевидным, что в модели НЖ, на базе которой выполнены текущие расчеты и исследования 2010–2012 гг. (Амосов и др., 2010а; 2010б; Алексеева и др., 2013а; 2013б), и в модели НИГ конвективный механизм переноса тепла, который является доминирующим в воздушной среде, существенно различается. Если в модели НЖ имеем практически однонаправленный перенос тепла к выходу из объекта хранения, то в модели НИГ конвективный перенос тепла варьирует в зависимости от расхода воздуха как во времени, так и в пространстве. Следовательно, результатом указанных отличий могут быть определенные изменения в итоговых показателях теплового режима объекта.

#### Тепловой режим объекта хранения

Для ответа на вопрос об условиях выполнения критериальных значений температуры проанализированы пространственно-временные распределения температуры для указанных выше значений расхода воздуха. Напомним, что прежде всего интерес вызывают критериальные значения температуры: в области скального массива (не выше 100 °С) и на поверхности железобетонной конструкции (не выше 85 °С). Анализ пространственно-временных распределений температуры показывает, что поиск максимальных температур в различных областях модели необходимо выполнять в различных сечениях (максимального разогрева, граница раздела "горная порода – встроенная конструкция", поверхность конструкции).

В указанных сечениях проанализирована динамика пространственного распределения температуры при вариации расхода воздуха в модели НИГ. В частности, в табл. 3 представлены уровни прогнозируемых температур во времени в сечении максимального разогрева (высотная отметка по оси  $Z$  составляет 6,15 м, отсек с U-Zr топливом), а в табл. 4 – температура на границе раздела "горная порода – встроенная конструкция". Координаты области максимального разогрева вдоль оси  $Y$  имеют значения 26,5–27 м (область немного смещена вниз по потоку от середины отсека с U-Zr топливом).

Как видно из табл. 3, при минимальном значении расхода воздуха в области встроенной конструкции, но не скальной породы, прогнозируется превышение критериального значения. Это превышение длится более двух лет, а максимум приходится на третий год. Если указанный критерий использовать и для инженерного сооружения, то можно констатировать, что дальнейшее уменьшение расхода воздуха недопустимо. Таким образом, при кратности воздухообмена в модуле хранения за один час на уровне ~4,4 можно обеспечить безопасный тепловой режим подземного объекта. Данные условия сравнительно легко осуществляются посредством подбора вентилятора с соответствующими параметрами или регулирования аэродинамических характеристик ветвей вентиляционной сети.

Следует обратить внимание на рост температуры при уменьшении расхода воздуха, что естественно в подобных процессах. При этом для всех расходов, кроме минимального, максимум прогнозируется на второй год, а при минимальном расходе – на третий год.

Таблица 3. Динамика максимальных температур в сечении наибольшего разогрева при вариации расхода воздуха (высотная отметка по оси  $Z$  составляет 6,15 м), °С  
Table 3. Dynamics of maximum temperatures in the cross-section of the greatest heating with variations in air rate (the altitude mark on the  $Z$  axis is 6.15 m), °С

Время, годы	Модель НИГ					
	$Q_6$	$Q_5$	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
1	94,00	92,43	90,95	90,33	89,17	88,19
2	100,65	97,08	93,13	91,19	90,34	89,25
3	100,67	96,41	91,94	89,18	88,51	87,57
4	99,08	94,65	90,18	87,23	86,56	85,72
5	97,13	92,70	88,33	85,38	84,68	83,92

Динамика максимальных температур с учетом расхода воздуха  $Q_6$ , рассчитанная с использованием модели НЖ, приведена в табл. 4. Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что в расчетах по модели НИГ критериальное значение температуры для скального массива не превышено, т. е. формально имеется некоторый резерв по снижению расхода, а уменьшение расхода воздуха приводит к росту температуры. Прогноз температуры, выполненный в модели НЖ при минимальном расходе, свидетельствует о серьезном

превышении критериального значения для скального массива. При этом температура выше 100 °С сохраняется продолжительное время (более четырех лет), а максимум разогрева прогнозируется на четвертый год.

Таблица 4. Динамика максимальных температур в сечении на границе раздела "горная порода – встроенная конструкция" при вариации расхода воздуха (высотная отметка по оси Z составляет 5,00 м), °С  
 Table 4. Dynamics of maximum temperatures in the cross-section at the "rock – built-in structure" interface with variations in air rate (the Z axis elevation is 5.00 m), °С

Время, годы	Модель НЖ	Модель НИГ					
	$Q_6$	$Q_6$	$Q_5$	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
1	89,48	80,98	79,62	78,37	77,88	76,84	75,90
2	104,15	88,58	85,12	81,30	79,54	78,75	77,67
3	108,79	89,09	84,89	80,48	77,84	77,24	76,31
4	109,90	87,84	83,44	79,03	76,16	75,57	74,76
5	109,41	86,19	81,79	77,46	74,59	73,96	73,23

Пространственное распределение температуры вдоль оси X на высоте максимального разогрева в центральных сечениях трех отсеков с U-Zr – defect – U-Be топливом на третий год хранения для условий минимального расхода воздуха представлено на рис. 4. В отсеке с U-Zr топливом центральное поперечное сечение находится примерно на 1 м левее, чем область максимального разогрева. Поэтому максимум кривой температуры в этом отсеке проходит ниже 100 °С (примерно на 4 °С). В других отсеках разогревы умеренные (что обусловлено низкими значениями МОЭ) и свидетельствуют о безопасном температурном режиме.

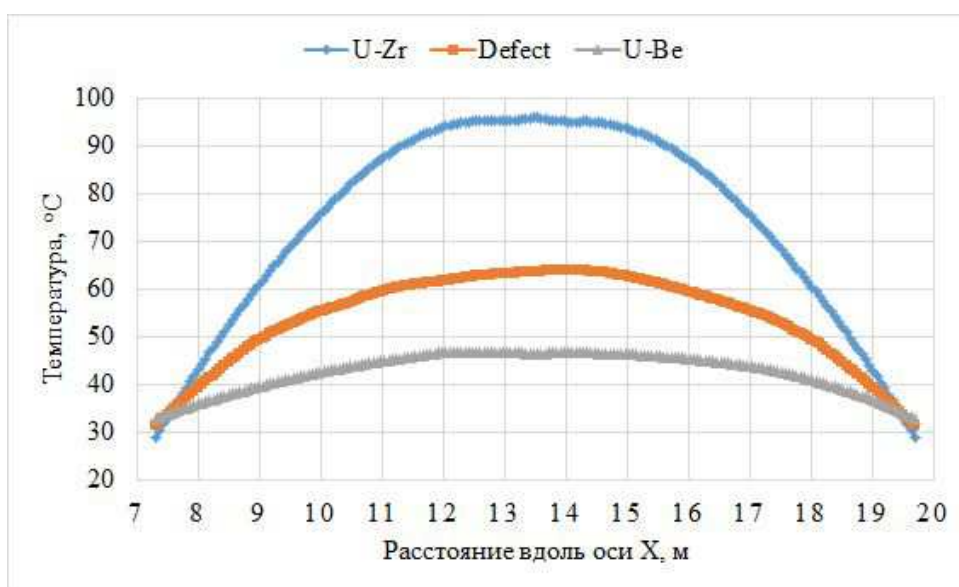


Рис. 4. Пространственное распределение температуры вдоль оси X на высоте максимального разогрева (6,15 м) в центральных сечениях отсеков с U-Zr – defect – U-Be топливом на третий год хранения  
 Fig. 4 Spatial distribution of temperature along the X axis at the height of maximum heating (6.15 m) in the central sections of compartments with U-Zr – defect – U-Be fuel for the third year of storage

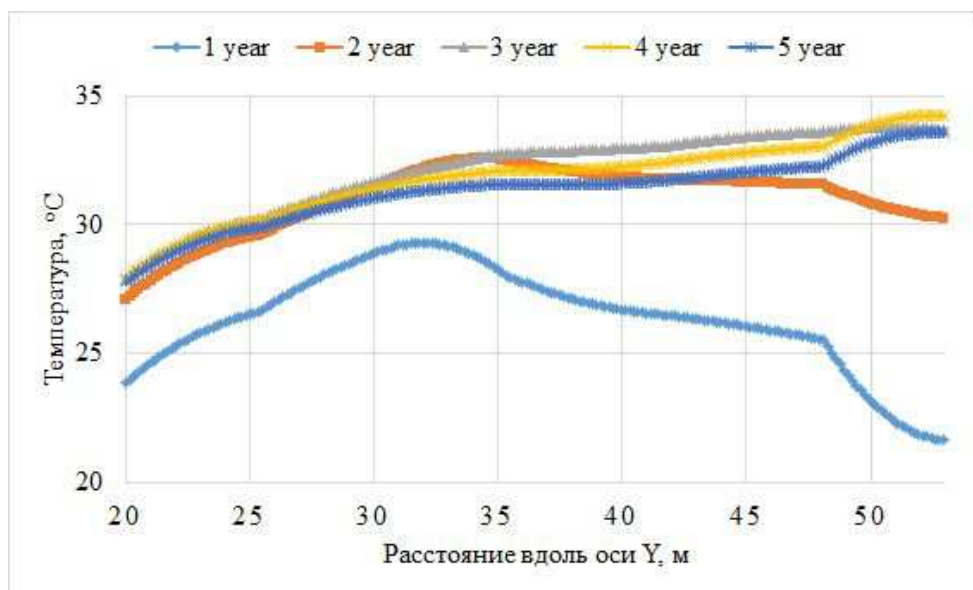
Интересно проследить за динамикой нагрева поверхности встроенной конструкции. На графиках рис. 4 видно, что температуры боковых стенок не должны вызывать какой-либо тревоги: на третий год хранения ОЯТ (максимум разогрева) для всех отсеков с топливом прогнозируется температура на уровне 30 °С.

Динамика распределения температуры вдоль центральной линии верхней поверхности железобетонной конструкции в обеих моделях (НИГ и НЖ) представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что в поведении кривых имеются серьезные отличия, касающиеся как количественных показателей в разогреве, так и формы графиков.

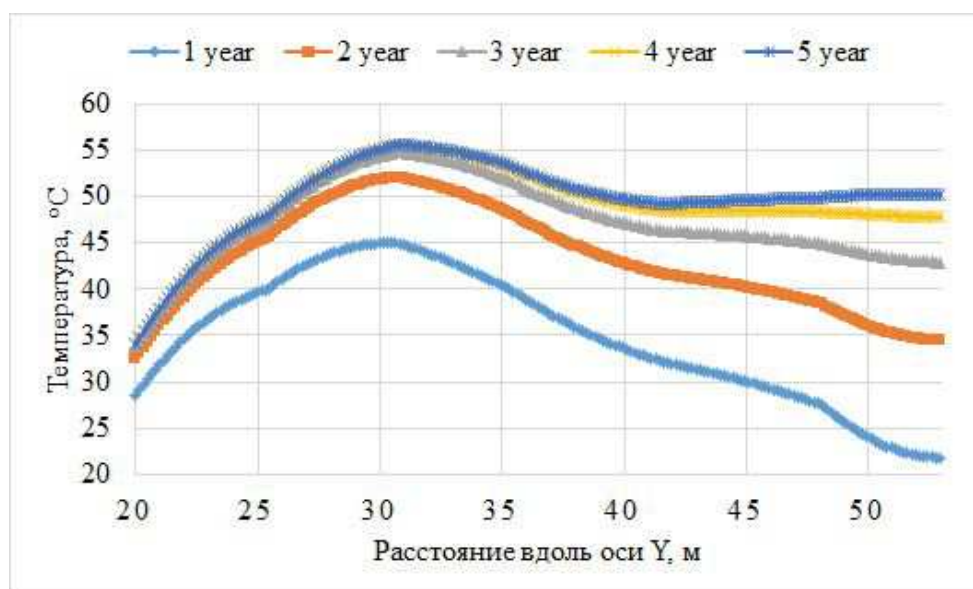
В модели НЖ показана локальная область (отсек с U-Zr топливом, координаты ~30–31 м вдоль оси Y) очевидного максимума, в которой температура постепенно увеличивается, достигая 56 °С через пять лет процесса эксплуатации объекта. Постепенно разогревается (при этом скорость нагрева снижается) и поверхность других отсеков, достигая значения примерно 51 °С на пятый год процесса хранения (отсек с U-Be топливом).



В прогнозе модели НИГ поведение кривых более сложное. Лишь на первый год хранения есть очевидный максимум (29 °С) с координатой ~32 м вдоль оси  $Y$ . Заметный прогрев поверхности (от 5 до 8 °С) отсеков с defect – U-Ве топливом прогнозируется на второй год хранения. В дальнейшем скорость нагрева поверхности снижается, достигая максимума 34 °С на четвертый год хранения ОЯТ. Далее наступает слабый процесс остывания.



а



б

Рис. 5. Динамика распределения температуры вдоль оси  $Y$  на поверхности железобетонной конструкции:  $a$  – модель НИГ;  $b$  – модель НЖ

Fig. 5. Dynamics of temperature distribution along the  $Y$  axis of the built-in concrete structure surface:  $a$  – "incompressible ideal gas" model;  $b$  – incompressible fluid model

В дополнение к анализу распределения температуры рассмотрен вопрос утечки тепла из области тепловыделений с течением времени. Использована опция программы, осуществляющая интегрирование физических параметров по границе либо объему. В данной ситуации интересен тепловой поток, Вт, покидающий наиболее напряженную в тепловом отношении область (отсек хранения с U-Zr ОЯТ). Анализ тепловых потоков через поперечные и продольные границы области тепловыделений показал, что доминирующими являются тепловые потоки через нижнее основание и верхнюю поверхность встроенной конструкции. Динамика указанных тепловых потоков для максимального и минимального значений расхода поступающего

воздуха представлена на рис. 6 (знак "минус" для теплового потока через основание встроенной конструкции обусловлен выбором направления вертикальной оси).

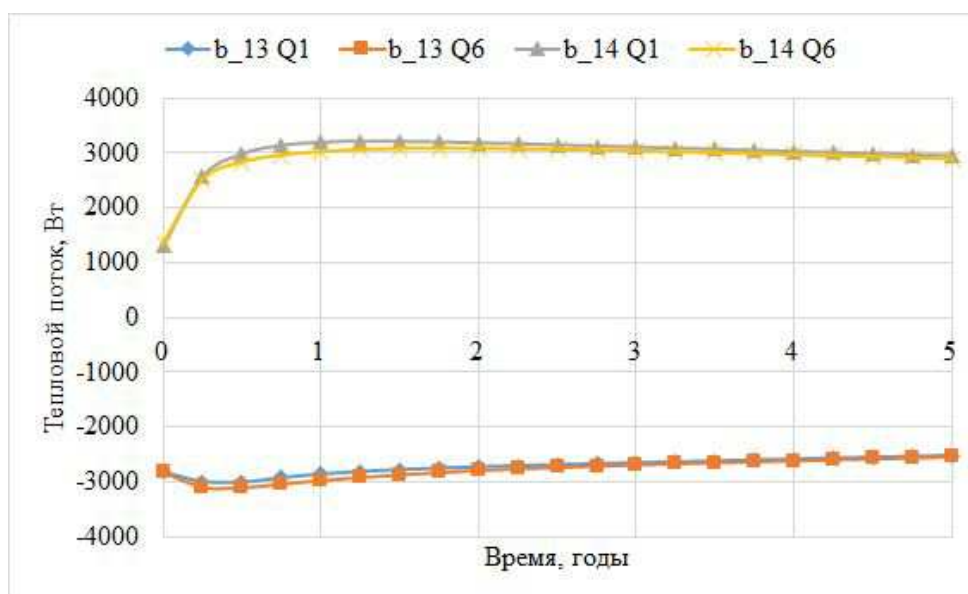


Рис. 6. Динамика тепловой мощности с верхней ( $b_{14}$ ) и нижней ( $b_{13}$ ) граней отсека хранения U-Zr облученного топлива:  $Q_6$  – расход минимальный;  $Q_1$  – расход максимальный  
Fig. 6. Dynamics of thermal power from the upper ( $b_{14}$ ) and lower ( $b_{13}$ ) faces of the U-Zr storage compartment of irradiated fuel:  $Q_6$  – minimum rate;  $Q_1$  – maximum rate

Анализ графических зависимостей показывает следующие особенности динамики тепловых потоков:

- доминирует тепловой поток в воздух;
- поток в массив выходит на максимум (по модулю) примерно через 0,3 года;
- нарастание потока в воздух более инертно, и требуется более одного года до выхода на максимум;
- при максимальном расходе (по сравнению с минимальным) тепловой поток в воздух увеличивается, а в массив – снижается.

## Заключение

В результате проведенного исследования:

– построены компьютерные модели подземного объекта долговременного хранения ОЯТ – встроенной железобетонной конструкции в трехмерной постановке для турбулентного режима движения воздуха в приближении несжимаемой жидкости и "несжимаемого идеального газа", учитывающего влияние силы тяжести. Для замыкания системы уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и неразрывности использована стандартная  $(k - \epsilon)$ -модель турбулентности;

– выполнен сравнительный анализ расчетных аэротермодинамических параметров в приближении "несжимаемого идеального газа" с результатами численных экспериментов в модели несжимаемой жидкости;

– продемонстрированы принципиальные отличия в структуре скоростных полей, прогнозируемых в объекте хранения на базе двух указанных моделей при вариации расхода поступающего воздуха, а также отличия в аэродинамике при вариации расхода воздуха для модели "несжимаемого идеального газа";

– выполнен анализ максимальных значений температуры в различных областях модели для рассмотренного диапазона значений расхода воздуха, подаваемого в объект; отмечены физические особенности влияния указанных параметров на максимальные температуры областей модели;

– определено, что кратность воздухообмена за один час на уровне 4,4 обеспечивает соблюдение критериальных значений температуры для материалов встроенной конструкции и минимум экономических затрат на организацию процесса проветривания модуля хранения. Нагрев поверхности встроенной конструкции выше критериального значения не прогнозируется;

– проанализирована динамика тепловых потоков, направленных в скальный массив через основание и с поверхности встроенной конструкции в воздушную среду для отсека с U-Zr топливом. Отмечено доминирование теплового потока с поверхности конструкции и различное время выхода на максимальное значение (по модулю) через основание и поверхность отсека.

В целях усовершенствования и уточнения модели предстоит обеспечить более эффективное использование пристеночных функций на границах раздела "воздух – вмещающий массив" и "воздух – встроенная конструкция", определяющих процессы теплообмена.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Библиографический список

- Алексеева Э. И., Гореликова Н. Н., Амосов П. В. Исследование тепловых режимов подземного объекта долговременного хранения ОЯТ на базе объемных компьютерных моделей // Проблемы Арктического региона : Труды 12-й междунар. науч. конф. студентов и аспирантов ; г. Мурманск, 15 мая 2012 г. Мурманск : ММБИ КНЦ РАН, 2013а. С. 80–85.
- Алексеева Э. И., Амосов П. В., Черников А. А. Влияние компоновки тепловыделяющих элементов на тепловой режим объекта хранения // Сб. трудов Кольского филиала ПетрГУ. Апатиты, 2013б. Вып. 6. С. 27–28.
- Амосов П. В. Прогноз теплового режима подземного объекта хранения тепловыделяющих материалов в условиях смешанной конвекции // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2020. № 3. С. 80–92. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.08>.
- Амосов П. В., Козырев С. А., Назарчук О. В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 44(70). С. 121–125. DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.44.121>
- Амосов П. В., Новожилова Н. В. Двухмерное численное моделирование аэротермодинамики атмосферы карьера // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, 13–15 октября 2014 г. : в 2 т. / Рос. акад. наук, Горный ин-т Кольского науч. центра РАН. Апатиты ; СПб., 2014. Т. 1. С. 153–159.
- Амосов П. В., Подшивалова А. В. Моделирование теплового режима подземного объекта хранения тепловыделяющих радиационно опасных материалов // Вестник МГТУ. 2010а. Т. 13, № 3. С. 562–566.
- Амосов П. В., Подшивалова А. В. Особенности теплового режима подземного объекта изоляции тепловыделяющих материалов (контейнерный вариант) // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010б. № 3. С. 133–140.
- Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1988. 197 с.
- Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений // СПб. : БГТУ, 2001. 108 с.
- Бирюлин Г. В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL FEMLAB. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. 305 с.
- Гарбарук А. В., Стрелец М. И., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений // СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
- Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. 77 с.
- Калинкин В. И., Крицкий В. Г., Токаренко А. И., Тихонов Н. С. [и др.]. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов : препринт. СПб. : ВНИПИЭТ, 2009. 122 с.
- Козлов Ю. В., Сафутин В. Д., Тихонов Н. С., Токаренко А. И. [и др.]. Длительное хранение и транспортирование отработавшего ядерного топлива // Атомная энергия. 2000. Т. 89, № 4. С. 273–284.
- Мельников Н. Н., Наумов В. А., Конухин В. П., Амосов П. В. [и др.]. Радиогеоэкологические аспекты безопасности подземного захоронения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива на Европейском Севере России. Апатиты : КНЦ РАН, 2001. 194 с.
- Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А., Амосов П. В. [и др.]. Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на Европейском Севере России. В 2 ч. Ч. II. Апатиты : КНЦ РАН, 2003. 209 с.
- Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А., Амосов П. В. [и др.]. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на Европейском Севере России. Апатиты : КНЦ РАН, 2010. 305 с.
- Наумов В. А., Гусак С. А. Изучение закономерностей образования источников тепла в хранилищах контейнерного типа для отработавшего ядерного топлива реакторов малой мощности // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 2(11). С. 105–115. DOI: [10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.105-115](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.105-115).
- Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
- Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М. : Недра, 1978. 390 с.
- Роди В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений / [Дж. Ламли и др.]. М. : Мир, 1984. С. 227–322.
- Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодяконова. М. : Недра, 1975. 279 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортмана. М. : Недра, 1984. 455 с.
- Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники : справочник. М. : Атомиздат, 1968. 484 с.
- Щеляев А. FlowVision – современный российский инструмент математического моделирования // САПР и графика. 2010. № 12(170). С. 43–48. URL: <https://sapr.ru/article/21879>.

## References

- Alekseeva, E. I., Gorelikova, N. N., Amosov, P. V. 2013a. Investigation of thermal conditions of an underground object for long-term SNF storage based on volumetric computer models. In coll. articles: *Problems of the Arctic region*. Proceedings of the 12th International Scientific Conference of Students and Postgraduates. Murmansk, 15 May, 2012. Murmansk, pp. 80–85. (In Russ.)
- Alekseeva, E. I., Amosov, P. V., Chernikov, A. A. 2013b. Influence of the layout of fuel elements on the thermal regime of the storage facility. In coll. articles KF PetrGU, 6. Apatity, pp. 27–28. (In Russ.)
- Amosov, P. V. 2020. Forecast of the thermal regime of an underground storage facility for heat-generating materials under mixed convection conditions. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 3, pp. 80–92. DOI: 10.26583/npe.2020.3.08. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Kozyrev, S. A., Nazarchuk, O. V. 2018. Development of a computer model of aerothermodynamics of the pit open atmosphere in ANSYS FLUENT. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 44(70), pp. 121–125. DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.44.121>. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Novozhilova, N. V. 2014. Two-dimensional numerical simulation of atmosphere aerothermodynamic of open pit. In coll. articles *Environmental strategy for the development of the mining industry – the formation of a new worldview in the development of natural resources*, Proc. of the All Russian Sci. Tech. Conf., 13–15 October, 2014. In 2 parts. Apatity, part 1, pp. 153–159. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Podshivalova, A. V. 2010a. Modeling of the thermal regime of an underground storage facility for heat-emitting radiation hazardous materials. *Vestnik of MSTU*, 13(3), pp. 562–566. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Podshivalova, A. V. 2010b. Features of the thermal regime of an underground object of insulation of heat generating materials (container version). *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 3, pp. 133–140. (In Russ.)
- Baklanov, A. A. 1987. Numerical modeling in mine aerology. Apatity. (In Russ.)
- Belov, I. A., Isaev, S. A. 2001. Modeling of turbulent flows. St. Petersburg. (In Russ.)
- Biryulin, G. V. 2006. Thermophysical calculations in the COMSOL FEMLAB finite element package. St. Petersburg. (In Russ.)
- Garbaruk, A. V., Strelets, M. I., Shur, M. L. 2012. Simulation of turbulence in complex flows' calculations. St. Petersburg. (In Russ.)
- Egorov, V. I. 2006. Application of computers for solving problems of thermal conductivity. St. Petersburg. (In Russ.)
- Kalinkin, V. I., Kritskij, V. G., Tokarenko, A. I., Tikhonov, N. S. et al. 2009. Storage of spent nuclear fuel of power reactors: Preprint. St. Petersburg. (In Russ.)
- Kozlov, Yu. V., Saphutin, V. D., Tikhonov, N. S., Tokarenko, A. I. et al. 2000. Long-term storage and transportation of spent fuel. *Atomic Energy*, 84(4), pp. 284–293. (In Russ.)
- Melnikov, N. N., Naumov, V. A., Konukhin, V. P., Amosov, P. V. et al. 2001. Radiobiological aspects of safety of underground disposal of radioactive waste and spent fuel in the European North of Russia. Apatity. (In Russ.)
- Melnikov, N. N., Konukhin, V. P., Naumov, V. A., Amosov, P. V. et al. 2003. Spent fuel from ship nuclear power units in the European North of Russia. In 2 parts. Part II. Apatity. (In Russ.)
- Melnikov, N. N., Konukhin, V. P., Naumov, V. A., Amosov, P. V. et al. 2010. Scientific and engineering aspects of safe storage and disposal of radiation hazardous materials in the European North of Russia. Apatity. (In Russ.)
- Naumov, V. A., Gusak, S. A. 2019. A study on formation regularities of heat sources in the cask type storage facilities for spent nuclear fuel of the low-power reactors. *Herald of Kola Science Centre of RAS*, 2(11), pp. 105–115. DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.105-115>. (In Russ.)
- Patankar, S. 1984. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. Moscow. (In Russ.)
- Rzhevskij, V. V., Novik, G. Ya. 1978. Fundamentals of rock physics. Moscow. (In Russ.)
- Rodi, W. 1984. Turbulence models of the environment. In *Methods for calculating turbulent flows*. Ed. Dzh. Lamli et al. Moscow, pp. 227–322. (In Russ.)
- Handbook (Cadastre) of physical properties of rocks. 1975. Eds. N. V. Melnikov et al. Moscow. (In Russ.)
- Physical properties of rocks and minerals (Petrophysics). Handbook of Geophysics. 1984. Ed. N. B. Dortman. Moscow. (In Russ.)
- Chirkin, V. S. 1968. Thermophysical properties of nuclear engineering materials. Moscow. (In Russ.)
- Schelyaev, A. FlowVision – modern Russian mathematical modeling tool. 2010. *CAD and graphics*, 12(170), pp. 43–48. URL: <https://sapr.ru/article/21879>. (In Russ.)

## Сведения об авторе

**Амосов Павел Васильевич** – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [p.amosov@ksc.ru](mailto:p.amosov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

**Pavel V. Amosov** – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher; e-mail: [p.amosov@ksc.ru](mailto:p.amosov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>