УДК 624.030.7:551.34:51-37

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОБЪЕКТЕ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ БИЛИБИНСКОЙ АЭС В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ

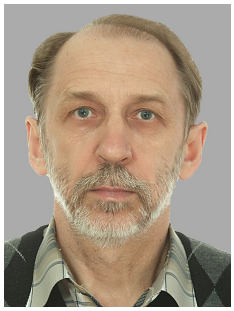
Н.Н. Мельников, П.В. Амосов, Н.В. Новожилова
Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Обсуждаются результаты численного моделирования теплового состояния многолетнемерзлых горных пород на объекте подземной изоляции ОЯТ Билибинской АЭС. Представлены возможные схемы захоронения ОЯТ в чехлах по глубине вмещающего массива. Для трехъярусного размещения чехлов выполнен анализ теплового состояния вмещающих пород с учетом фазового перехода «вода-лед» в зависимости от времени выдержки ОЯТ.

Ключевые слова:

моделирование, захоронение ОЯТ, многолетнемерзлые горные породы, учет фазового перехода «вода–лед».


Введение

Известно, что к 2020 г. все энергоблоки Билибинской АЭС (БилАЭС) будут выведены из эксплуатации, а значит, в ближайшее время должно быть принято решение о судьбе накопившегося отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), не перерабатываемого на данный момент. В 2011 г. специалистами Росатома рассматривалось три варианта обращения с ОЯТ БилАЭС [1] (хранение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в бассейнах выдержки; вывоз на переработку; захоронение в многолетнемерзлых горных породах (ММГП)). Однако в 2012 г. обсуждается только два последних.

Вариант захоронения ОЯТ экономически менее затратен и практически наиболее реализуем. Для авторов вариант с подземной изоляцией ОЯТ интересен с научной точки зрения, поскольку необходимо рассматривать тепловую задачу с учетом фазового перехода «вода–лед». В материалах открытой печати практически полностью отсутствует информация касательно теплофизических параметров объекта подземной изоляции ОЯТ и подробных результатов оценки теплового состояния вмещающего массива [2, 3]. Вместе с тем необходимо отметить, что сама проблема создания подземных объектов в условиях вечной мерзлоты и размещения тепловыделяющих радиационно опасных материалов в ММГП в достаточной мере исследована как специалистами России (Э.Д. Ершов, А.Н. Казаков, О.М. Лисицына, С.Ю. Пармузин, Н.Ф. Лобанов, А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов, и др. [4–8]), так и в мире (V.J. Lunardini, P.J. Williams, M.W. Smith и др. [9]).

Параметры модели

Вечная мерзлота в районе расположения БилАЭС создает благоприятные условия для создания опытно-промышленного объекта (ОПО) подземной изоляции ОЯТ (штольневого или скважинного типа). Как уже отмечалось выше, информация по теплофизическим моделям

ОПО весьма скудная. Выполненный авторами анализ материалов научных журналов и презентаций сотрудников «ВНИПИ промтехнологии» (Н.Ф. Лобанов [2], С.Б. Карапетян [3]), представленных на конференциях 2011–2012 гг., позволил прийти к некоторым умозаключениям, на основе которых выполнено обоснование ряда параметров теплофизической модели.

Следуя идее специалистов «ВНИПИпромтехнологии» [2, 3], 8240 ОТВС (приблизительно такое количество планируется отправить на захоронение после вывода из эксплуатации БилАЭС) можно разместить примерно в 1200 чехлах длительного хранения (ЧДХ). Габариты ЧДХ следующие: высота 4 м, диаметр 0.45 м. В свою очередь ЧДХ для варианта ОПО штольневого типа помещаются в 20 горизонтальных выработок (длина рабочей зоны порядка 155 м). Но тогда в скважинах основания каждой выработки (диаметр скважины 1 м) теоретически можно расположить 60 ЧДХ несколькими способами (параметры ММГП в районе БилАЭС позволяют использовать многоярусное размещение источников тепловыделений) (рис. 1):

- в один ярус (очень плотная упаковка; технологически сложно, нереализуема);
- в два яруса (с шагом ≈5 м);
- в три яруса (с шагом около 8 м);
- в четыре яруса (с шагом около 10 м).

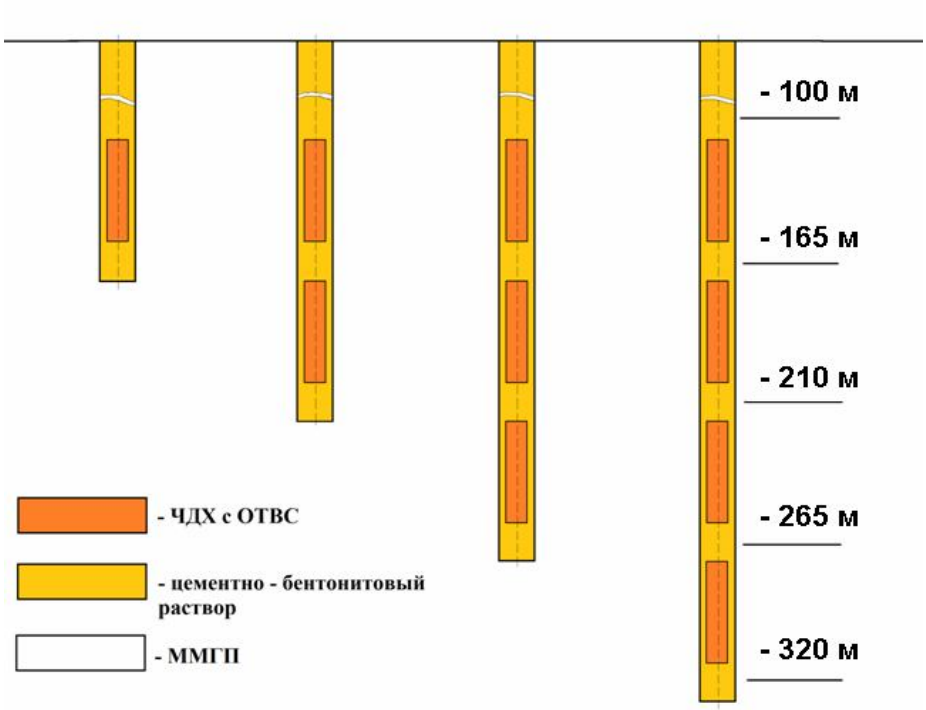


Рис. 1. Принципиальные мультиярусные схемы размещения ЧДХ с ОТВС в скважине

В выполненном исследовании оценены потенциальные области оттаивания ММГП для трехъярусного способа изоляции в зависимости от времени выдержки топлива. Авторы полагают, что представленная в работе информация касательно теплового состояния ММГП будет полезна для проектировщиков сооружений в условиях вечной мерзлоты.

Просматриваются три очевидные зоны модели (см. рис. 1): 1) ММГП; 2) материал-заполнитель в скважинах (цементно-бентонитовый раствор); 3) ЧДХ+ОТВС. Последняя область, предполагаемая в тепловой задаче гомогенной, наиболее сложна с позиций обоснования теплофизических параметров.

Анализ геометрических и массовых параметров ЧДХ и ОТВС БилАЭС [2, 3, 10], а также теплофизических свойств материалов [11], позволил авторам через «взвешивание» [12] определиться с необходимыми для модели значениями эффективных параметров зоны ЧДХ+ОТВС: коэффициент теплопроводности – 0.27 Вт/(м·К); удельная теплоемкость – 890 Дж/(кг·К); плотность – 1445 кг/м^3.

Теплофизические параметры вмещающего массива и материала-заполнителя, соответственно, выбраны следующие: коэффициент теплопроводности 1.8 и 0.8 Вт/(м·К); удельная теплоемкость – 800 и 800 Дж/(кг·К); плотность – 2200 и 1500 кг/м^3. Значение пористости ММГП установлено на уровне 10%, а материала-заполнителя – 15%.

Опираясь на данные работы [13], удалось описать с помощью степенной функции мощность остаточного энерговыделения (МОЭ) W (Вт) одной ОТВС БилАЭС через год после выгрузки из реактора $W=62.73 \cdot x^{-0.47}$, где x – годы ($x \geq 1$). Тогда кривая объемной МОЭ q_v (Вт/м^3) через год после выгрузки из реактора имеет аналитическое описание вида $q_v=690 \cdot (t+k)^{-0.47}$, где t – годы; k – время выдержки (годы).

Основным «инструментом» выполнения численных экспериментов выступал код COMSOL. В принципе, можно было воспользоваться либо программным продуктом PORFLOW, либо программой, разработанной авторами для оценки воздействия подземных атомных станций малой мощности на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Все указанные программные продукты позволяют через использование различных модельных представлений симулировать тепловые процессы с учетом фазового перехода «вода–лед». Очень похоже, что, как и в программном продукте А.Н. Казакова [6], используемые авторами коды построены в целом на близких допущениях:

- «окружающая среда предполагается макроскопически однородной по всем характеристикам, причем ее поровое пространство заполнено льдом, а после фазового перехода – водой»;
- «не учитывается зависимость теплофизических свойств горного массива от температуры как в мерзлом, так и в талом состоянии».

Например, разработчики программного продукта PORFLOW задействовали модель Wheeler J.A. [14]. Код COMSOL и собственная программа авторов реализуют широко известный прием преобразования исходной нелинейной системы уравнений к квазилинейному виду посредством ввода дельта-функции Дирака, которая при численной реализации заменяется дельта-образной функцией, отличной от нуля на интервале фазового перехода и удовлетворяющей стандартному условию нормировки. Исчерпывающее описание указанной операции, помимо классической работы А.А. Самарского и П.Н. Вабищевича [15], найдено в коллективных монографиях сотрудников Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН [7, 8]. Этот алгоритм реализован в программном продукте.

Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов, выполненных посредством указанных программ, показал приемлемую сходимость результатов численных экспериментов. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать информацию в требуемой графической форме.

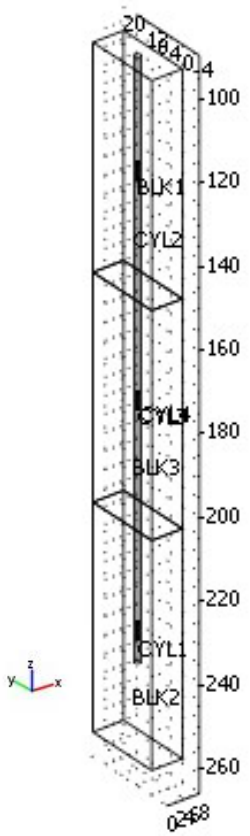


Рис. 2. Геометрический вид модели скважины с трехъярусным размещением ЧДХ с ОТВС

Для прогнозной оценки теплового состояния ММГП предлагается рассмотреть самую консервативную в тепловом отношении ситуацию. Для этого моделируется тепловое состояние вмещающего массива с единственной скважиной, содержащей «свежее» ОЯТ (топливо выводимого из эксплуатации энергоблока с не менее чем годовым сроком размещения в бассейне выдержки). Анализируемая скважина симметрично (как вдоль выработки (ось X), так и в поперечном горизонтальном направлении (ось Y)) окружена смежными аналогичными скважинами. Только в такой постановке можно достаточно физично задать краевые условия на внешних боковых поверхностях модели (см. рис. 2). Именно боковые границы, как ближайшие к источнику тепловыделений, будут в первую очередь оказывать влияние на тепловое состояние ММГП. В ситуациях несимметричного размещения ОТВС тепловая нагрузка на вмещающий массив будет меньше (через сток тепла). Требование симметричного расположения в смежных скважинах именно

«свежего» ОЯТ позволяет задавать на внешних боковых границах модели условие нулевого теплового потока. Для верхней и нижней границ модели использовано условие Дирихле – фиксированные значения температур, характерные для ММГП на глубинах -100 м и -265 м района БилАЭС: -4.3 °С и -2.2 °С соответственно.

Задание начальных условий в выполненном исследовании упрощено. В частности, вся толща ММГП разбита на 3 слоя (хорошо видно на рис. 2), в каждом из которых задавалась постоянная температура с учетом обозначенных температур на нижней и верхней границах области моделирования. Для материала-заполнителя принята температура на уровне -2 °С (предполагается, что в процессе размещения ЧДХ с ОТВС в скважине и дальнейшем запечатывании выработки материал успеет охладиться).

В проведенных расчетах временной интервал моделирования составлял 20 лет.

Анализ результатов численных экспериментов

Анализ теплового состояния ММГП осуществлялся по трем пространственным направлениям для трех значений времени выдержки ОЯТ: 1 год, 5 и 9 лет.

1. Вдоль вертикальной оси Z (расстояние между ЧДХ почти 50 м). Динамика распределения температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через все ЧДХ с ОТВС со временем выдержки в 1 год, указывает (см. рис. 3; цифры в легенде – годы), что максимальные температуры разогрева прогнозируются в области центрального ЧДХ.

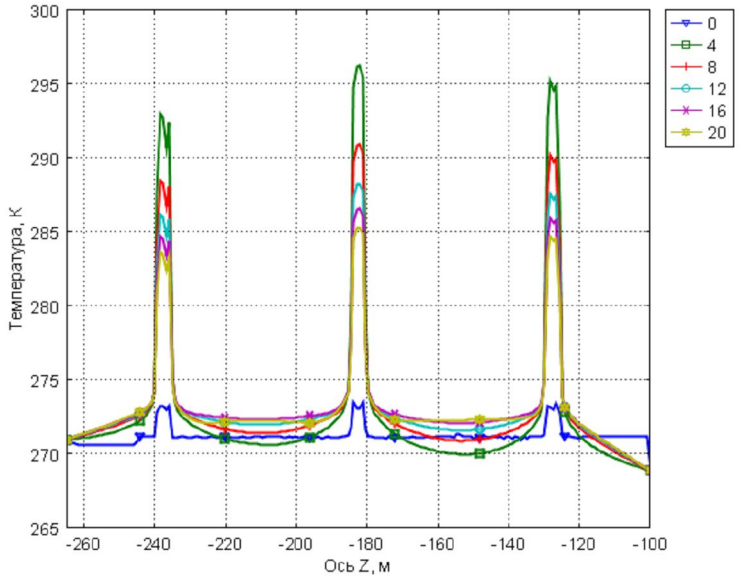


Рис. 3. Динамика пространственного распределения температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через все ЧДХ (время выдержки ОЯТ 1 год)

Отметим, что приведенная графическая информация (кривая на момент времени 0 лет) указывает на недостаточно корректное описание начальных условий в модели. В нашем случае одинаковая температура приписывается поярусно (3 слоя ММГП толщиной 55 м каждый). Чтобы обеспечить распределение профиля начальной температуры по высоте на анализируемых глубинах в соответствии с геотермическим градиентом, в используемом программном продукте потребуется использовать тонкие слои ММГП. Принципиально это реализуемо, но «утяжеляет» расчетный модуль. В данном случае, учитывая заметную удаленность источника от верхней границы (порядка 20 м) с фиксированной отрицательной температурой, это не принципиально для конечного результата.

Из анализа вертикального распределения температуры максимально «опасного» в тепловом отношении ОЯТ следует, что смыкания талых пород вдоль вертикальной оси не прогнозируется. Прекрасно видно, что состояние максимального разогрева топлива ожидается примерно через 4 года после захоронения. А вот материал-заполнитель в скважине будет подвергаться пусть и менее значительному, но разогреву в течение примерно 16 лет.

2. Вдоль горизонтальной оси Y (расстояние между выработками 20 м). Динамика пространственного распределения температуры вдоль горизонтальной оси Y (см. рис. 4) даже для минимального времени выдержки ОЯТ в 1 год свидетельствует, что смыкания талых пород межу выработками не должно быть. Максимальная глубина оттаивания в этой ситуации оценивается на уровне 5.7 м примерно через 20 лет после запечатывания. Естественно, что при бóльших временах выдержки ОЯТ значения глубины оттаивания будут снижаться.

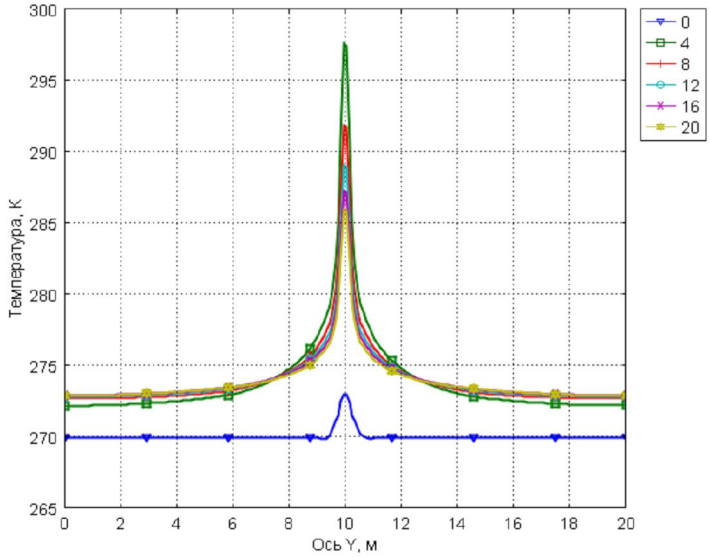


Рис. 4. Динамика пространственного распределения температуры вдоль горизонтальной оси Y (расстояние между выработками 20 м) (время выдержки ОЯТ 1 год)

3. Вдоль горизонтальной оси X (расстояние вдоль выработки между скважинами 8 м). Динамика пространственного распределения температуры представлена на рис. 5а, 5б и 5в соответственно обозначенному времени выдержки ОЯТ. Прекрасно видно, что смыкания талых пород не прогнозируется только для времени выдержки ОЯТ в 9 лет (рис. 5в). Глубина оттаивания в этой ситуации составит 2.1 м. Дополнительный расчет для времени выдержки в 7 лет показал, что и здесь также не ожидается смыкания талых пород, а глубина оттаивания увеличивается до 2.3 м.

При меньших временах выдержки топлива (1–5 лет) (см. рис. 5а и 5б) результаты моделирования свидетельствуют, что вдоль оси X произойдет смыкание талых пород смежных ЧДХ с ОТВС. Продолжительность такого смыкания при минимальном времени выдержки существенно превышает 20 лет, а при 5 годах выдержки составляет примерно 22–24 года, причем линейные размеры зон оттаивания вдоль оси X могут достигать 20 м и более.

Представленная на рис. 5а, 5б и 5в графическая информация позволяет проанализировать динамику максимальных температур в области размещения ОЯТ в зависимости от времени выдержки. Для времен выдержки ОЯТ 1 год, 5 и 9 лет прогнозируется постепенное (но не линейное) снижение максимальных температур: 300, 292.5 и 288.5 К соответственно.

Из выполненных оценок следует, что для предотвращения образования крупных областей талых пород есть смысл размещать ОЯТ БилАЭС в ОПО подземной изоляции, по крайней мере, через 7–9 лет выдержки. Именно при таком времени выдержки и принятых геометрических и теплофизических параметрах возможно образование локальных областей талых пород вблизи ЧДХ с ОЯТ на ограниченный период времени. Поскольку целостность ЧДХ на протяжении порядка 50 лет гарантирована разработчиками, то есть уверенность в обеспечении безопасной изоляции накопленной радиоактивности в ММГП района Бил АЭС.

В соответствии с исследованиями специалистов по криолитозоне [4–8], полученные результаты по температурным полям вблизи скважины захоронения ЧДХ с ОТВС позволяют говорить о том, что образование трещин или разуплотнение пород не должно иметь место. Хотя авторы указанных работ и утверждают, что принципиально возможно изменение изоляционных свойств оттаявших пород. Но этот момент не входит в цели данного исследования.

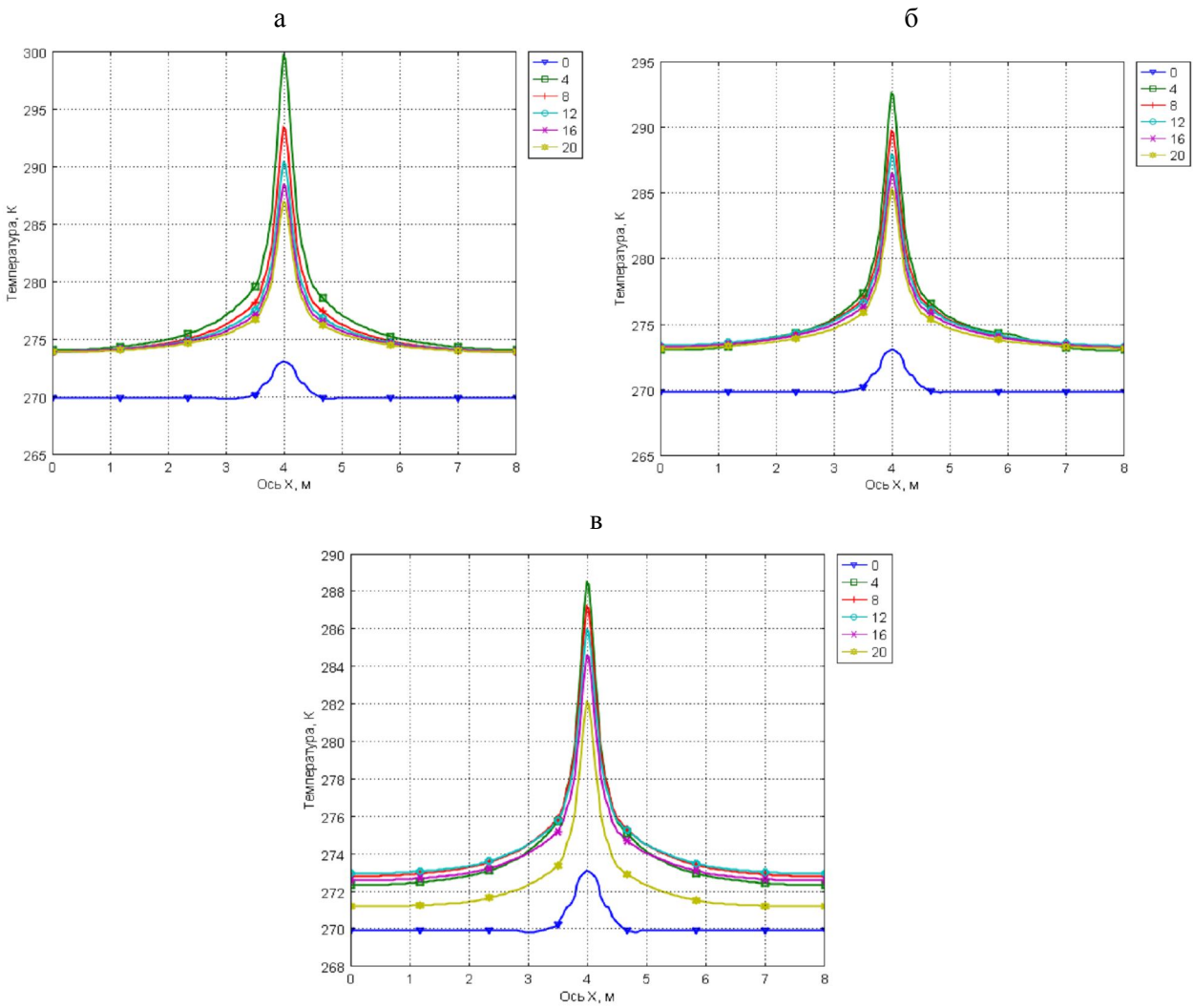


Рис. 5. Динамика пространственного распределения температуры вдоль горизонтальной оси X (расстояние между скважинами в выработке 8 м). Вариация времени выдержки: а) – 1 год; б) – 5 лет; в) – 9 лет

Кроме того, полученные авторами результаты о размерах зон оттаивания и времени выдержки ОЯТ практически совпадают со значениями указанных параметров в докладе Н.Ф. Лобанова [2]. Этот факт дает основание с определенной долей уверенности предлагать освоенный «инструмент» для анализа теплового состояния ММГП для других проектных решений (двух- или четырехъярусное размещение ЧДХ с ОТВС).

Дополнительно для коэффициента теплопроводности материала-заполнителя (время выдержки ОЯТ 1 год) определены коэффициенты чувствительности температуры этого материала вблизи всех ЧДХ вдоль вертикальной оси (см. рис. 3). Оказалось, что нормализованные коэффициенты чувствительности [16] изменяются во времени. Если для первой временно́й контрольной точки (4 года) коэффициенты чувствительности нулевые, то для 16 лет процесса моделирования их знак отрицательный, что соответствует физике процесса, а уровень значений составляет примерно 0.05%. Данный факт следует расценивать следующим образом: влияние коэффициента теплопроводности на температуру материала-заполнителя достаточно слабое. Увеличение коэффициента теплопроводности на 1% вызывает уменьшение температуры в точках наблюдения всего на 0.05%.

Благодарность

Авторы хотели бы выразить слова благодарности студентке физико-энергетического факультета КФ ПетрГУ Е.В. Резец, которая в 2012–2013 гг. принимала активное участие в начальной стадии

исследований по данной задаче и выступала с докладами на региональных студенческих конференциях.

Заключение

В работе представлены результаты анализа численных экспериментов в рамках теплофизической модели захоронения ОТВС БилАЭС в ММГП. Описаны теплофизические параметры модели для варианта трехъярусного размещения ЧДХ с ОЯТ. Проанализировано тепловое состояние ММГП в зависимости от времени выдержки ОЯТ при максимально консервативном условии: нулевые тепловые потоки на боковых поверхностях модели.

Доказано, что время выдержки ОЯТ на уровне 7–9 лет обеспечивает образование локальных областей талых пород вблизи ЧДХ на ограниченный период времени. При меньшем времени выдержки прогнозируется смыкание талых пород вдоль выработки на сроки более 20 лет.

Показано, что влияние коэффициента теплопроводности материала-заполнителя на разогрев областей вблизи ЧДХ достаточно слабое, но зависит от времени процесса моделирования: нормализованный коэффициент чувствительности прогнозируется на уровне -0.05%.

Учитывая, что полученные основные результаты по прогнозным значениям пространственно-временных распределений температуры в ММГП для трехъярусного варианта могильника не противоречат выводам ВНИПИпромтехнологии, авторы (в рамках инициативного исследования) предполагают продолжить свои изыскания теплового состояния ММГП. В частности, для рассмотренного варианта размещения ЧДХ с ОТВС весьма интересным представляется вопрос о влиянии геометрических размеров скважины захоронения на тепловое состояние ММГП. Кроме того, весьма перспективным выглядит исследование теплового состояния вмещающего массива для других вариантов размещения ОЯТ (2 яруса, 4 яруса).

ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности создания опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и РАО / *М.В. Барышников [и др.]* // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 3. С. 70–75. **2.** *Лобанов Н.Ф.* Создание опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ в толще многолетнемерзлых пород в зоне размещения Билибинской АЭС: материалы семинара КЭГ МАГАТЭ «Экономика обращения с отработавшим ядерным топливом: переработка и непосредственная изоляции», Аронсборг, Швеция, 7 октября 2011. Режим доступа: http://www.iaea.org/OurWork /ST/NE/NEFW/ Technical_Areas/WTS/CEG/CEG-Workshop-7-Oct-2011/3.5-Lobanov-Rus.pdf (дата обращения 06.11.2012 г.). **3.** Возможности создания опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и ТРО / *С.Б. Карапетян [и др.]* // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. №2. С. 133-139. **4.** Инженерная геокриология: справочное пособие / Э.Д. Ершов *[и др.]*; под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1991. 439 с. **5.** *Ершов Э.Д.* Проблемы захоронения радиоактивных отходов в криолитозоне / *Э.Д. Ершов, С.Ю. Пармузин, О.М. Лисицына* // ГЕОЭКОЛОГИЯ. 1995. № 5. С. 20–36. **6.** *Казаков А.Н.* Динамика развития теплофизических процессов при подземной изоляции тепловыделяющих РАО в многолетнемерзлых горных породах / *А.Н. Казаков, Н.Ф. Лобанов, В.И. Манькин* // ГЕОЭКОЛОГИЯ. 1997. №2. С. 36–40. **7.** Регулирование теплового режима подземных сооружений складского и специального назначения в условиях Севера / *А.С. Курилко [и др.].* Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2011. 246 с. **8.** Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны / *А.С. Курилко [др.].* Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 139 с. **9.** *Lunardini V.J.* Heat transfer in cold climates. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981. 731 p. **10.** Билибинская атомная электростанция / *В.М. Абрамов [и др.]* // Атомная энергия. 1973. Т. 85, № 5. С. 299–304. **11.** Физические величины: справочник / А.П. Бабичев [и др.]; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. **12.** Радиогеоэкологические аспекты безопасности подземного захоронения радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива на европейском севере России / *Н.Н. Мельников [и др.] Апа*титы: Изд. КНЦ РАН, 2001. 194 с. **13.** Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов: препринт / *В.И. Калинкин [и др.].* С.-Петербург: ВНИПИЭТ, 2009. 124 с. **14.** PORFLOW a software tool for multiphase fluid flow, heat and mass transport in fractured porous media. User's manual (version 3.07) / ACRi. 1997. 326 p. **15.** *Самарский А.А.* Вычислительная теплопередача / *А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич*. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с. **16.** *Амосов П.В.* Диффузионный перенос радиоактивных веществ в обводненной трещиноватой пористой среде (модель одиночной трещины) // ГЕОЭКОЛОГИЯ. 2001. №1. С. 88–93.

Сведения об авторах

Мельников Николай Николаевич – академик РАН, директор ГоИ КНЦ РАН;
e-mail: root@goi.kolasc.net.ru
Амосов Павел Васильевич – к.т.н., с.н.с., старший научный сотрудник ГоИ КНЦ РАН;
e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru
Новожилова Наталья Викторовна – младший научный сотрудник ГоИ КНЦ РАН;
e-mail: nat1966kis@mail.ru