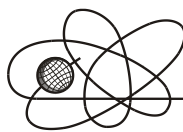




*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**ИБРАЭ**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2018-07

Preprint IBRAE-2018-07

**Р. А. Бутов, Н. И. Дробышевский, Е. В. Моисеенко, Ю. Н. Токарев**

**ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЁТНОГО КОДА FENIA  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО  
СОСТОЯНИЯ ПУНКТА ГЛУБИННОГО  
ЗАХОРОНЕНИЯ РАО**

**Бутов Р. А., Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Токарев Ю. Н. ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЁТНОГО КОДА FENIA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО. Препринт ИБРАЭ № 2018-07. Москва: ИБРАЭ РАН, 2018. — 27 с. — Библиогр.: 20 назв. — 77 экз.**

Аннотация

Работа посвящена одному из аспектов обоснования долговременной безопасности проекта пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в Российской Федерации — моделированию его теплового состояния. Представлен разрабатываемый авторами расчетный код FENIA и результаты численного моделирования трёхмерного поля температур непосредственно в ПГЗРО и вмещающих горных породах. В коде решается трёхмерное нестационарное неоднородное уравнение теплопроводности с использованием конечноэлементного подхода. В дальнейшем в рамках того же подхода будет реализовано сопряжение с механическими и гидравлическими моделями, что позволит получить полностью сопряжённый тепло-гидро-механический расчётный код

©ИБРАЭ РАН, 2018

**Butov R. A., Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N. APPLICATION OF FENIA CODE FOR MODELLING OF DEEP GEOLOGICAL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY THERMAL STATE. Preprint IBRAE-2018-07 — Moscow: Nuclear Safety Institute, 2018 — 27 p. — Bibliogr: 20 items.**

Abstract

One of the aspects of long-term safety demonstration for deep geological radioactive waste repository project in Russian Federation — thermal state modeling — is studied in the paper. The computer code FENIA developed by the authors and the numerical simulation results for 3D temperature field inside the repository and in the host rock are presented. 3D non-stationary non-homogeneous heat transfer equation is solved in the code by use of finite-element approach. Further within the scope of this approach coupling with mechanical and hydraulic models will be implemented resulting in fully coupled thermal-hydro-mechanical (THM) code.

©Nuclear Safety Institute, 2018

# Применение расчётного кода FENIA для моделирования теплового состояния пункта глубинного захоронения РАО

*Р. А. Бутов, Н. И. Дробышевский, Е. В. Моисеенко, Ю. Н. Токарев*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: +7(495) 955-23-71, электронная почта: moi@ibrae.ac.ru

## 1 Введение

В настоящее время в России реализуется масштабный проект по созданию подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для решения вопросов, связанных с долговременной безопасностью глубинного захоронения тепловыделяющих высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов (РАО), и отработки соответствующих технологий [1]. ПИЛ может стать первым этапом создания будущего пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО), если исследования покажут пригодность выбранного участка для захоронения и работоспособность выбранной концепции безопасности.

Проекты ПГЗРО разной степени проработанности имеются в Финляндии, Швеции, США, Бельгии, Франции и ряде других стран [2].

ПГЗРО должны обеспечивать условия, в которых инженерные защитные барьеры, препятствующие выходу радионуклидов в окружающую среду, — бидоны, пеналы и контейнеры — сохраняют целостность в течение как можно более длительного времени, по крайней мере, несколько сотен лет. Кроме того, после нарушения целостности инженерных барьеров безопасности степень миграции нуклидов должна быть минимальной. Это накладывает целый ряд требований на выбор места строительства ПГЗРО с геологической точки зрения. В первую очередь, участок должен быть сейсмически стабильным. Кроме того, вмещающие горные породы должны иметь малую подвижность, высокую прочность, низкую водопроницаемость. Последнее требование важно как с точки зрения коррозионной стойкости защитных барьеров, так и с точки зрения транспорта радионуклидов.

РАО, о которых идет речь, обладают высоким тепловыделением, что приводит к необходимости эффективного отвода тепла от ПГЗРО, поскольку при высоких температурах снижается коррозионная стойкость защитных барьеров, и ухудшаются их прочностные характеристики. Вследствие этого обеспечение приемлемого теплового режима становится одной из основных задач при проектировании ПГЗРО. Геометрия выработок и стратегия их загрузки должны быть спланированы таким образом, чтобы пространственное распределение выделяемого тепла было оптимальным с точки зрения количества и активности захораниваемых материалов, с одной стороны, и поддержания приемлемого теплового режима — с другой. При этом при проектировании ПГЗРО требуется учитывать ещё целый ряд факторов, включая техническую возможность горнопроходческих работ и экономическую эффективность строительства.

В разных странах используются разные подходы к организации ПГЗРО как с точки зрения вмещающих горных пород, так и с точки зрения геометрии пункта захоронения [3]. Например, в бельгийском и французском проектах предполагается использование горизонтальных тоннелей захоронения, заполняемых непосредственно контейнерами с ВАО или ОЯТ. В проекте KBS-3, принятом в Швеции и в Финляндии, контейнеры располагаются в вертикальных скважинах, пробуренных в полу тоннелей с некоторым шагом. При этом в каждой скважине располагается один контейнер. Выбор геометрии связан как с техническими решениями, применяемыми при строительстве пункта захоронения и перемещении контейнеров с ВАО и ОЯТ, так и со свойствами вмещающих пород. Захоронение непосредственно в горизонтальных тоннелях позволяет строить тоннели малого сечения — ненамного превышающего размер контейнера. Но при этом усложняется перемещение контейнеров в тоннеле и заполнение пространства между стенкой тоннеля и контейнером засыпкой. Вследствие этого, как правило, такой подход применяется при расположении ПГЗРО во вмещающих породах, обладающих выраженной пластичностью, таких как глины. При этом даже при не слишком плотном заполнении пространства засыпкой надёжный тепловой контакт между контейнерами и вмещающей породой достигается вследствие осадения последней. С другой стороны, это может усложнить моделирование механических процессов, так как потребуются учитывать не только временную эволюцию давления на контейнеры со стороны бентонитовой засыпки, но и рост давления вмещающих пород. Если в качестве вмещающих пород выбираются менее пластичные, такие как граниты или гнейсы, требуется обеспечить качественное заполнение пустот, и в этом слу-

чае контейнеры захораниваются в вертикальных скважинах. Также в качестве вмещающей породы рассматриваются подземные соляные пласты [2].

В России для сооружения ПИЛ выбрана площадка в Красноярском крае, в Нижнеканском массиве горных пород, состоящем, в основном, из гранитов, диоритов и гнейсов. Одна из тестируемых концепций (рис. 1.1) предполагает размещение в каждой скважине нескольких контейнеров, выполненных из стали, бентонита и алюминатного бетона. Контейнер содержит пенал с тремя бидонами, в которых находятся остеклованные отходы. Пространство между контейнером и стенками скважины заполняется тиксотропным шликером. Таким образом, инженерные барьеры безопасности включают: матрицу, бидоны, пеналы, ИК и шликер.

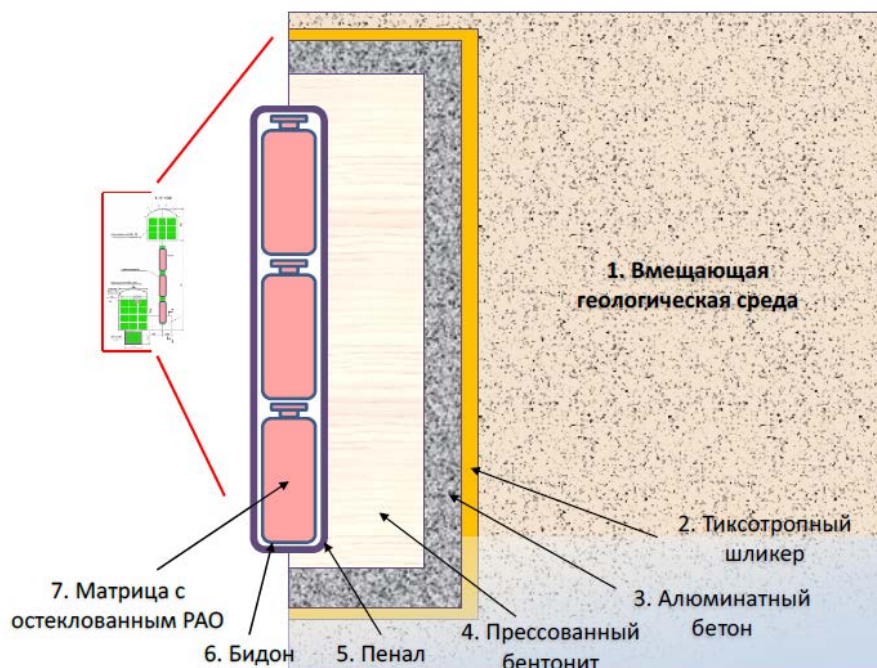


Рисунок 1.1 — Тестируемый подход к захоронению

Площадка для захоронения выбрана таким образом, чтобы она полностью располагалась в монолитном тектоническом блоке. Массив в целом характеризуется стабильным тектоническим режимом, скорости тектонических движений в настоящее время не превышают 0,05 мм/год.

В ПИЛ будет проводиться широкий спектр исследований, включая исследование вмещающих пород, отработку технологий проведения и контроля горнопроходческих работ, изучение эволюции вмещающих пород и инженерных барьеров при механическом и тепловом воздействии. В частности, будет проводиться отбор проб горных пород и подземных вод для определения их физико-химических и механических свойств, в том числе для пород, нарушенных в процессе проведения проходческих работ; натурные измерения характеристик горных пород; изучение свойств инженерных барьеров и т. д. Будут также проводиться крупномасштабные эксперименты для изучения состояния захораниваемых материалов, барьеров безопасности и горных пород в режимах, близких к тем, которые будут реализовываться в будущем ПГЗРО.

## 2 Общая характеристика процессов, влияющих на прочностные свойства барьеров безопасности

ПГЗРО является сложной инженерной системой, в которой проходят разнообразные процессы, связанные с переносом массы и энергии в барьерах, обеспечивающих безопасность захоронения. Рассмотрим те из них, которые непосредственно влияют на прочностные характеристики инженерных барьеров, определяя тем самым время их функционирования. Среди основных видов воздействия можно выделить:

- тепловое воздействие вследствие тепловыделения в РАО;
- механическое воздействие со стороны окружающих горных пород и других материалов (бентонита);
- химическое воздействие со стороны окружающих горных пород и строительных материалов;
- радиационное воздействие со стороны РАО.

Каждый из этих видов воздействий соответствует целой группе процессов и, как следствие, может описываться набором моделей. Между различными составляющими процессами и описывающими их моделями могут существовать различные однонаправленные и взаимонаправленные связи, как синхронные, так и асинхронные. Однонаправленными считаются связи, когда результаты одних процессов влияют на протекание других, а обратное влияние отсутствует или им можно в большинстве практических случаев пренебречь. Когда же процессы являются взаимозависимыми, ситуация становится более сложной. Здесь при численном моделировании можно выделить два случая. Иногда для моделирования взаимного влияния можно использовать решение, полученное на предыдущем шаге (явная схема интеграции), т.е. задачи решаются независимо, и необходимые данные из других моделей берутся с отставанием на шаг по времени. Такие связи можно считать асинхронными, то есть, не требующими одновременного моделирования связанных процессов. При синхронных связях от нескольких моделей требуются данные на текущем шаге по времени, поэтому здесь потребуются итерации на каждом временном шаге для сопряжения данных.

Например, радиационное воздействие на материалы и горные породы может рассчитываться отдельно и использоваться в теплофизических и термомеханических расчётах в качестве начальных и граничных условий, так как состояние окружения практически не оказывает влияния на радиационные свойства РАО. В то же время термодинамическое, механическое и химическое состояния рассматриваемой системы оказывают значительное влияние друг на друга, что требует более высокую степень сопряжения моделей. Так, температурное поле влияет на термомеханические и химические свойства среды. В свою очередь химическое состояние среды определяет её теплофизические свойства, такие как теплоёмкость и теплопроводность, и механические свойства горных пород. Также химическое состояние окружающих пород оказывает влияние на механическую прочность барьеров вследствие их коррозии. Термомеханические же процессы влияют на теплофизические свойства среды, так как дефекты в горных породах и материалах снижают их теплопроводность. Схематически взаимное влияние основных групп процессов показано на рис. 2.1.

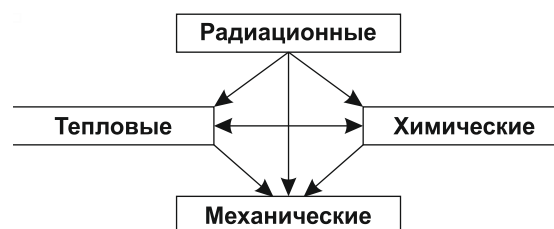


Рисунок 2.1 — Схематическое представление взаимного влияния основных групп процессов

### 3 Обзор используемого для моделирования термомеханических процессов в пунктах глубинного захоронения программного обеспечения

Можно выделить два основных подхода к выбору расчётных средств для моделирования процессов в ПГЗРО: использование, возможно, с некоторой доработкой, готовых программных продуктов и создание своих программ. Рассмотрим основные существующие программные средства и их характеристики, влияющие на возможность использования при моделировании теплового состояния глубинных захоронений РАО. Поскольку в дальнейшем наряду с тепловыми расчётами будут проводиться и расчёты напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкций пунктов захоронения, в том числе сопряжённые с тепловыми, будут рассматриваться программы, позволяющие проводить оба эти типа расчётов. Отметим, что некоторые из этих программ имеют более богатую функциональность, например, включают математические модели, описывающие химические или гидравлические процессы, но рассмотрение таких возможностей выходит за рамки этой работы.

Готовое программное обеспечение можно разделить на две категории: коммерческое и свободно распространяемое. Среди коммерческих программ известен целый ряд расчётных кодов общего назначения, таких как, например, ANSYS [4], NASTRAN [5], ABAQUS [6], позволяющих решать самые разнообразные задачи теплопроводности и механики деформируемого тела. Это хорошо верифицированные продукты, использующие многие современные достижения вычислительной математики. Тем не менее, поскольку они нацелены на решение широкого круга задач, их применение для решения узкоспециальных проблем может быть затруднено или малоэффективно. Так, например, ANSYS не обладает возможностями для качественного учета контактных деформируемых поверхностей и не очень хорошо подходит для решения нелинейных задач с большими перемещениями. Конечно, такие продукты поддерживают добавление пользовательских функций, но возможности этих функций ограничены и далеко не все задачи с их помощью возможно эффективно решить.

Существуют также более специализированные программные средства, предназначенные для моделирования процессов в конкретных средах или системах. Например, семейство кодов PLAXIS [7] нацелено на решение задач, связанных с исследованием процессов в грунтах. Расчётный код COMSOL Multiphysics [8] имеет подключаемый модуль геомеханики для решения геотехнических задач, таких как строительство туннелей, разработка грунта, обеспечение устойчивости склонов и т. д. Itasca Consulting Group разрабатывает целое семейство кодов для моделирования геомеханических процессов [9]. Это, например, FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) и FLACxFlo, проприетарная программа для моделирования почв, горной породы, течений воды в породах, включающая 19 механических моделей материала, и код 3DEC для трёхмерного моделирования процессов в блочных и разрывных средах. Существует также его двумерная версия UDEC.

Среди свободно распространяемых продуктов можно указать, например, расчётный код Code\_Aster [10], разрабатываемый Électricité de France. Программные средства такого рода, обладая, в целом, теми же преимуществами, что и коммерческие, имеют большой потенциал для узкоспециального применения, благодаря открытому исходному коду.

Основной проблемой готовых решений с точки зрения их применения для моделирования процессов в подземных пунктах захоронения РАО является трудность их адаптации для реализации моделей, специфичных для ПГЗРО. Это, например, изменение свойств материалов (теплофизических и механических) по мере старения материала и химического и радиационного воздействия; набухание бентонита, причем набухание бентонита приводит не только к появлению значительного давления, но и к выталкиванию бентонита в трещины и пустоты, следовательно, потребуется учет контактного взаимодействия. Еще одним препятствием в использовании сторонних коммерческих кодов будет организация взаимодействия с другими программными комплексами. Даже организация последовательного взаимодействия через дисковые файлы представляет собой достаточно сложную задачу вследствие разных форматов входных и выходных файлов и особенностей работы с ними. Взаимное же влияние процессов, моделируемых разными сторонними программами, таким образом реализовать практически невозможно.

Программные средства с открытым исходным кодом в этом отношении имеют больше возможностей для адаптации, но в этом случае пользователь фактически становится разработчиком. С учётом необходимости при этом изучать архитектуру и особенности реализации программы, преимущества использования стороннего программного средства практически нивелируются.

Таким образом, применение сторонних расчётных кодов является оправданным для решения «стандартных» задач, таких как напряжённо-деформированное состояния камеры захоронения под напряжениями окружающей породы, а также для проведения поддерживающих расчётов и кросс-верификации. Для проведения основной массы расчётов более эффективным представляется создание собственного расчётного средства, учитывающего множество моделируемых процессов, а также особенности геометрии пункта захоронения и вмещающих пород.

Такой подход используется и западными организациями, занимающимися моделированием тепловых, механических и гидравлических процессов в ПИЛ. Для расчётов, связанных с отдельными процессами, как правило, используются коды общего назначения, такие как ABAQUS или COMSOL Multiphysics, а для учета специфических явлений, характерных для задач моделирования подземных захоронений РАО, и сопряжения моделей разрабатываются специальные коды. В качестве примера можно привести подход к учету набухания бентонита. Для подобных исследований используется совместное решение уравнений теплопередачи, движения жидкости в пористой среде и расчета НДС (coupled thermo-hydro-mechanical, ТНМ). Для реализации моделей бентонита разрабатывается ряд кодов, часть из которых разрабатывается совместно. Так, наиболее широко используемый код для ТНМ расчетов в геологических средах Code\_Bright [11] разрабатывается в Испании целым рядом участников. В части расчета НДС в нём реализованы упругие, нелинейно упругие, вязкопластические для соли, зернистых материалов, ненасыщенной почвы (основаны на BBM моделях — Barcelona Basic Model), термоупругие для почв, упругие с поврежденностью для глинистых пород, BBM, CASM (Clay And Sand Model) модели. Ещё одним примером расчётного средства, разрабатываемого группой участников, является Свободная программа OpenGeoSys для моделирования ТНМС (thermo-hydro-mechanical-chemical) процессов в пористых и трещиноватых средах [12].

При этом собственные коды разрабатываются и отдельными организациями. Среди них можно указать следующие примеры:

- TOUGH (Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat), проприетарная программа для расчета гидродинамических задач, разработанная в Lawrence Berkeley National Laboratory, США;
- THAMES, проприетарный код для расчета ТНМ процессов в условиях ПГЗРО, разработанный JAEA (Japan Atomic Energy Agency).

## 4 Расчётный код FENIA

Для моделирования тепловых процессов в рамках исследований в российской ПИЛ разработан расчётный код FENIA (Finite Element Nonlinear Incremental Analysis). В расчётном коде методом конечных элементов решается трёхмерное нестационарное неоднородное уравнение теплопроводности:

$$\rho(t, X)c(t, T, X) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij}(t, T, X) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = q(t, X), \quad i, j = 1 \dots 3, \quad X = (x_1, x_2, x_3), \quad (4.1)$$

где  $\rho$  — плотность,  $t$  — временная координата,  $X$  — вектор пространственных координат,  $c$  — теплоемкость,  $T$  — температура,  $\lambda$  — тензор теплопроводности,  $q$  — источник тепла. Расчётные сетки, как правило, состоят из тетраэдрических или гексаэдрических элементов, но, вообще говоря, могут использоваться произвольные выпуклые конечные элементы. При решении могут использоваться функции формы конечных элементов первого и второго порядка.

В уравнении (4.1) зависимость теплоемкости и теплопроводности материалов от температуры может быть задана как из базы данных материалов, так и с помощью пользовательского ввода. Изменение плотности в зависимости от температуры, как предполагается, будет незначительным с точки зрения тепловых задач.

Тензор теплопроводности  $\lambda$  определяется целым рядом теплофизических процессов. При совместном влиянии нескольких механизмов теплопередачи тензор  $\lambda$  принимается равным сумме тензоров теплопроводности  $\lambda_i$  для отдельных механизмов:

$$\lambda = \sum \lambda_i. \quad (4.2)$$

В тензоре теплопроводности учитываются слагаемые, соответствующие следующим способам теплопередачи: молекулярной теплопроводности  $\lambda_{\text{мол}}$ ; конвекции воздуха и воды в проходках  $\lambda_{\text{конв}}$ ; массопереносу воды и пара в засыпке и горных породах  $\lambda_{\text{вод}}$ . То есть, тензор теплопроводности имеет вид:  $\lambda = \lambda_{\text{мол}} + \lambda_{\text{конв}} + \lambda_{\text{вод}}$ , при этом по крайней мере одно из слагаемых  $\lambda_{\text{конв}}$  и  $\lambda_{\text{вод}}$  в каждой точке пространства является нулевым.

При моделировании многокомпонентных сред, таких как водосодержащие горные породы и бентонит, молекулярная теплопроводность  $\lambda_{\text{мол}}$  среды рассчитывается как средневзвешенное теплопроводностей  $\lambda_{\text{мол},i}$  отдельных материалов:

$$\lambda_{\text{мол}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \lambda_{\text{мол},i}, \quad (4.3)$$

где  $\mu_i$  — массовая доля  $i$ -й составляющей смеси,  $n$  — количество составляющих. Такое приближение применимо, если теплопроводности составляющих имеют близкие значения, что выполняется для объектов, моделируемых как смеси, например, бентонитово-цементная засыпка контейнеров.

Для многокомпонентных сред удельная теплоёмкость  $c$  в уравнении (4.1) может быть вычислена через парциальные плотности  $\rho_i'$  и теплоёмкости  $c_i$  составляющих смеси:

$$c = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n \rho_i' c_i, \quad \rho = \sum_{i=1}^n \rho_i', \quad (4.4)$$

где  $n$  — количество составляющих смеси. В температурной зависимости удельной теплопроводности  $c(T)$  могут быть учтены источники и стоки тепла, связанные с фазовыми превращениями или химическими реакциями. При функционировании ПГЗРО не предполагаются температуры, при которых может происходить плавление материалов, поэтому настоящая модель не учитывает связанные с ним явления, такие как скрытая теплота фазового перехода, изменение плотности, конвекция в расплаве. При необходимости модель может быть расширена для учёта этих явлений. Следует отметить, что для многокомпонентных сред не может быть выделена температура плавления, вместо неё существует интервал температур, в котором состояние среды изменяется от полностью твердого (температура солидус) до полностью жидкого (температура ликвидус). Температурная зависимость теплоёмкости и теплопроводности смеси в этом интервале зависит от её состава.

С помощью кода FENIA предполагается моделирование объектов разного размера. Самыми мелкими из них будут небольшие экспериментальные установки либо отдельные бидоны с РАО, самыми крупными — ПГЗРО в целом вместе с окружающими горными породами. Таким образом, характерный размер моделируемой области составляет от десятков сантиметров до сотен метров.

На границе расчётной области могут устанавливаться условия первого, второго, третьего рода, а также описывающие переизлучение в полости и излучение во внешнюю среду. Также может использоваться комбинация граничных условий разного рода.

## 5 Верификация кода FENIA

Была проведена верификация расчётного кода FENIA на ряде аналитических задач распространения тепла в средах. Приведём результаты для двух задач, наиболее близких к условиям в ПГЗРО. Основным источником тепла в пункте глубинного захоронения будет остаточное тепловыделение РАО. Это тепловыделение сосредоточено в цилиндрических матрицах с РАО, имеющих характерный размер порядка 1 м. Матрицы упаковываются в пеналы, а затем в изолирующие контейнеры (ИК) по 3 штуки в каждом. ИК в свою очередь размещаются в скважинах глубиной несколько десятков метров. Таким образом, одиночный ИК без «соседей» можно приближённо считать точечным источником тепла, а скважину, заполненную ИК, — протяжённым линейным источником. Мощность остаточного тепловыделения РАО уменьшается со временем по закону, который можно приближённо считать экспоненциальным, то есть задача расчёта теплового режима захоронения является нестационарной. В расчётном коде FENIA имеется возможность задавать объёмное тепловыделение в отдельных подобластях, причём мощность тепловыделения может меняться во времени по заданному закону.

Для верификации кода FENIA были выбраны задачи, имеющие аналитические решения и отвечающие условиям распространения тепла в ПГЗРО, а именно задачи распространения тепла в однородной изотропной среде с источником, имеющим экспоненциально уменьшающуюся со временем мощность. Рассмотрены случаи бесконечного линейного и точечного источников. Случай анизотропной однородной среды легко сводится к изотропному преобразованием координат, поэтому здесь не рассматривается, чтобы не усложнять выкладки.

Запишем нестационарное уравнение теплопроводности для изотропной среды с постоянными физическими свойствами в  $n$ -мерном пространстве  $R^n$  с начальным условием в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} - a^2 \Delta T &= q(t, \mathbf{x}), \\ T|_{t=0} &= T_0(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Здесь  $T$  — температура,  $t$  — время,  $a^2$  — температуропроводность,

$$a^2 = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (5.2)$$

$\lambda$  — теплопроводность среды,  $\rho$  — её плотность,  $c$  — теплоемкость,  $\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$  — оператор Лапласа,

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  — вектор пространственных координат,

$$q(t, \mathbf{x}) = \frac{Q(t, \mathbf{x})}{\rho c}, \quad (5.3)$$

$Q(t, \mathbf{x})$  — мощность тепловыделения. Решение уравнения (5.1) даётся в общем случае выражением [13]:

$$T(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{R^n} \frac{q(s, \xi)}{[2a\sqrt{\pi(t-s)}]^n} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}-\xi|^2}{4a^2(t-s)}\right) d\xi ds + \frac{1}{[2a\sqrt{\pi t}]^n} \int_{R^n} T_0(\xi) \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}-\xi|^2}{4a^2 t}\right) d\xi \quad (5.4)$$

где  $s$  — временная координата под знаком интеграла,  $\xi$  — пространственная координата. В случае однородного начального условия  $T_0(\mathbf{x}) = T_0 = const$  уравнение (5.1) с помощью замены

$$T(\mathbf{x}, t) = u(\mathbf{x}, t) + T_0 \quad (5.5)$$

сводится к уравнению с нулевым начальным условием:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \Delta u &= q(t, \mathbf{x}), \\ u|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$



Решение этого уравнения будет определяться только первым слагаемым правой части (5.4):

$$u(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{R^n} \frac{q(s, \xi)}{\left[2a\sqrt{\pi(t-s)}\right]^n} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}-\xi|^2}{4a^2(t-s)}\right) d\xi ds \quad (5.7)$$

Используем далее выражение (5.7) для верификация расчётного кода FENIA на задачах с экспоненциальным уменьшением мощности источника тепла.

## 5.1 Линейный экспоненциально затухающий источник

### 5.1.1 Аналитическое решение

В случае линейного экспоненциально затухающего источника, сосредоточенного на бесконечной прямой линии, тепло распространяется в 2-х мерном пространстве ( $n = 2$ ), нормальном к этой линии. Используем для наглядности в этом пространстве координаты  $(x, y)$ . Правая часть уравнения (5.6) при этом принимает вид:

$$q(t, x, y) = q_0 \exp(-pt) \delta(x) \delta(y), \quad (5.8)$$

где  $q_0$  — значение линейной плотности тепловыделения в нулевой момент времени,  $\delta$  — дельта-функция Римана, коэффициент  $p$  определяет скорость спада тепловыделения. Подстановкой (5.8) в (5.7) получим выражение для температуры в заданной точке пространства в момент времени  $t$ :

$$u(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \frac{q_0 \exp(-ps)}{\left[2a\sqrt{\pi(t-s)}\right]^2} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}|^2}{4a^2(t-s)}\right) ds. \quad (5.9)$$

В работе [14] получено аналитическое выражение для этого интеграла:

$$u(\mathbf{x}, t) = \frac{q \exp(-pt)}{4\pi a^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(pt)^n}{n!} E_{n+1}\left(\frac{r^2}{4a^2 t}\right), \quad (5.10)$$

где

$$r = |\mathbf{x}|, \quad (5.11)$$

$$E_n(x) = \int_1^{\infty} \frac{\exp(-xs)}{s^n} ds. \quad (5.12)$$

Интеграл (5.12) является специальной функцией и может быть получен численно при помощи какой-либо из специализированных математических библиотек.

### 5.1.2 Входные данные для расчёта

Для верификационного расчёта в качестве параметров уравнения теплопроводности были взяты значения, приведённые в таблице 5.1.1, характерные для вмещающих пород Нижнеканского массива [15]. Таким образом, значение температуропроводности  $a^2$  согласно (5.2) составило  $1,28 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Значение параметра  $q_0$  в (5.8) было принято равным 303,57 Вт/м, параметра  $p$  — равным 1/40 лет, что примерно соответствует характеристикам, предполагаемым для захораниваемых в Нижнеканском массиве РАО.

**Таблица 5.1.1 — Значения характеристик среды, принятые в расчёте**

Параметр	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2700
Удельная теплопроводность, Вт/м*°С	2,91
Удельная теплоемкость, Дж/кг*°С	840
Начальная температура среды, °С	9

### 5.1.3 Результаты расчётов

Задача является осесимметричной, в численном решении предполагалось, что объемное тепловыделение задано в области, непосредственно примыкающей к линии  $z = 0$ . Численное решение находилось посредством программы FENIA на гексаэдрических и тетраэдрических сетках разного уровня подробности с функциями формы первого и второго порядка.

### Сетка из гексаэдров

Использовалась структурированная сетка с ячейками, расширяющимися от оси симметрии ( $z = 0$ ), являющейся линией тепловыделения, к периферии. Для проверки сеточной сходимости использовались три сетки с различным количеством интервалов разбиений по координатам  $x$  и  $y$ : 10, 20 и 40 ячеек. Здесь представлены результаты, полученные на сетке с разбиением на 20 ячеек по каждой стороне. Эта сетка приведена на рис. 5.1. На верхней и нижней граничных поверхностях задавался нулевой поток тепла, что соответствует отсутствию изменения температуры по координате  $z$ . Для упрощения сеточного разбиения рассматривалась только 1/4 часть всей области. На плоскостях симметрии ( $x = 0$  и  $y = 0$ ) использовалось условие отсутствия теплового потока, на внешней граничной поверхности температура считалась неизменной и равной начальной температуре окружающей среды  $9^\circ\text{C}$ . Размеры области по осям  $x$  и  $y$  выбраны достаточно большими (150 м), чтобы убрать влияние внешней границы (моделируются условия на бесконечности). При меньших размерах расчетной области появляется некоторое влияние конечности области на значения вычисляемой температуры.

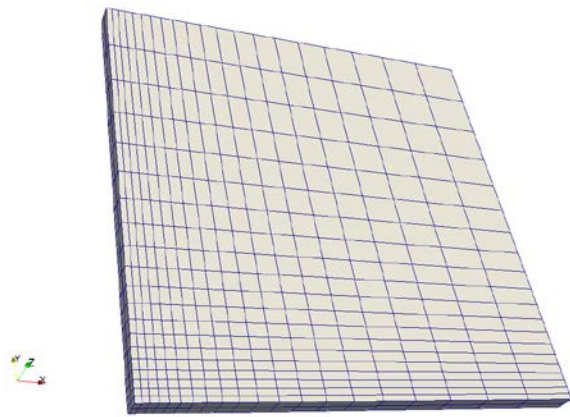


Рисунок 5.1 — Расчётная сетка из гексаэдров для задачи с линейным источником тепла

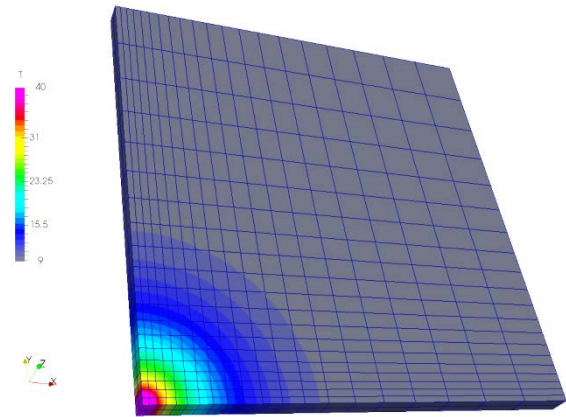


Рисунок 5.2 — Распределение температуры через 5000 суток для гексаэдрической сетки

Объемное тепловыделение задавалось в конечных элементах (КЭ), непосредственно примыкающих к оси симметрии ( $z = 0$ ), здесь объёмная плотность тепловыделения  $q_v$  составляла

$$q_v = \frac{lq_0}{4\nu n}, \quad (5.13)$$

где  $l$  — высота расчётной области,  $\nu$  — объём одного КЭ,  $n$  — количество слоёв разбиения по оси  $z$ . Поскольку по высоте разбиение было равномерным, объёмы всех прилегающих к оси симметрии КЭ равны между собой. Тем самым приближенно моделируется тепловыделение вдоль прямой. Коэффициент 4 в знаменателе связан с тем, что в расчёте рассматривалась 1/4 часть области. В остальных КЭ тепловыделение бралось нулевым. Высота расчётной области  $l$  бралась равной 10 м.

Распределение температуры через 5000 суток (13,7 лет) показано на рис. 5.2. В это время значения температуры в объёме близки к максимальным. Полученное распределение температуры очевидным образом является осесимметричным. На рис. 5.3 показано сравнение расчётных зависимостей температуры от времени в нескольких точках, находящихся на разном расстоянии  $r$  от оси, с аналитическими, полученными из выражения (5.10). Следует отметить, что при  $r = 0$  аналитическое решение имеет особую точку, при приближении к которой оно стремится к бесконечности. С этим связано некоторое различие расчётного и аналитического решений в точке  $r = 2$  м.

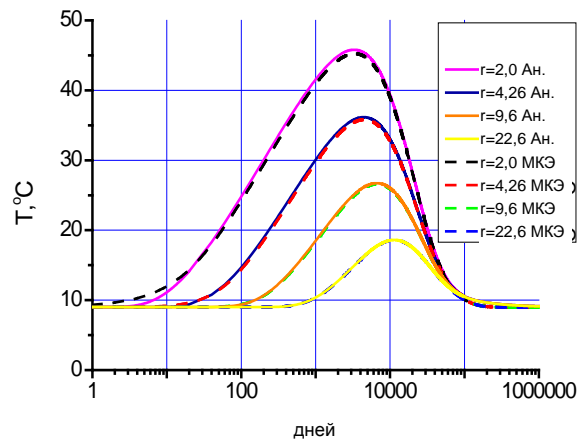


Рисунок 5.3 — Сравнение расчётных и аналитических зависимостей температуры от времени. Сплошные линии — аналитическая зависимость, пунктирные — расчётная

Приведенное сравнение показывает, что численное решение с объемным тепловыделением достаточно точно соответствует аналитическому решению, причем довольно хорошее соответствие наблюдается даже в точке, находящейся рядом с особой точкой аналитического решения. Отметим также, что при уменьшении размеров КЭ (более подробная сетка) численное решение монотонно приближается к точному аналитическому решению. Выбранные размеры области 150 м достаточны для того, чтобы точно учесть граничные условия на бесконечности, влияния конечности расчетной области на графиках не наблюдается вплоть до момента снижения температуры до начального значения.

#### Сетка из тетраэдров

Использовалась неструктурированная сетка (рис. 5.4) с ячейками, расширяющимися от оси симметрии (линия  $z = 0$ , она же линия тепловыделения) к периферии. Для проверки сеточной сходимости также проводились вычисления на трёх сетках с различным количеством интервалов разбиения по радиусу (примерно 10, 20, 40). В отличие от сетки из гексаэдров в качестве расчетной области рассматривался полный цилиндр, поскольку подобная сетка проще в построении. На верхней и нижней граничных поверхностях задавались условия отсутствия потока тепла, на внешней граничной поверхности температура считалась неизменной и равной начальной температуре окружающей среды  $9^\circ\text{C}$ . Размер области по радиусу также выбран равным 150 м.

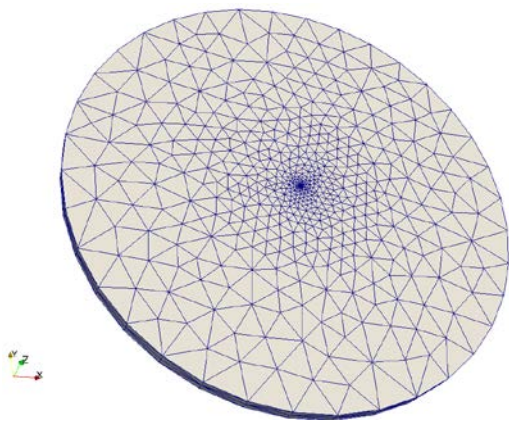


Рисунок 5.4 — Расчётная сетка из тетраэдров для задачи с линейным источником тепла

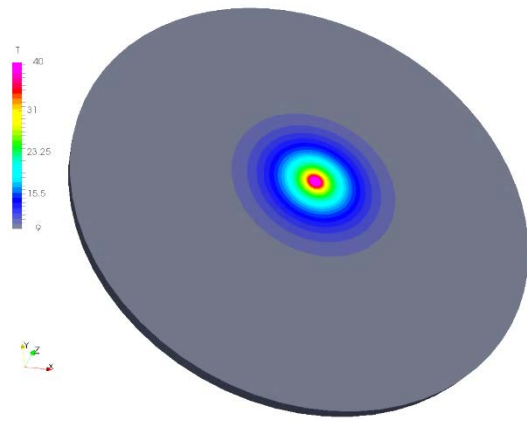


Рисунок 5.5 — Распределение температуры через 5000 суток для тетраэдрической сетки

Объемное тепловыделение задавалось в конечных элементах (КЭ), непосредственно примыкающих к оси симметрии ( $z = 0$ ), здесь объёмная плотность тепловыделения в каждом элементе  $q_v$  составляла

$$q_v = \frac{lq_0}{12vn}, \quad (5.14)$$

так как на одном слое разбиения по  $z$  к оси примыкает ребром либо вершиной 12 КЭ.

Распределение температуры через 5000 суток (13,7 лет) показано на рис.5.5. Линии сетки не показаны, так как, сгущаясь к центру, они сливаются в единое пятно. На рис. 5.6 показано сравнение расчётных зависимостей температуры от времени в нескольких точках, находящихся на разном расстоянии  $r$  от оси, с аналитическими, полученными из выражения (5.10). Как и для гексаэдрической сетки, видно хорошее совпадение с аналитическим решением, некоторое различие наблюдается лишь при  $r = 2$ , близко к особой точке аналитического решения. При уменьшении размеров КЭ численное решение тоже монотонно стремится к аналитическому.

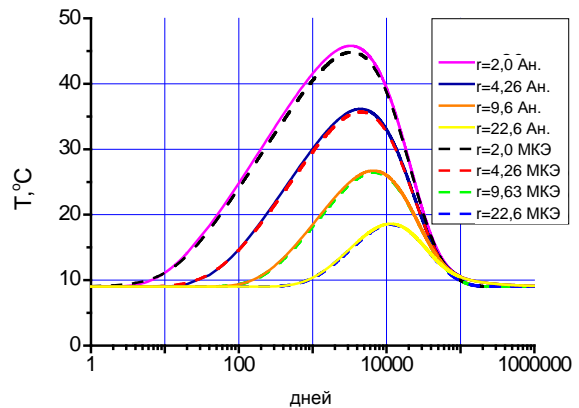


Рисунок 5.6 — Сравнение расчётных и аналитических зависимостей температуры от времени. Сплошные линии — аналитическая зависимость, пунктирные — расчётная

## 5.2 Точечный экспоненциально затухающий источник

### 5.2.1 Аналитическое решение

В случае точечного экспоненциально затухающего источника, сосредоточенного в начале координат, тепло распространяется в 3-х мерном пространстве ( $n = 3$ ). При введении пространственных координат  $(x, y, z)$  правая часть уравнения (5.6) принимает вид:

$$q(t, x, y, z) = q_0 \exp(-pt) \delta(x) \delta(y) \delta(z). \quad (5.15)$$

В работе [14] для интеграла, являющегося результатом подстановки (5.15) в (5.7), получено следующее аналитическое выражение:

$$u(\mathbf{x}, t) = \frac{q_0 \exp(-pt)}{4a^2 \pi r} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_n}{n!} \left( \frac{pr^2}{4a^2} \right)^n, \quad (5.16)$$

где

$$I_n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{r/2a\sqrt{t}}^{\infty} \frac{1}{s^{2n}} \exp(-s^2) ds. \quad (5.17)$$

Для вычисления  $I_n$  можно воспользоваться рекуррентной формулой

$$I_{n+1} = \frac{1}{2n+1} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{r^2}{4a^2 t} \right)^{-n-1/2} \exp\left(-\frac{r^2}{4a^2 t}\right) - 2I_n \right], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5.18)$$

при этом

$$I_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{r/2a\sqrt{t}}^{\infty} \exp(-s^2) ds = \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2a\sqrt{t}}\right). \quad (5.19)$$

Здесь  $\operatorname{erfc}$  — дополнительная функция ошибок.

### 5.2.2 Входные данные для расчёта

В основном входные данные повторяют использованные в тесте с линейным источником тепла. Так, теплофизические параметры среды использовались полностью те же (таблица 0.1). Значение параметра  $q_0$  в (5.8) было принято равным 591,3 Вт. Значение параметра  $p$  — равным 1/40 лет, как и для линейного источника тепла.

### 5.2.3 Результаты расчётов

Задача является центрально симметричной, в численном решении предполагалось, что объемное тепловыделение задано в области, непосредственно примыкающей к началу координат ( $x = y = z = 0$ ). Так же как и для задачи с линейным источником тепла, численное решение находилось посредством программы FENIA на гексаэдрических и тетраэдрических сетках разного уровня подробности с функциями формы первого и второго порядка.

#### Сетка из гексаэдров

Использовалась структурированная сетка с ячейками, расширяющимися от начала координат к периферии. Для проверки сеточной сходимости использовались четыре сетки с различным количеством интервалов разбиений по координатным осям: 10, 20, 40 и 80 ячеек. Здесь представлены результаты, полученные на сетке с разбиением на 40 ячеек по каждой стороне. Эта сетка приведена на рис. 5.7. Для упрощения сеточного разбиения рассматривалась только 1/8 часть всей области. На плоскостях симметрии ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$ ) использовалось условие отсутствия теплового потока, на внешней граничной поверхности температура считалась неизменной и равной начальной температуре окружающей среды 9°C. Размеры области по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  выбраны достаточно большими, чтобы убрать влияние внешней границы (моделируются условия на бесконечности). Следует отметить, что для этой задачи достаточный размер области составил 10 м, что намного меньше, чем для задачи с линейным источником тепла. Это связано с тем, что тепло в текущей задаче распространяется по большему количеству измерений (три вместо двух).

Объемное тепловыделение задавалось в единственном конечном элементе, непосредственно примыкающем к центру симметрии ( $x = y = z = 0$ ), здесь объемная плотность тепловыделения  $q_v$  составляла:

$$q_v = \frac{q_0}{8v}, \quad (5.20)$$

где  $v$  — объём этого КЭ. Коэффициент 8 в знаменателе связан с тем, что в расчёте рассматривалась 1/8 часть области. В остальных КЭ тепловыделение бралось нулевым.

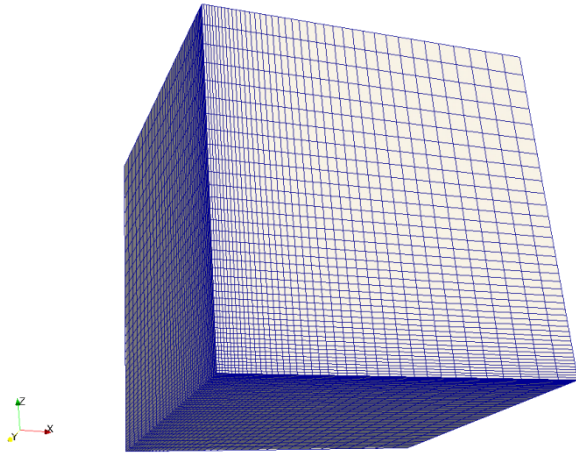


Рисунок 5.7 — Расчётная сетка из гексаэдров для задачи с точечным источником тепла

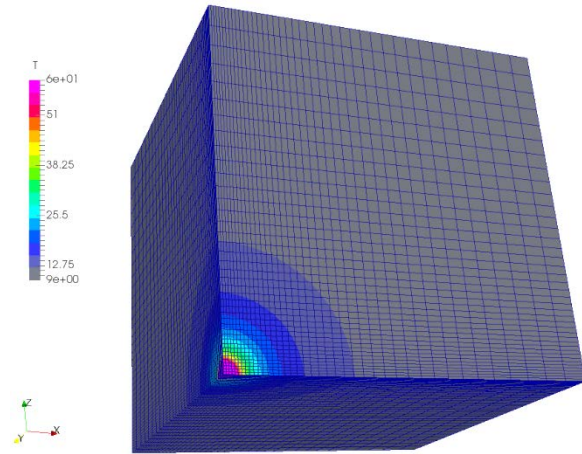


Рисунок 5.8 — Распределение температуры через 250 суток для гексаэдрической сетки

Сетка с полученным в расчёте распределением температуры на ней для момента времени  $t = 250$  суток представлена на рис. 5.8. В это время значения температуры в объёме близки к максимальным. Расчётное распределение температуры, как и аналитическое решение, имеет центральную симметрию.

Сравнение численных результатов расчета с аналитическим решением приведено на рис. 5.9, где представлены зависимости температуры от времени для точек, находящихся на разных расстояниях от места тепловыделения (0,2 м; 0,416 м; 0,908 м; 2,18 м). Как видно из рисунка, численное решение достаточно точно совпадает с аналитическим. Некоторое различие наблюдается лишь с точки, находящейся рядом ( $r = 0,2$  м) с областью тепловыделения. Это связано с тем, что аналитическое решение имеет особую точку в начале координат и стремится к бесконечности при приближении к точке тепловыделения.

Приведенное сравнение показывает, что численное решение с объемным тепловыделением достаточно точно соответствует аналитическому решению, причем даже вблизи особой точки видно неплохое соответствие. Некоторое отличие может в том числе объясняться заменой точечного тепловыделения на объемное в одном КЭ. Выбранные размеры области 10 м достаточноны для того, чтобы точно учесть граничные условия на бесконечности, влияния конечности расчетной области на графиках не наблюдается вплоть до момента снижения температуры до начального значения.

#### Сетка из тетраэдров

Использовалась неструктурированная сетка (рис. 5.10) с ячейками, расширяющимися от центра (начало системы координат  $x = y = z = 0$ , оно же место тепловыделения) к периферии. Для проверки точной сходимости проводились вычисления на трёх сетках с различным количеством интервалов разбиения по радиусу (примерно 15, 30, 40). Здесь приводятся результаты, полученные на сетке с разбиением примерно на 30 ячеек.

На плоскостях симметрии ( $x = 0, y = 0, z = 0$ ) использовалось условие отсутствия теплового потока, на внешней граничной поверхности температура считалась неизменной и равной начальной температуре

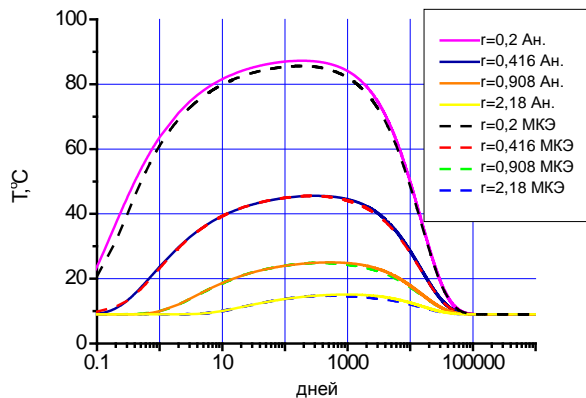


Рисунок 5.9 — Сравнение расчётных и аналитических зависимостей температуры от времени. Сплошные линии — аналитическая зависимость, пунктирные — расчётная

окружающей среды 9°C. Размеры области по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  выбраны такими же, как для гексагональных сеток, что обеспечивает отсутствие влияния внешней границы.

Объемное тепловыделение задавалось в конечных элементах, непосредственно примыкающих к центру симметрии ( $x = y = z = 0$ ), здесь объемная плотность тепловыделения  $q_v$  составляла

$$q_v = \frac{q_0}{8 \sum_{i=1}^k v_i}, \quad (5.21)$$

где  $v_i$  — объёмы КЭ, примыкающих к центру симметрии,  $k$  — количество таких КЭ. Коэффициент 8 в знаменателе связан с тем, что в расчёте рассматривалась 1/8 часть области. В остальных КЭ тепловыделение бралось нулевым. Тем самым приближенно задается точечное тепловыделение.

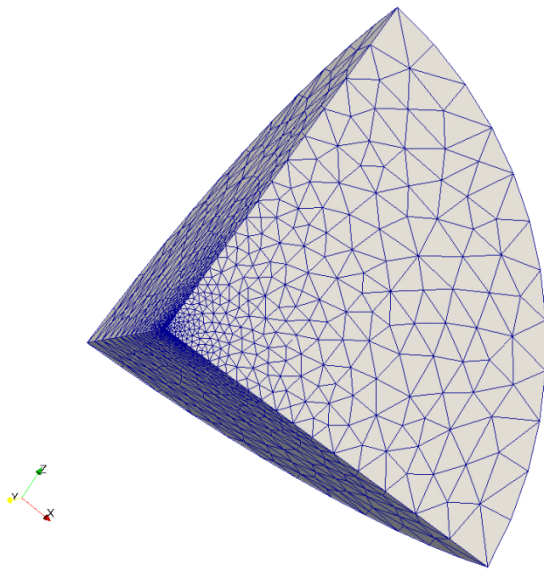


Рисунок 5.10. Расчётная сетка из тетраэдров для задачи с точечным источником тепла

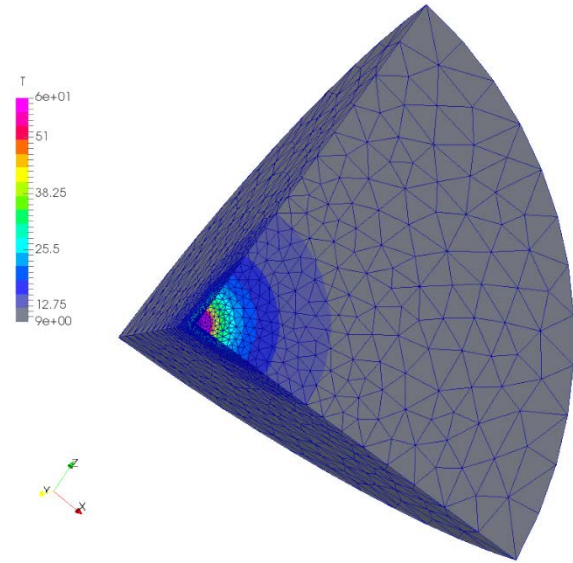


Рисунок 5.11. Распределение температуры через 250 суток для тетраэдрической сетки

Распределение температуры на расчётной сетке для момента времени  $t = 250$  суток представлено на рис. 5.11. Полученное распределение температуры имеет центральную симметрию. Сравнение численных результатов расчета с аналитическим решением приведено на рис. 5.12, где представлены зависимости температуры от времени для точек, находящихся на разных расстояниях  $r$  от точки тепловыделения (0,2 м; 0,416 м; 0,908 м; 2,18 м). Видно практически полное совпадение для всех рассматриваемых значений  $r$ .

Приведенные результаты сравнения показывают, что для сеток, построенных из тетраэдров, численное решение также достаточно точно соответствует аналитическому, причем даже вблизи особой точки аналитического решения наблюдается довольно хорошее совпадение. Выбранные размеры области 10 м достаточны для того, чтобы точно учесть граничные условия на бесконечности, влияния конечности расчетной области на графиках не наблюдается вплоть до снижения температуры до начального значения.

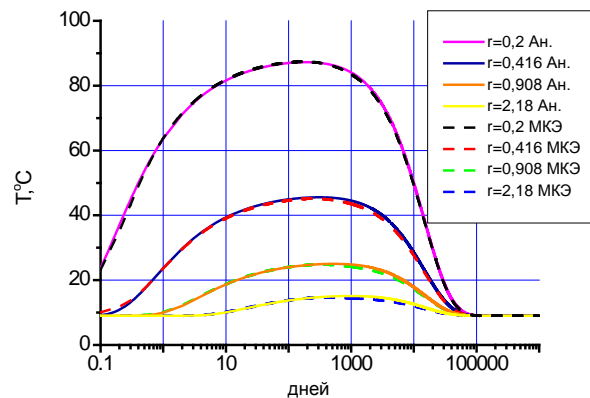


Рисунок 5.12 — Сравнение расчётных и аналитических зависимостей температуры от времени. Сплошные линии — аналитическая зависимость, пунктирные — расчётная

### 5.3 Выводы

Верификация расчётного кода FENIA на аналитических задачах нестационарного распространения тепла в однородной изотропной среде показала хорошее совпадение численных и аналитических решений для разных типов сеток (тетраэдрических и гексаэдрических). Отмечены лишь небольшие расхождения вблизи источника тепла, где аналитические решения имеют особую точку и стремятся к бесконечности. Верификация проводилась на задачах, описывающих условия, близкие к реализуемым в ПИЛ: точечный источник приближённо соответствует отдельному изолирующему контейнеру с РАО, а протяжённый линейный источник — заполненной скважине. Расчёты проводились с использованием реалистичных для ПИЛ в Нижнеканском массиве теплофизических параметров. В рамках верификации получены оценки размеров расчётной области, достаточных для того, чтобы условия на её границе не влияли на полученное численное решение. Таким образом, можно утверждать, что программа FENIA уже на текущем этапе разработки показывает надёжные результаты и может использоваться для моделирования теплового режима рассматриваемой ПИЛ.

Отметим, что все приведенные выше в данном разделе расчеты для обоих типов сеток были выполнены с использованием функций формы КЭ первого порядка. Использование функций формы второго порядка позволяет незначительно уточнить результат решения, но затраты процессорного времени для получения решения возрастают при этом в несколько раз.

## 6 Исходные данные для моделирования ПГЗРО

Рассмотрим далее результат применения расчётного кода FENIA для моделирования эволюции теплового состояния прототипного ПГЗРО. Модель ПГЗРО строилась на основе проекта ПИЛ [1]. Предполагалось, что приведённые на нём горно-проходческие выработки на каждом из горизонтов соединяются рядом камер захоронения. В свою очередь, камеры захоронения соединяются скважинами, в которых захораниваются контейнеры с остеклованными ВАО. Схема горизонта в рассматриваемой модели приведена на рис. 6.1. При генерации расчётной области принималось упрощённое представление пункта захоронения, включающее лишь скважины с ВАО, остальные выработки предполагались заполненными горной породой. Таким образом, не учитывалось возможное вентилирование ПГЗРО, что является консервативным с точки зрения теплоотвода предположением. В модели ПГЗРО разделен на два участка, на которых захораниваются отходы с разной мощностью тепловыделения, соответственно, различается расстояние между скважинами на этих участках.

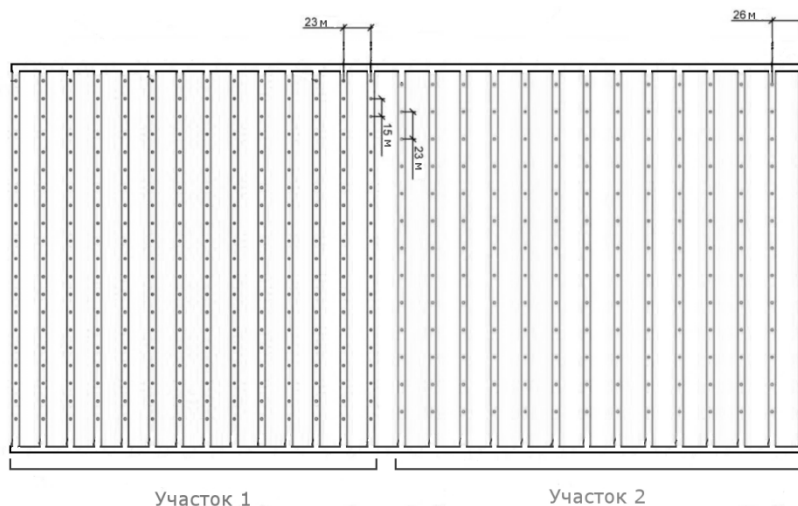


Рисунок 6.1 — Схема горизонта прототипного ПГЗРО

### 6.1 Инженерные барьеры: матрица, бидоны, пены, контейнеры

Рассмотрим иерархию инженерных барьеров безопасности (ИББ) и приведём их геометрические размеры и теплофизические свойства.

Высокоактивные отходы остекловываются в цилиндрических бидонах из углеродистой стали. Габаритная высота бидона составляет 1000 мм. В каждом бидоне помещается около  $0,2 \text{ м}^3$  остеклованных отходов массой около 500 кг ВАО. Теплофизические свойства остеклованных ВАО согласно [16] приведены в таблице 6.1.1.

**Таблица 6.1.1 — Теплофизические свойства остеклованных ВАО [16]**

Параметр	Значение	
	Участок 1	Участок 2
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2500	
Удельная теплопроводность, Вт/м*°С	2,4	
Удельная теплоемкость, Дж/кг*°С	800	
Начальная плотность тепловыделения, кВт/м <sup>3</sup>	1,0	1,5
Скорость падения мощности тепловыделения, %/год	2,5	

Бидоны упаковываются в пеналы, в каждом пенале размещается три бидона. Габаритные размеры пенала: диаметр 630 мм (по другим данным 650 мм), высота 3400 мм [16]. Для транспортировки пенал помещается в стальной невозвратный транспортный чехол. Габаритные размеры транспортного чехла: диаметр 664 мм, высота 3520 мм [16].

Рассматривалась концепция захоронения, согласно которой ВАО в невозвратном транспортном чехле помещаются для захоронения в изолирующий контейнер (ИК). ИК конструктивно состоит из трёх стальных стаканов, между которыми располагается защитный материал. Предполагалось, что высота ИК составляет 4100 мм, внешний диаметр наружного стакана 1200 мм. Между наружным и промежуточным стаканами располагается защита из алюминатного бетона, между промежуточным и внутренним стаканом — из прессованного бентонита. На днище и в крышке также находится слой прессованного бентонита. Схема ИК приведена на рис. 6.2, принимаемые в расчётах геометрические характеристики — в таблице 6.1.2. Теплофизические характеристики материалов защиты могут заметно различаться в зависимости от их источника и технологии обработки. Так, в зарубежных источниках, например, [17], для прессованного бентонита приводятся значения плотности до 1800 кг/м<sup>3</sup>. Для бентонита в качестве базовых можно использовать значения, приведённые в таблице 6.1.3. В качестве алюминатного бетона при моделировании принимались бетоны с глинозёмистым цементом в качестве вяжущего вещества и кордиеритовыми или муллитокордиеритовыми заполнителями. Плотность таких бетонов составляет 1900—2000 кг/м<sup>3</sup> [18]. Согласно [19] удельная теплоёмкость огнеупорных бетонов находится в пределах 800—1600 Дж/кг\*°С, а удельная теплопроводность для большинства жаростойких бетонов составляет 0,6—1,5 Вт/м\*°С. Для учёта влияния пустот в ИК в качестве удельной теплопроводности воздушного зазора можно использовать величину 0,021 Вт/м\*°С, а излучательную способность поверхности брать из диапазона 0,24—0,3, что приблизительно соответствует излучательной способности нешлифованной стали. Оценки объёма пустого пространства в ИК даны в таблице 6.1.4. Температурные зависимости теплофизических характеристик для сталей 08X18H10 и ANSI 316 даны в таблице 6.1.5 [20].



*Рисунок 6.2 —  
Схема изолирующего контейнера*

**Таблица 6.1.2 — Геометрические характеристики ИК**

Параметр	Значение, мм
Высота	4100
Внешний диаметр наружного стакана	1200
Толщина наружного стакана	5
Толщина защиты из алюминатного бетона	60
Внешний диаметр промежуточного стакана	1070
Толщина промежуточного стакана	3
Толщина прессованного бентонита	192
Внутренний диаметр внутреннего стакана	680
Толщина внутреннего стакана	3
Толщина прессованного бентонита в основании	150
Толщина фланца	3
Толщина основания наружного стакана	5
Высота свободного пространства для пустого ИК	3574
Высота юбки	130

**Таблица 6.1.3 — Теплофизические свойства сухого бентонита**

Параметр	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1500—1800
Удельная теплопроводность, Вт/м*°С	1
Удельная теплоемкость, Дж/кг*°С	175 [17]

**Таблица 6.1.4 — Оценка объёма пустот в объектах**

Объект	Объём пустот, абсолютный, м <sup>3</sup>	Объём пустот, относительный к объёму объекта, %
Бидон	0,0429	17
Пенал	0,392	37
Контейнер	0,890	19



**Таблица 6.1.5 — Температурные зависимости теплофизических характеристик сталей [20]**

Марка стали	Температура, К	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплопроводность, Вт/м*К	Удельная теплоёмкость, Дж/кг*К
08X18H10	293,0	7900,0	16,6	478,0
	373,0	7862,0	17,2	495,0
	473,0	7821,0	18,0	516,0
	573,0	7778,0	18,7	537,0
	673,0	7732,0	19,4	558,0
316	300,0	7954,0	14,0	502,0
	400,0	7909,0	15,5	516,0
	500,0	7864,0	17,1	529,0
	600,0	7817,0	18,7	542,0
	700,0	7770,0	20,2	556,0

## 6.2 Проходки, бетонные и бентонитовые конструкции

При моделировании предполагались следующие геометрические характеристики прототипного ПГЗРО. Изолирующие контейнеры располагаются в скважинах глубиной 75 м и диаметром 1,3 м. Пространство между ИК и стенкой скважины заполняется тиксотропным шликером на основе цементно-бентонитовой смеси. Предполагаемые теплофизические свойства цементно-бентонитовой смеси приведены в таблице 6.2.1 Вверху и внизу скважины соединяются горизонтальными выработками (камерами захоронения) длиной 360 м. Каждый участок состоит из 14 выработок. Доступ к камерам захоронения осуществляется через транспортно-технологические выработки, соединяющие концы камер захоронения.

На первом участке (ВАО с более низким тепловыделением) в каждой выработке располагаются 20 скважин, находящихся на расстоянии 15 м друг от друга. Таким образом, длина рабочей зоны расположения скважин в выработке составляет 285 м. Общее количество пеналов в выработке 360 шт. Расстояние между горизонтальными выработками составляет 23 м, то есть, длина рабочей зоны расположения выработок на этом участке 299 м, а общее количество скважин 280 шт.

На втором участке в каждой выработке располагаются 13 скважин на расстоянии 23 м друг от друга. Таким образом, длина рабочей зоны расположения скважин в выработке составляет 276 м. Общее количество пеналов в выработке 234 шт. Расстояние между горизонтальными выработками составляет 26 м, то есть, длина рабочей зоны расположения выработок на этом участке 338 м, а общее количество скважин 182 шт.

**Таблица 6.2.1 — Теплофизические свойства цементно-бентонитовой смеси**

Параметр	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1800
Удельная теплопроводность, Вт/м*°С	1,1
Удельная теплоемкость, Дж/кг*°С	1000

## 6.3 Горные породы

На предполагаемом участке сооружения ПИЛ на соответствующих глубинах (около 400—600 м) горные породы представлены в первую очередь гранитоидами (граниты, гранодиориты, кварцевые диориты) и гнейсами [15], поэтому при моделировании прототипного ПГЗРО рассматривались те же породы. Температурные зависимости теплофизических характеристик для перечисленных пород согласно [15] приведены в таблице 6.3.1.

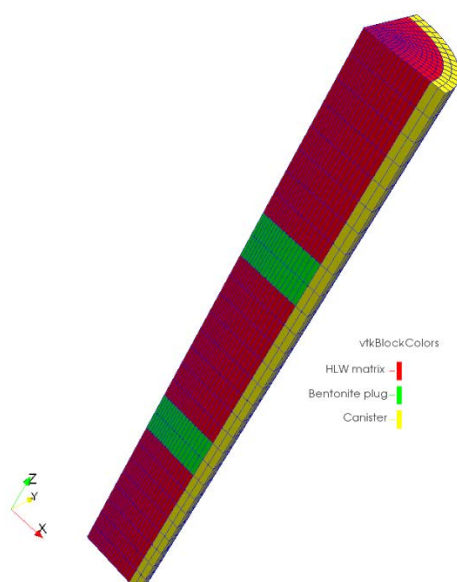
**Таблица 6.3.1 — Температурные зависимости теплофизических свойств горных пород [15]**

Порода	Температура, К	Удельная теплопроводность, Вт/м*К	Удельная теплоёмкость, Дж/кг*К
Гнейс	291,0	3,0	790,0
	373,0	2,2	850,0
	473,0	2,1	940,0
Граниты	291,0	3,3	820,0
	373,0	2,5	920,0
	473,0	2,2	1000,0
Гранодиорит	291,0	2,4	920,0
	373,0	1,9	1040,0
	473,0	1,8	1100,0
Кварцевые диориты	291,0	2,5	860,0
	373,0	2,1	970,0
	473,0	2,0	1050,0

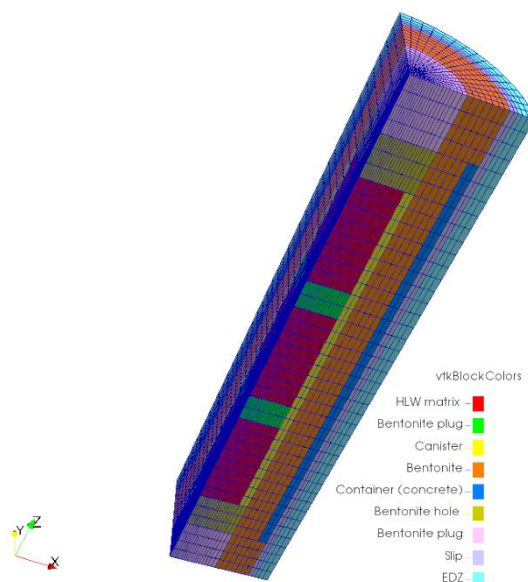
## 7 Моделирование разогрева горных пород для отдельной скважины

Как показано выше, характерные размеры отдельных конструктивных элементов инженерных барьеров безопасности, например, толщины стальных стаканов ИК, могут составлять лишь несколько миллиметров. Соответственно, использование расчётных сеток, детально моделирующих все составляющие конструкций, приведёт к значительным вычислительным затратам, что неприемлемо при проведении массового счёта, например, при анализе неопределённостей. В связи с этим требуется найти способ снизить детализацию расчётной сетки с минимальным изменением получаемых результатов.

Для этого были построены две сетки с разной детализацией. На первой сетке с достаточной точностью моделировались элементы конструкции ИББ. Сетка включала скважину с ВАО, вмещающую 18 ИК, высотой 75 м, а также окружающие горные породы. В горизонтальной плоскости рассматривалась область размером 23×15 м, что соответствует расстоянию между скважинами на первом участке ПГЗРО (отходы, накопленные до 2010 года). В высоту моделировалась толща горных пород над скважиной глубиной 400 м. Вследствие наличия трёх плоскости симметрии (горизонтальная и две вертикальных) сетка охватывала только область, включающая верхнюю половину высоты скважины и горные породы над ней, а также четверть горизонтального сечения. Таким образом, высота расчётной области составила 437,5 м, а горизонтальное сечение 11,5×7,5 м.



*Рисунок 7.1 — Расчётная сетка для пенала с ВАО. Красным цветом показана стекломатрица, зелёным — бентонитовая заглушка, жёлтым — пенал*



*Рисунок 7.2 — Расчётная сетка для ИК и окружающей области разуплотнения. Красным цветом показана стекломатрица, зелёным — бентонитовая заглушка, жёлтым — пенал, оранжевым — бентонитовая засыпка стенки ИК, синим — бетон ИК, салатovým — бентонитовая пробка, розовым — крышка ИК, фиолетовым — тиксотропный иликер, голубым — зона разуплотнения*

Поскольку расчётная область отчасти состоит из однотипных объектов (бидоны с ВАО, ИК), были построены сетки для этих объектов, после чего из них собиралась сетка для всей области. На рис. 7.1 показана расчётная сетка для отдельного пенала с ВАО, на рис. 7.2 — она же в составе сетки для ИК. Добавлением подобласти, соответствующей окружающей горной породе, была получена сетка, описывающая слой расчётной области (рис. 7.3). Из таких слоёв была собрана часть расчётной области для диапазона высот, соответствующих верхней половине скважины (рис. 7.4). Для вышележащих горных пород использовалась такая же структура сетки, но все ячейки были заполнены материалом, соответствующим горным породам. Общее количество конечных элементов в сетке составило около 540 тысяч. Теплофизические свойства материалов, использованные в расчёте, приведены в таблице 7.1. Предполагалось, что мощность тепловыделения ВАО спадает во времени по экспоненциальному закону:

$$q(t) = q_0 e^{-pt}, \quad (7.1)$$

где  $q_0$  — плотность остаточного тепловыделения на момент начала расчёта,  $p$  — параметр, определяющий скорость снижения тепловыделения. Значение начальной мощности  $q_0$  принималось равным  $1 \text{ кВт/м}^3$ , параметра  $p$  — равным  $1/40 \text{ лет}^{-1}$ , то есть предполагалось, что мощность тепловыделения снижается в  $e$  раз за 40 лет или на 2,5% за год. Начальная температура во всей расчётной области принималась равной  $9 \text{ }^\circ\text{C}$ . На верхней границе области было поставлено условие первого рода с той же температурой.

Эта сетка использовалась для проведения «эталонного» расчёта. Кроме того, поскольку на этой сетке с высокой точностью моделируются ИББ, её фрагменты, соответствующие отдельному пеналу и ИК (рис. 7.1, рис. 7.2), могут использоваться для вычисления поля температур внутри инженерных барьеров и зоны разуплотнения.

**Таблица 7.1 — Теплофизические свойства материалов, использованные в расчёте с детальной сеткой**

Материал	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Удельная теплопроводность, $\text{Вт/м}^\circ\text{К}$	Удельная теплоёмкость, $\text{Дж/кг}^\circ\text{К}$
Бентонит	1800,0	1,1	1000,0
Тиксотропный шликер	1800,0	1,1	1000,0
Зона разуплотнения	2600,0	2,8	840,0
Крышка ИК	800,0	8,1	600,0
Бетон ИК	2500,0	2,1	1000,0
Пенал	2800,0	14,1	1500,0
Горные породы	2700,0	2,91	840,0
Матрица с РАО	2500,0	2,4	800,0

Вторая сетка была построена со значительно более крупными ячейками, на ней среди ИББ выделялась только стеклянная матрица с ВАО, остальные барьеры представлены одним материалом. Зона разуплотнения также не выделялась, и свойства материала в ней считались такими же, как в основном массиве горных пород. Таким образом, на этой сетке моделировались три материала: матрица с ВАО, прочие ИББ и горные породы. При этом не выделялись бентонитовые пробки между ИК, и тепловыделяющие РАО представлялись непрерывным протяжённым источником, интегральное тепловыделение которого соответствовало суммарному тепловыделению в ИК. Принятые в расчётах свойства материалов показаны в таблице 7.2. Более грубая сетка была построена в двух вариантах: с тетраэдрическими (рис. 7.5) и гексаэдрическими (рис. 7.6) ячейками. Эти сетки включают всю область выше горизонтальной плоскости симметрии, то есть размер расчётной области составил  $23 \times 15 \times 437,5 \text{ м}$ . Сетка с тетраэдрическими ячейками состояла из 2323 элементов, с гексаэдрическими ячейками — из 6370 элементов, то есть, количество элементов в грубых сетках было на два порядка меньше, чем в более детальной.

**Таблица 7.2 — Теплофизические свойства материалов, использованные в расчёте с упрощённой сеткой**

Материал	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Удельная теплопроводность, $\text{Вт/м}^\circ\text{К}$	Удельная теплоёмкость, $\text{Дж/кг}^\circ\text{К}$
ИББ	2800,0	8,1	1500,0
Горные породы	2700,0	2,91	840,0
Матрица с РАО	2500,0	2,4	800,0

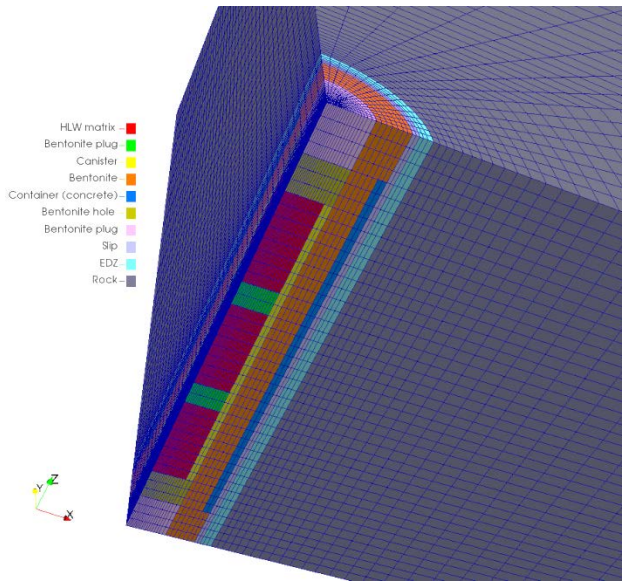


Рисунок 7.3 — Расчётная сетка для ИК и окружающей горной породы. Красным цветом показана стекломатрица, зелёным — бентонитовая заглушка, жёлтым — пенал, оранжевым — бентонитовая засыпка стенки ИК, синим — бетон ИК, салатovým и розовым — прочая бентонитовая засыпка ИК, фиолетовым — тиксотропный шликер, голубым — зона разуплотнения, серым — массив горных пород

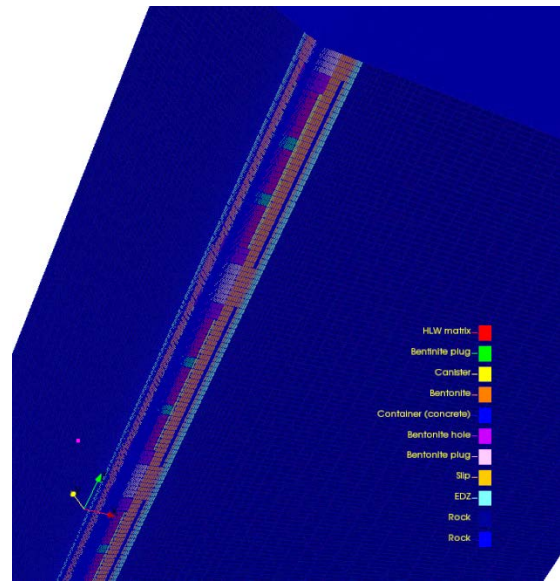


Рисунок 7.4 — Фрагмент детальной расчётной сетки для отдельной скважины. Красным цветом показана стекломатрица, зелёным — бентонитовая заглушка, жёлтым — пенал, оранжевым — бентонитовая засыпка стенки ИК, синим — бетон ИК, салатovým и розовым — прочая бентонитовая засыпка ИК, фиолетовым — тиксотропный шликер, голубым — зона разуплотнения, тёмно-синим — массив горных пород

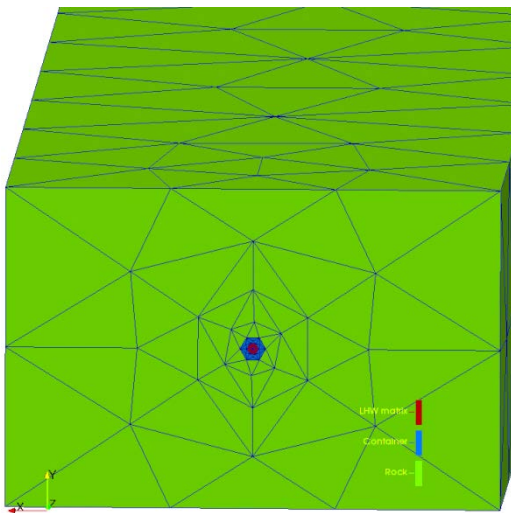


Рисунок 7.5 — Фрагмент грубой расчётной сетки для отдельной скважины, тетраэдрические ячейки. Красным цветом показана стекломатрица, синим — прочие ИББ, зелёным — массив горных пород

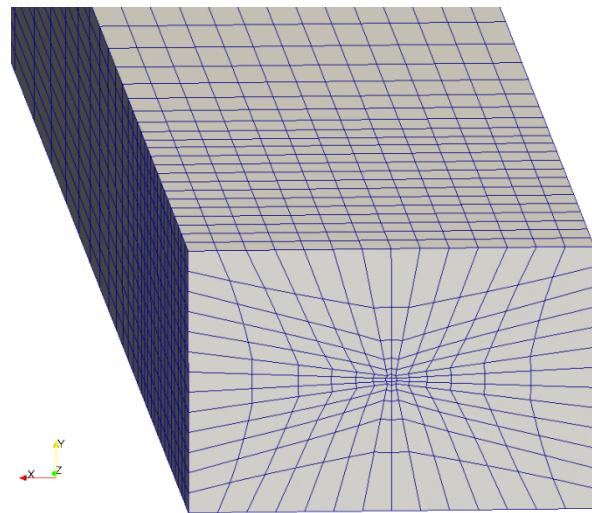


Рисунок 7.6 — Фрагмент грубой расчётной сетки для отдельной скважины, гексаэдрические ячейки

Было проведено сравнение результатов расчётов на мелкой и двух упрощённых сетках. Полученные распределения температур вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр скважины, для моментов времени  $t = 42$  года и  $t = 100$  лет показаны на рис. 7.7. Видно, что различия температур между детальной и упрощёнными сетками не превышают  $2^\circ\text{C}$  для  $t = 42$  года, уменьшаясь по мере отдаления от источника тепловыделения. Для  $t = 100$  лет различия составляют доли градуса на протяжении всей линии. На рис. 7.8 показано распределение температур вдоль вертикальной линии, проходящей на расстоя-

нии 5 м от оси скважины для тех же моментов времени. Нулевой координате здесь соответствует середина скважины. Видно, что для  $t = 42$  года различия температур не превышают  $1^\circ\text{C}$ , а для  $t = 100$  лет достигается практически полное совпадение. Таким образом, если целью моделирования является определение поля температур в толще горных пород, может использоваться грубая сетка.

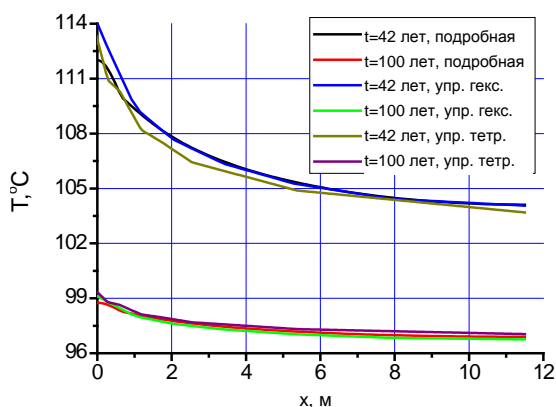


Рисунок 7.7 — Распределение температур вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр скважины

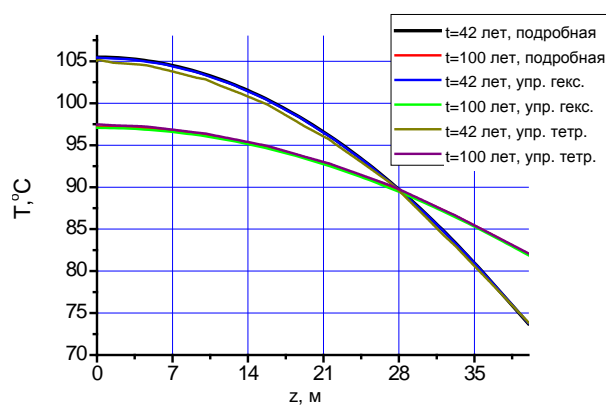


Рисунок 7.8 — Распределение температур вдоль вертикальной линии, проходящей на расстоянии 5 м от оси скважины

## 8 Моделирование разогрева горных пород для ПГЗО в целом

На основе сетки из тетраэдрических элементов, описывающих отдельную скважину была построена конечноэлементная сетка для моделирования всего ПГЗРО и окружающих его горных пород. Рассматривались окружающие ПГЗРО горные породы толщиной 400 м. Вследствие наличия горизонтальной и вертикальной плоскостей симметрии построенная сетка покрывала  $\frac{1}{4}$  области, то есть охватывала пространство размером примерно  $750 \times 550 \times 450$  м. Сетка состояла из примерно 17,6 миллионов тетраэдрических элементов, то есть даже при использовании грубой сетки для моделирования всего ПГЗРО требуется большое количество ячеек и, соответственно, значительные вычислительные мощности. Используемая в расчётах сетка показана на рис. 8.1. Поскольку в каждой камере захоронения на участке 1 располагается четное количество скважин (20), а на участке 2 — нечетное (13), вертикальный разрез проходит на участке 1 между скважинами, а на участке 2 — по центру скважин, что показано на рис. 8.2, где приведён фрагмент расчётной сетки вблизи границы участков.

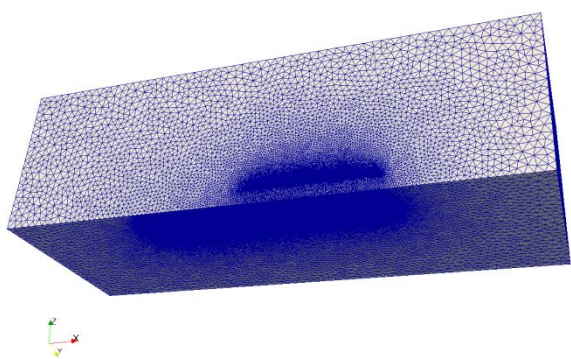


Рисунок 8.1 — Сеточное разбиение для моделирования ПГЗРО в целом

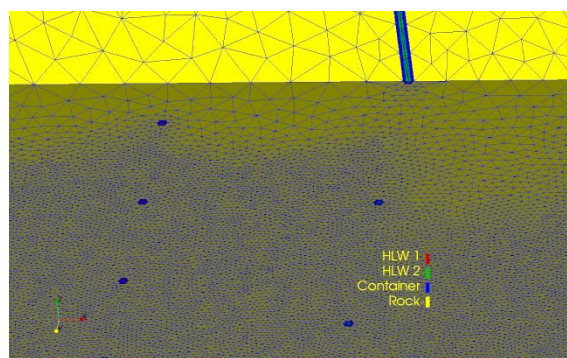


Рисунок 8.2 — Фрагмент сеточного разбиения вблизи границы участков. Красным цветом показана стекломатрица участка 1, зелёным — стекломатрица участка 2, синим — прочие ИББ, жёлтым — массив горных пород

Теплофизические свойства материалов использовались те же, что в расчёте для отдельной скважины с грубой сеткой (таблица 7.2). Камеры захоронения и транспортно-технологические тоннели не выделя-

лись как отдельные объекты — предполагалось, что они изначально заполнены материалом с теми же свойствами, что и вмещающие породы. Это предположение консервативно при краткосрочном моделировании, так как исключает из рассмотрения вентиляцию выработок, обеспечивающую дополнительный теплоотвод. При моделировании процессов после закрытия ПГЗРО это предположение реалистично, так как ожидается, что проходки будут заполнены контейнерами со среднеактивными отходами, бетоном и иными строительными материалами. Для участка 1 параметры тепловыделения брались теми же, что в расчёте для отдельной скважины ( $q_0 = 1 \text{ кВт/м}^3$ ,  $p = 1/40 \text{ лет}^{-1}$ ), для участка 2 начальная мощность тепловыделения  $q_0$  принималась равной  $1,5 \text{ кВт/м}^3$ . Начальная температура во всей расчётной области принималась равной  $9 \text{ }^\circ\text{C}$ . На внешних границах области было поставлено условие первого рода с той же температурой.

Были проведены расчёты для двух сценариев заполнения ПГЗРО. Первый сценарий предполагал одномоментное заполнение всего пункта захоронения и использовался для сравнения с результатами, полученными для отдельной скважины. Как отмечалось выше, в расчётах для отдельной скважины граничные условия на вертикальных поверхностях моделируют наличие соседних скважин, при этом предполагается, что тепловые потоки на границе взаимно компенсируются. В первом сценарии проверялась равномерность такого предположения для моделирования теплового состояния горных пород во внутренних областях ПГЗРО. Для этого на расчётной сетке для всего ПГЗРО была выбрана скважина в глубине участка 1, и проведено сравнение поля температур вокруг неё с полученным для одиночной скважины (рис. 7.7, рис. 7.8). На рис. 8.3, рис. 8.4 приведены распределения температур вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр скважины, и вдоль вертикальной линии, проходящей на расстоянии 5 м от оси скважины для трёх расчётов одиночной скважины (с подробной и упрощёнными гексаэдрической и тетраэдрической сетками) и для скважины в глубине участка 1 расчёта всего ПГЗРО. Видно, что в начале расчёта ( $t = 42$  года) результаты практически совпадают, но с течением времени начинает проявляться эффект наличия окружающей ПГЗРО горной породы, служащей стоком тепла, и температуры, полученные в предположении одиночной скважины для  $t = 100$  лет, существенно превышают рассчитанные с учётом окружающих скважин и вмещающей породы. Следовательно, для оценки теплового состояния внутренних областей ПГЗРО в краткосрочной перспективе (до 50 лет) могут использоваться расчёты для отдельной скважины. Такие расчёты требуют меньших вычислительных ресурсов, и в них могут использоваться сетки с высоким пространственным разрешением, позволяющие детально моделировать процессы, проходящие в отдельных элементах ИББ, что особенно актуально именно на начальном этапе их разогрева. При более долговременном моделировании расчёты для отдельной скважины оказываются избыточно консервативны.

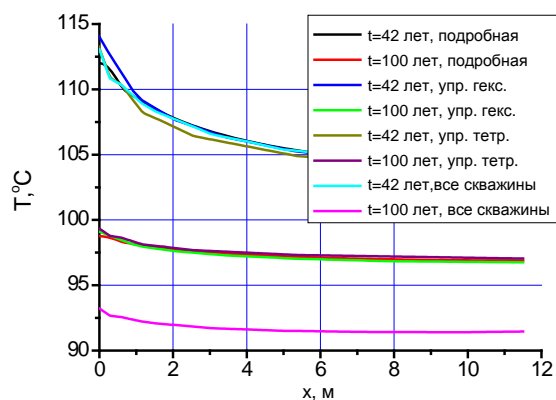


Рисунок 8.3 — Распределение температур вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр скважины

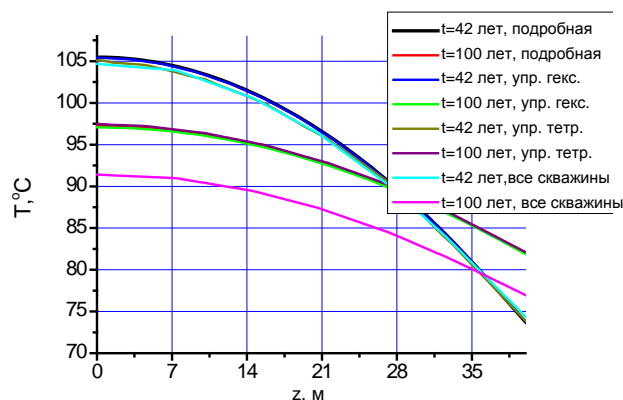


Рисунок 8.4 — Распределение температур вдоль вертикальной линии, проходящей на расстоянии 5 м от оси скважины

Второй сценарий предполагает постепенный график заполнения ПГЗРО — каждый год заполняются скважины одной камеры захоронения, начиная с участка 1. Соответственно, время заполнения всего ПГЗРО составит 27 лет. Этот сценарий использовался для получения реалистичных оценок теплового состояния ПГЗРО. В качестве примера расчёта трёхмерного поля температур на рис. 8.5 приведено состояние на момент времени  $t = 55$  лет с начала заполнения. Видно, что к этому моменту горные породы в пределах участка 1 заметно прогрелись, и их температура превышает  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , на участке 2 же такие значения температур соответствуют стекломатрице и изолирующим контейнерам, причём только в той части, которая заполнялась первой, породы же, как и захороненные в последнюю очередь ИК, ещё не прогрелись.

Рассмотрим более подробно временную и пространственную эволюцию теплового состояния ПГЗРО. На рис. 8.6 показаны двумерные распределения температур по трём горизонтальным сечениям расчётной области: через середины скважин (низ расчётной области, высота  $z = 0$  м), вершины скважин ( $z = 37,5$  м), в толще горных пород над ПГЗРО ( $z = 100$  м) для нескольких моментов времени. Через  $t = 55$  лет поле температур соответствует приведённому на рис. 8.5. Максимальная температура в это время превышает  $110$  °С, область прогрева распространилась по высоте на  $100$  м от середины скважин. Через  $t = 100$  лет начинается остывание — температуры внутри ПГЗРО составляют  $100$  °С и менее, область прогрева расширяется. На момент времени  $t = 274$  года максимальные расчётные температуры не превышают  $50$  °С. С течением времени температура продолжает снижаться, и через  $t = 3500$  лет превышение температуры над фоновым значением не превышает  $0,5$  °С во всей расчётной области (рис. 8.7). Здесь используется шкала, отличная от предыдущего рисунка, так как разница температур слишком незначительна и не может быть отображена при помощи предыдущей шкалы. При этом вблизи внешних границ расчётной области не происходит заметного повышения температуры, то есть тепловые потоки через границы области практически отсутствуют.

Зависимость температуры для центров внутренних скважин участков 1 и 2, приведённая на рис. 8.8, показывает, что максимальные температуры достигаются через  $50$ — $70$  лет с начала заполнения ПГЗРО. Поскольку здесь не рассматривается температура внутри матрицы с ВАО, максимальное значение на несколько градусов ниже, чем на рис. 8.5 и рис. 8.6. Отметим, что на участке 2, который начинает заполняться через  $14$  лет, вследствие большего тепловыделения максимальные значения температур достигаются примерно в то же время, что и на участке 1. После этого начинается остывание как контейнеров, так и вмещающих пород, и через  $7$ — $10$  тысяч лет температура во всей расчётной области возвращается к исходным значениям.

Изменение пространственных профилей температуры со временем на этапе разогрева ПГЗРО представлено на рис. 8.9. Так, на рис. 8.9 а) показаны профили температуры вдоль горизонтальной оси симметрии ПГЗРО. На кривых, соответствующих моментам времени  $t = 8$  лет и  $t = 14$  лет с начала захоронения ВАО, видна степень заполнения ПГЗРО на эти моменты времени — температура в незаполненной области имеет исходное значение, в заполненной же она тем выше, чем раньше захоранивались отходы. Время  $t = 28$  лет соответствует полной загрузке ПГЗРО, на момент времени  $t = 55$  лет наблюдаются температуры, близкие к максимальным. Более резкие пики на участке 2 связаны с тем, что на нём ось симметрии проходит непосредственно через скважины (их на участке 2 нечётное число), а на участке 1 — посередине между скважинами. Естественным образом, температура внутри тепловыделяющей матрицы с ВАО выше, чем в окружающих породах. На рис. 8.9 б) показаны профили температуры

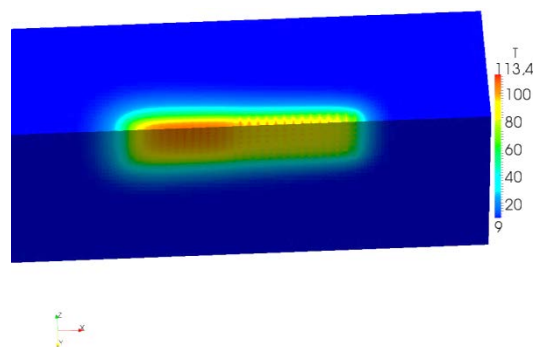


Рисунок 8.5 — Расчётное поле температур в ПГЗРО через 55 лет с начала заполнения

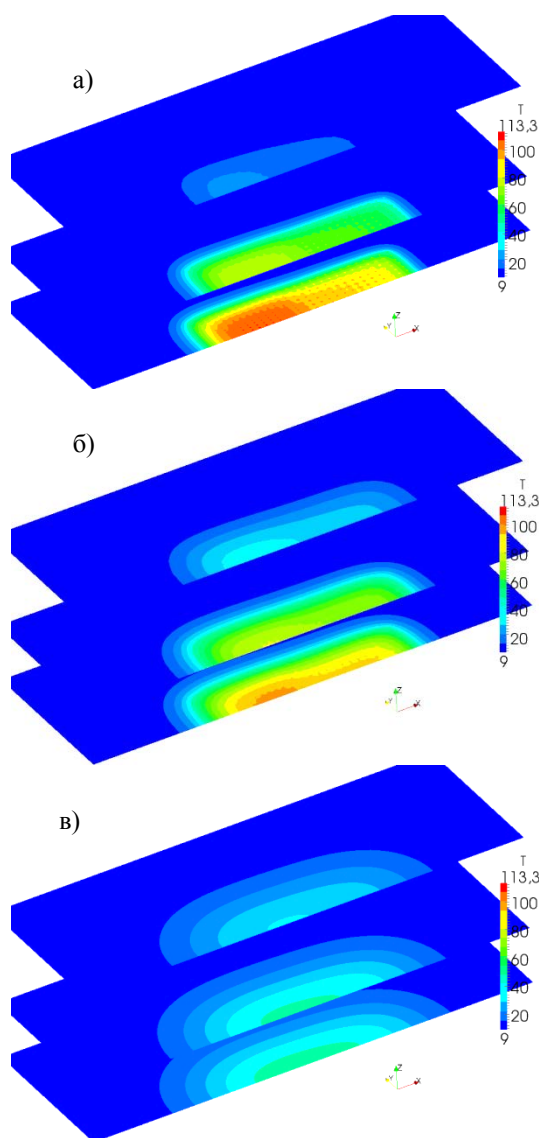


Рисунок 8.6 — Распределение температур (одинаковая шкала) по горизонтальным срезам: по серединам скважин (0 м), по вершинам скважин (37,5 м), над ПГЗРО (100 м) для разных моментов времени. а)  $t = 55$  лет, б)  $t = 100$  лет, в)  $t = 274$  года

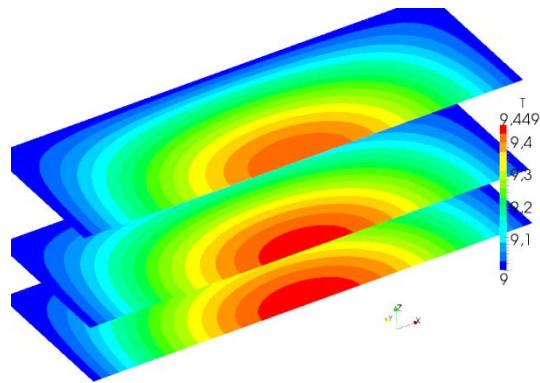


Рисунок 8.7 — Распределение температур по горизонтальным срезам: по серединам скважин (0 м), по вершинам скважин (37,5 м), над ПГЗРО (100 м) для разных моментов времени,  $t = 3500$  лет

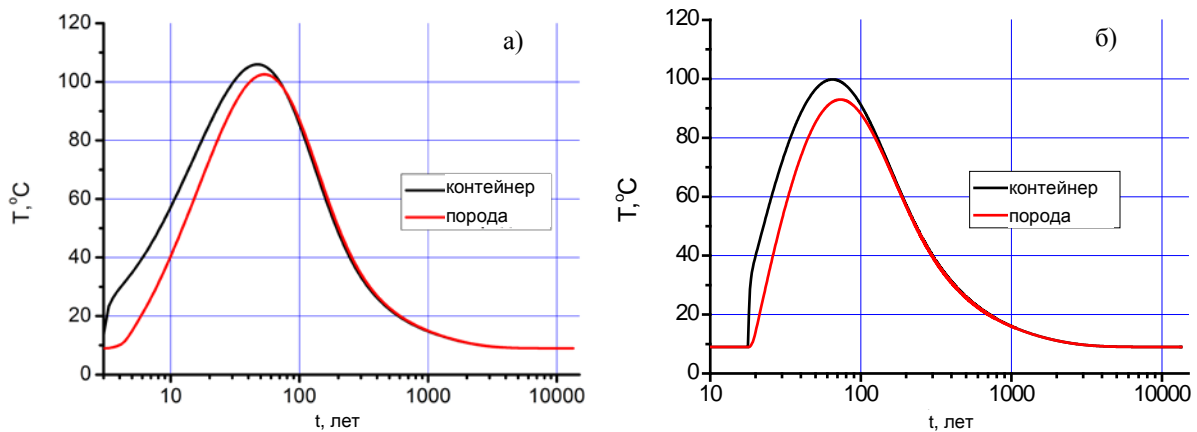


Рисунок 8.8 — Временные зависимости температур для центра внутренней скважины. а) участок 1, б) участок 2

вдоль вертикальной прямой, проходящей вблизи центра участка 1 — через середину восьмой камеры захоронения. Через 55 лет с начала заполнения ПГЗРО прогревается толща пород порядка 200 м от горизонтальной плоскости симметрии, что соответствует примерно 160 м от вершин скважин (горизонт +5 м). Поскольку после закупоривания скважин с ВАО предполагается заполнение камер захоронения низкоактивными отходами, важным аспектом функционирования ПГЗРО является температурный режим на соответствующих горизонтах (+5 м и минус 50 м). Из профилей температуры вдоль горизонтальной прямой, проходящей по вершинам скважин восьмой камеры захоронения участка 1 (горизонт +5 м), видно, что через год после заполнения скважин этой камеры ВАО ( $t = 8$  лет) температура поднимется примерно до 20 °С. К концу заполнения первого участка ( $t = 14$  лет) температура составит 25—35 °С, а на момент заполнения всего ПГЗРО ( $t = 28$  лет) достигнет 60 °С. При этом в транспортно-технологических тоннелях ( $y \approx 180$  м) вплоть до  $t = 55$  лет расчётная температура будет менее 30 °С.

Пространственные профили температур на этапе остывания представлены на рисунке 8.10. Через 100 лет с начала заполнения температура в объёме ПГЗРО выравнивается и составляет 90 — 95 °С, а через 3500 лет, как отмечалось выше, практически возвращается к исходным значениям. В транспортно-технологических тоннелях (рис. 8.10 в),  $y \approx 180$  м) температура около 30 °С сохраняется вплоть до  $t = 274$  года, после чего постепенно снижается.

Как видно из результатов расчёта, температура на участке 2, даже несмотря на более высокие значения тепловыделения, оказывается несколько ниже, чем на участке 1, то есть, благодаря большому расстоянию между скважинами тепло эффективно поглощается и отводится окружающими горными породами. В связи с этим возникает вопрос, возможно ли захоронение более активных и, как следствие, более тепловыделяющих отходов. Для оценки поля температур при более интенсивном выделении тепла был проведён расчёт, в котором начальная мощность тепловыделения ВАО на втором участке составила



2 кВт/м<sup>3</sup>. Остальные параметры брались такими же, как в предыдущем расчёте. Полученное трёхмерное поле температур через 58 лет с начала заполнения ПГЗРО показано на рис. 8.11. Максимальные температуры на участке 2 здесь составляют около 138 °С, что заметно выше полученных в предположении более низкого тепловыделения. Таким образом, значительное повышение активности захораниваемых отходов в текущей конфигурации ПГЗРО представляется затруднительным. Тем не менее, при уменьшении консерватизма расчётных моделей и уточнении применяемых при строительстве и эксплуатации ПГЗРО инженерных решений можно ожидать, что удастся несколько повысить эффективность захоронения ВАО с точки зрения плотности их объёмного тепловыделения.

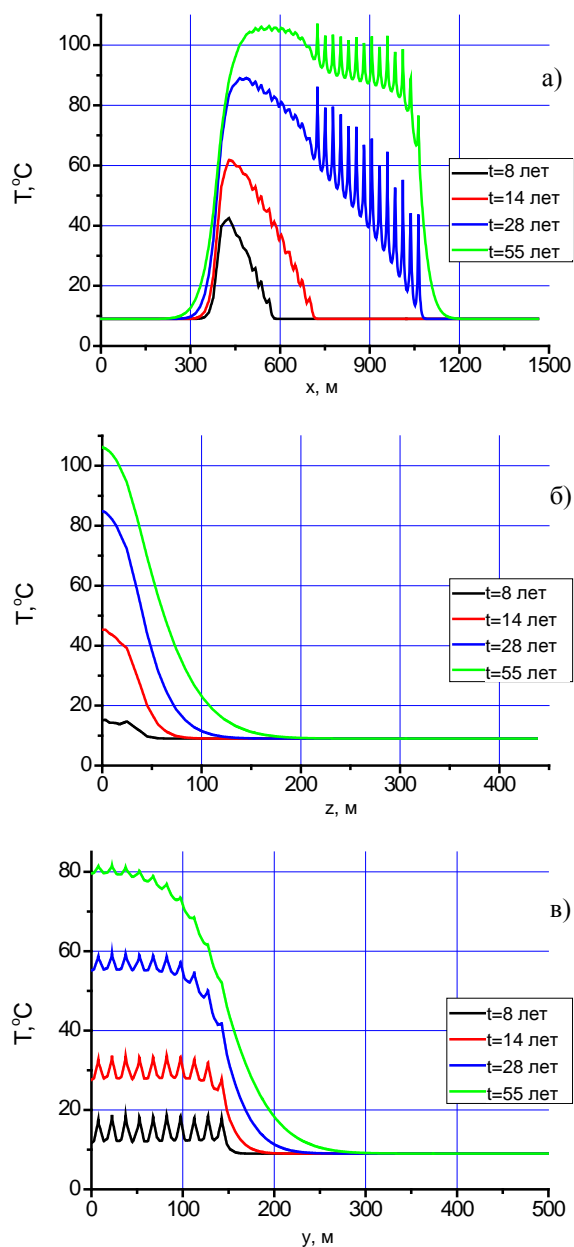


Рисунок 8.9 — Пространственные профили температур на этапе разогрева ПГЗРО.  
 а) вдоль горизонтальной оси симметрии ПГЗРО,  
 б) вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр восьмой камеры захоронения участка 1,  
 в) вдоль горизонтальной прямой, проходящей по вершинам скважин восьмой камеры захоронения участка 1

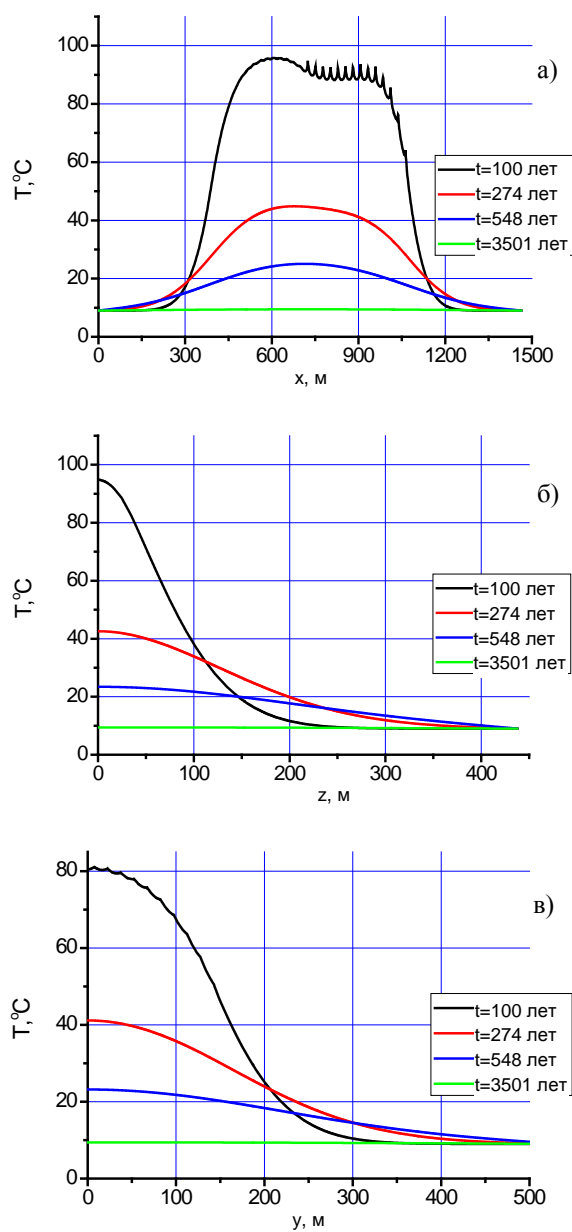


Рисунок 8.10 — Пространственные профили температур на этапе остывания ПГЗРО.  
 а) вдоль горизонтальной оси симметрии ПГЗРО,  
 б) вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр восьмой камеры захоронения участка 1,  
 в) вдоль горизонтальной прямой, проходящей по вершинам скважин восьмой камеры захоронения участка 1

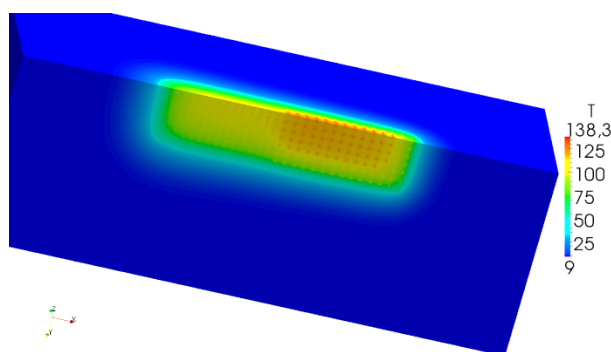


Рисунок 8.11. Расчётное поле температур в ПГЗРО при повышенном тепловыделении через 58 лет с начала заполнения

## 9 Заключение

Оценка теплового состояния является важным аспектом обоснования безопасности ПГЗРО, поскольку от температуры существенно зависят различные свойства инженерных барьеров безопасности и вмещающих горных пород: прочностные, транспортные, химические и т. д. Текущая версия разрабатываемого конечноэлементного кода FENIA позволяет рассчитывать эволюцию поля температур в ПГЗРО окружающих его горных породах в течение всего срока функционирования, то есть на протяжении тысяч лет. Проведённая на задачах, релевантных для моделирования температурного поля планируемого пункта глубинного захоронения РАО, верификация показала хорошую близость численных решений, полученных кодом FENIA, с эталонными аналитическими.

Проведённые для проекта ПГЗРО в Нижнеканском массиве расчёты показали, что в течение первых 50—70 лет эксплуатации ПГЗРО будет происходить рост температуры, при этом максимальные значения горных пород вблизи контейнеров с ВАО будут превышать 100 °С. Через 80—90 лет с начала эксплуатации начинается постепенный спад максимальных температур и выравнивание температурного поля в пределах ПГЗРО. Через 3500 лет температура в пределах всего моделируемого массива горных пород практически возвращается к исходным значениям, при этом на границах расчётной области в течение всего рассматриваемого промежутка времени не наблюдается сколько-нибудь заметного повышения температуры.

Поскольку после заполнения скважин камеры захоронения также будут использоваться, требуется, чтобы тепловой режим камер позволял проведение в них работ по крайней мере в течение нескольких лет после закупорки скважин. Оценки для камеры захоронения, расположенной в середине участка 1, показывают, что через год после закупорки скважин температура в ней поднимется до 20 °С, к моменту заполнения участка составит 25—35 °С, а на момент заполнения всего ПГЗРО достигнет 60 °С. При этом в транспортно-технологических тоннелях в течение первых десятилетий эксплуатации температура не будет превышать 30 °С.

Сравнение результатов расчётов теплового состояния для отдельной скважины и для ПГЗРО в целом показало, что на начальном этапе разогрева барьеров безопасности (до 30—50 лет с момента захоронения) для оценки поля температур во внутренних областях пункта захоронения могут использоваться результаты, полученные для отдельной скважины. Это позволяет использовать расчётные сетки, детально моделирующие ИББ и, следовательно, позволяющие более точно определять температуру в них на этапе нестационарного разогрева. Для более поздних сроков эксплуатации ПГЗРО расчёты для отдельной скважины оказываются избыточно консервативными, так как не учитывают сток тепла в горизонтальном направлении.

Для оценки возможности захоронения в рамках текущего проекта ВАО с более высоким тепловыделением был проведён расчёт, в котором начальное тепловыделение на участке 2 составляло 2 кВт/м<sup>3</sup>. Здесь максимальные температуры в объёме ПГЗРО были существенно выше и составляли более 135 °С, следовательно, значительное повышение активности и, как следствие, тепловыделения захораниваемых отходов представляется затруднительным.

Следует отметить, что в настоящее время существует значительная неопределённость исходных данных для моделирования теплового состояния ПГЗРО, что отражено в приведённых в разделе 6 значениях. С одной стороны, это связано с неоднородностью геологических структур, так как теплофизические свойства гранитоидов, слагающих Нижнеканский массив, существенно различаются. Так, удельная теп-

лопроводность образцов пород, отобранных на расстоянии нескольких сотен метров друг от друга, может различаться в три раза [15]. С другой стороны, ещё не выбраны окончательно материалы инженерных барьеров, в первую очередь — бентонитсодержащие засыпки и шликер, а также бетон изолирующих контейнеров. При этом свойства бентонита существенно зависят от месторождения, на которых добывается сырьё для его производства, а также от добавления к нему других строительных материалов, например, песка. Также в проведённых расчётах принимались некоторые консервативные упрощения, например, не учитывалась вентиляция выработок.

Для получения более точных оценок эволюции теплового состояния ПГЗРО требуется уточнение входных данных для расчётов. В первую очередь это касается свойств материалов, которые могут быть получены в рамках геологоразведочных работ, лабораторных исследований, а после сооружения подземной исследовательской лаборатории в НКМ — в результате проводимых в ней экспериментов. Естественно, полностью избавиться от неопределённости входных не представляется возможным, но сужение диапазона неопределённости и проведение многовариантных расчётов позволит получить реалистичные оценки, сохраняя уровень консерватизма, требуемый нормативными документами.

## Литература

1. Подземная исследовательская лаборатория в Нижне-Канском массиве. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://noraо.ru/about/underground/>
2. Н. С. Цебаковская и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М.: Издательство «Комтехпринт», 2015. — 208 с.
3. Н. С. Цебаковская и др. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий. Препринт ИБРАЭ № 2017-12. Москва: ИБРАЭ РАН, 2017. — 34 с.
4. Программа ANSYS. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.ansys.com/>
5. Программа MSC Nastran. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.mssoftware.com/product/msc-nastran>
6. Программа ABAQUS. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.simulia.com/>
7. Программа Plaxis 3D Dynamics. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.plaxis.ru/shop/20/info/>
8. Программа COMSOL. [электронный ресурс] — режим доступа: <https://www.comsol.com/>
9. Software | Itasca Consulting Group. [электронный ресурс] — режим доступа: <https://www.itascacg.com/software>
10. Программа code-aster. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.code-aster.org/>
11. Программа CodeBright. [электронный ресурс] — режим доступа: [https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\\_bright](https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright)
12. Программа OpenGeoSys. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.opengeosys.org/>
13. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. Учебник для физич. и механико-математ. спец. ВУЗов / В.С. Владимиров. — 4-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 1981. — 512 с.
14. R. A. Butov, N. I. Drobyshesky, E. V. Moiseenko, Yu. N. Tokarev. Finite element code FENIA verification and application for 3D modelling of thermal state of deep geological storage of radioactive waste // *Journal of Physics: Conference Series* 891 (2017), 012174
15. Андерсон Е. Б. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. — 592 с.
16. Разработка режимов хранения и окончательной изоляции ВАО с высоким тепловыделением, математическое моделирование тепловых процессов в массиве пород. Аннотационный отчет по этапу 3. Арх.№ А-12098. ОАО «ВНИПИПромтехнологии». 2010
17. Y. Liu et al. Design and validation of the THMC China-Mock-Up test on buffer material for HLW disposal // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 (2014) 119-125
18. Пособие к СНиП 3.09.01-85. Технология изготовления жаростойких бетонов. М.: Стройиздат. — 1991.
19. Бельский В.И., Сергеев Б.В. Промышленные печи и трубы. Уч. пособие, изд. 2-е. — М.: Стройиздат, 1974. — 301 с.
20. Кириллов П. Л., Терентьева М. И., Денискина М. Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Учебное справочное пособие для студентов специальностей: 14.03.05 — Ядерные реакторы и энергетические установки, 14.04.04 — Атомные электрические станции и установки / Под общ. ред. проф. П. Л. Кириллова; 2-е изд., испр. и доп. — М.: ИздАТ, 2007. — 200 с.