

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГОМОДУЛЬНОЙ ПОДЗЕМНОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, С. Г. Климин

ФГБУН Горный институт Кольского научного центра РАН (Апатиты Мурманской области, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 г.

Представлены результаты численного моделирования в трехмерной постановке теплового состояния криолитозоны при размещении многомодульной атомной станции малой мощности (АСММ) в толще многолетнемерзлых горных пород. Анализируется влияние коэффициента теплопроводности обделки подземных модулей и пористости криолитозоны на тепловое состояние многолетнемерзлых горных пород и объем оттаявшей породы.

Ключевые слова: подземная многомодульная АСММ, криолитозона, пористость, коэффициент теплопроводности, тепловое состояние, объем оттаявшей породы.

Введение

Настоящая работа является естественным продолжением исследований авторов по проблеме оценки теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности (АСММ) на окружающую среду. Указанные исследования выполняются в рамках разработки научных и инженерных основ создания подземных комплексов многомодульных АСММ и методических подходов для обоснования технологий строительства подземных АСММ в условиях Арктической зоны России. Представляется, что информация о тепловом состоянии вмещающего массива будет весьма полезна специалистам в области геомеханики, которые с использованием собственных [1] геомеханических моделей смогут выполнить расчеты напряженно-деформированного состояния мерзлого породного массива с учетом перераспределения механических свойств горных пород в зависимости от изменения температурных полей вокруг модулей подземной АСММ. В монографии авторов [2] на основании начальных исследований представлены результаты решения задачи по оценке области оттаивания криолитозоны вокруг подземной АСММ с учетом фазового перехода «лед — вода» с использованием двумерных моделей. При этом рассматривалась упрощенная компоновка размещаемой

в многолетнемерзлых породах подземной АСММ: два (в отдельных выработках) реакторных модуля, реакторный зал и бассейн выдержки. В [2] приведены результаты анализа теплового состояния многолетнемерзлых горных пород (ММГП) вокруг модулей АСММ (динамика разогрева породы, глубины оттаивания в горизонтальном и вертикальном направлениях).

В последующих исследованиях авторы предприняли попытку численного решения тепловой задачи в трехмерной постановке. При этом было предложено разместить все помещения АСММ в смежных подземных камерах большого объема. В такой ситуации все необходимые внутренние защитные конструкции, разделяющие реакторные установки и турбины, а также какие-либо помещения внутри указанных объемов при оценке теплового воздействия на криолитозону роли не играют. Результаты указанных исследований нашли отражение в [3]. Примерно в это же время авторами был предложен и опробован методический подход [4; 5], позволяющий выполнять оценки некоторых параметров областей оттаивания, которые возникают в многолетнемерзлых породах при размещении в них источников тепловыделений (подземной АСММ, объектов подземного хранения/захоронения опасных тепловыделяющих отходов и др.). В основе оценки объема области оттаивания лежит интегрирование

теплофизических параметров (плотности, теплоемкости, теплопроводности) в объеме многолетнемерзлых пород с учетом различий в их значениях воды и льда. На примере упомянутых выше камер большого объема в форме прямоугольного параллелепипеда при фиксированной температуре внутри объекта через интегрирование по плотности, теплоемкости и теплопроводности выполнена оценка (в форме аналитических зависимостей) объема оттаивания и скорости объема оттаивания многолетнемерзлых пород при вариации продольного размера подземной выработки и коэффициента теплопроводности обделки.

В 2015 г. специалисты Горного института Кольского научного центра РАН в публикации [6] предложили принципиальную схему многомодульной подземной АСММ, включающей модули реакторных установок, машинного зала, технических служб и др. Именно для такого варианта размещения подземной АСММ выполнены исследования по оценке теплового состояния криолитозоны, результаты которых представлены в настоящей статье.

Целями исследования являются:

- создание компьютерной трехмерной модели процессов теплопереноса в криолитозоне с учетом фазового перехода «лед — вода» при размещении в ММГП многомодульной подземной АСММ;
- качественная и количественная оценка теплового состояния вмещающего массива и объема оттаявшей многолетнемерзлой горной породы во времени при функционировании АСММ в режиме нормальной эксплуатации с учетом вариации ряда теплофизических параметров модели (коэффициента теплопроводности обделки, пористости ММГП).

Описание компьютерной модели

Как уже отмечалось в работах авторов [2; 3], еще на этапе подготовки к исследованиям

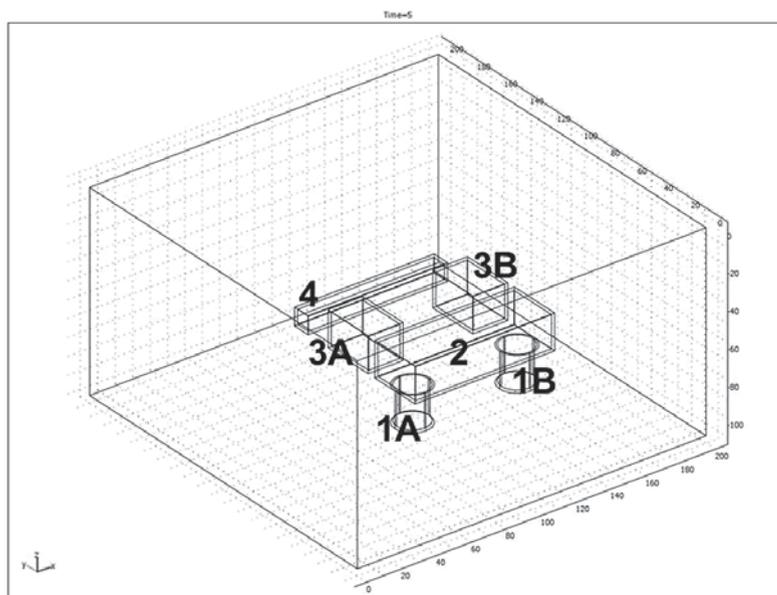


Рис. 1. Геометрическая схема многомодульной подземной АСММ в криолитозоне: 1А — модуль первой реакторной установки, 1В — модуль второй реакторной установки, 2 — модуль реакторного зала, совмещенного со спецкорпусом, 3А — модуль первого машинного зала, 3В — модуль второго машинного зала, 4 — модуль технических служб

были проведены оценки возможностей ряда программных продуктов: COMSOL (опция Conduction in Porous Media), PORFLOW (модель J. A. Wheeler), собственной программы, адаптированной для оценки воздействия АСММ на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Как и в программном продукте А. Н. Казакова, используемые авторами коды построены в целом на близких допущениях [7]:

- «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».

Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов, выполненных по указанным программам, показал приемлемую сходимость расчетных данных. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать расчетную информацию в удобной графической форме, а также оперировать рядом полезных интегрированных величин.

На рис. 1 представлена геометрическая схема размещения многомодульной подземной АСММ в слое криолитозоны мощностью 110 м. Для минимизации влияния граничных условий и с учетом производительности компьютерной техники горизонтальные размеры модели выбраны равными 200 м.

Модули подземной АСММ размещены в ММГП на глубине 50 м, как того требуют строительные нормативы Республики Саха (Якутия) [8].

В выполненном исследовании модель ММГП включает в себя один слой вмещающего массива (без учета границы сезонных колебаний) с геотермическим градиентом 0,02 °С/м. Значение пористости ММГП проварьировано: 0,05, 0,075 и 0,10.

В отличие от ранней работы авторов [2] в данной публикации обсуждается ситуация, когда температура во всех модулях АСММ фиксирована на уровне 20 °С. Как было показано ранее, именно при таких температурах в помещениях можно добиться минимальных размеров зон оттаивания ММГП. Низкие температуры в модулях могут быть обеспечены за счет специального усовершенствования системы вентиляции

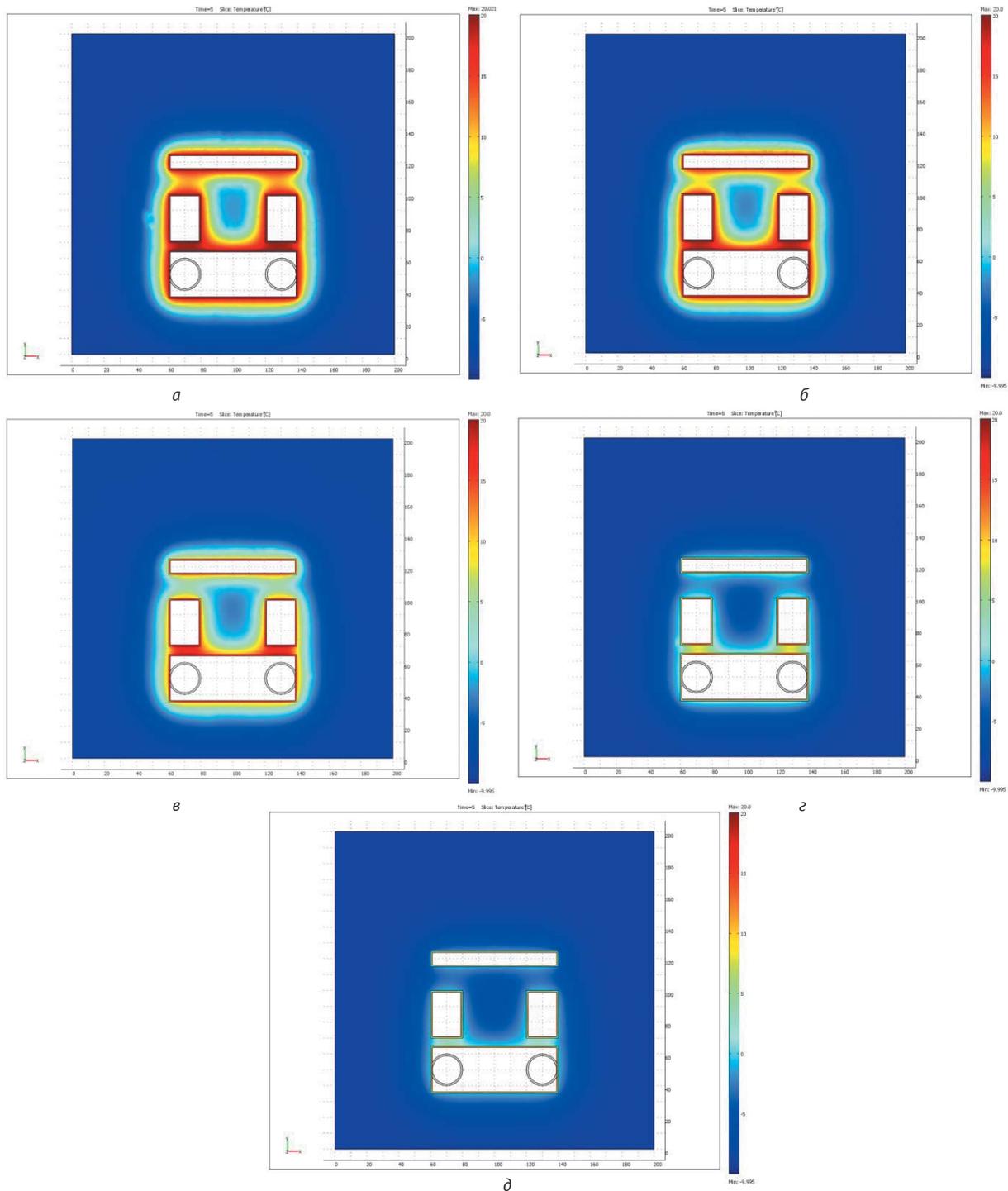


Рис. 2. Пространственное распределение изоперхностей температуры на 5 лет моделирования в сечении, проходящем через координату $z = -55$ м, при пористости ММГП 0,1 и вариации коэффициента теплопроводности обделки: а – 2,0 Вт/(м·К), б – 1,0 Вт/(м·К), в – 0,5 Вт/(м·К), д – 0,1 Вт/(м·К), з – 0,05 Вт/(м·К)

(в том числе с учетом практически неиссякаемых запасов холода).

Для решения тепловой задачи были определены граничные условия:

- на поверхности — условие третьего рода (коэффициент теплообмена $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ и температура -10°C , что примерно соответствует среднегодовой температуре в районе Билибина);

- на боковых границах — условие симметрии, т. е. нулевые потоки тепла;
- на нижней границе — фиксированная температура, определяющаяся глубиной границы и геотермическим градиентом, т. е. $-7,8^\circ\text{C}$.

Начальные условия: для ММГП задано распределение температуры в виде линейной функции с указанным выше геотермическим градиентом, для

слоев обделки принята температура 5°C.

В расчетах проварьирован коэффициент теплопроводности обделки: 2,0, 1,0, 0,5, 0,1 и 0,05 Вт/(м·К). Толщина слоя обделки принята равной 1 м.

Теплофизические параметры зон модели, которые обсуждались авторами в [2], приведены в табл. 1.

Продолжительность времени моделирования менялась: минимальная продолжительность расчета, что обусловлено серьезными затратами процессорного времени в численных экспериментах с максимальной пористостью ММГП, составляла 5 лет при временном шаге сохранения информации 0,1 года, максимальная продолжительность расчета составляла 20 лет при временном шаге сохранения информации 1 год.

Анализ результатов расчетов

Температурные поля. Приведем несколько примеров результатов численных экспериментов. Изображения пространственного распределения изоповерхностей температуры на 5 лет моделирования в горизонтальном сечении, проходящем через вертикальную координату $z = -55$ м, при максимальной пористости ММГП 0,1 и вариации коэффициента теплопроводности обделки, представлены на рис. 2.

Все изображения приведены для одной и той же температурной легенды, что дает возможность создать качественное представление о важности правильного выбора значения коэффициента теплопроводности обделки для минимизации области оттаивания. Кроме того, представленная графическая информация позволяет оценить суммарное проявление зон теплового воздействия от смежных модулей АСММ, а также температурные и площадные размеры этого воздействия на ММГП.

Высокие значения коэффициента теплопроводности обделки (2,0 и 1,0 Вт/(м·К), см. рис. 2а и 2б

Таблица 1. Теплофизические параметры зон модели

Параметр	«Скелет» ММГП	Обделка
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1,8	0,05—2,0
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	800	840
Плотность, кг/м ³	2200	2500

соответственно) позволяют получить наиболее презентабельные изображения. Хорошо видны заметные площади оттаявшей ММГП между модулями 2-3А и 2-3В, а также в пространстве между модулями 3А-4 и 3В-4. С уменьшением коэффициента теплопроводности обделки тепловое воздействие на ММГП существенно снижается. При минимальном значении коэффициента теплопроводности обделки (0,05 Вт/(м·К), см. рис. 2д) области разогрева, а значит, и оттаивания, заметно уменьшаются. При этом графическая картина становится менее презентабельной.

Более наглядным количественным индикатором являются другие виды графиков. Например, на рис. 3 представлена динамика температуры в точке контроля (70, 107,5, -55, т. е. примерно посередине между модулями 3А-4) при вариации коэффициента теплопроводности обделки. Прекрасно видно, что для больших значений коэффициента теплопроводности в точке контроля имеет место фазовый переход «лед — вода». При этом процесс фазового перехода протекает в различные моменты времени — в более ранние при большем значении коэффициента теплопроводности. В нашем случае имеем следующие результаты: 1,5, 2,1 и 3,1 года при значениях коэффициента теплопроводности обделки 2,0, 1,0 и 0,5 Вт/(м·К) соответственно. В то же время для значений коэффициента теплопроводности 0,1 и 0,05 Вт/(м·К) явления фазового перехода в рассматриваемом интервале времени не прогнозируется. Отметим, что физическое поведение графиков на рис. 3 правильное.

Объем оттаявшей породы. В отличие от [3], где форма источника была простейшей (камера большого объема), в настоящей работе рассматривается более сложная компоновка [6] подземных модулей

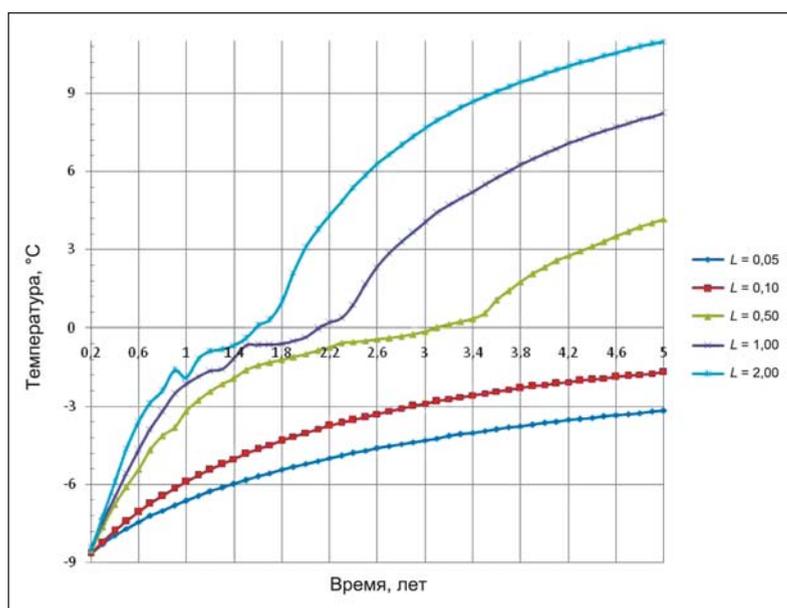


Рис. 3. Динамика температуры в точке контроля (координаты: 70, 107,5, -55) при вариации коэффициента теплопроводности обделки

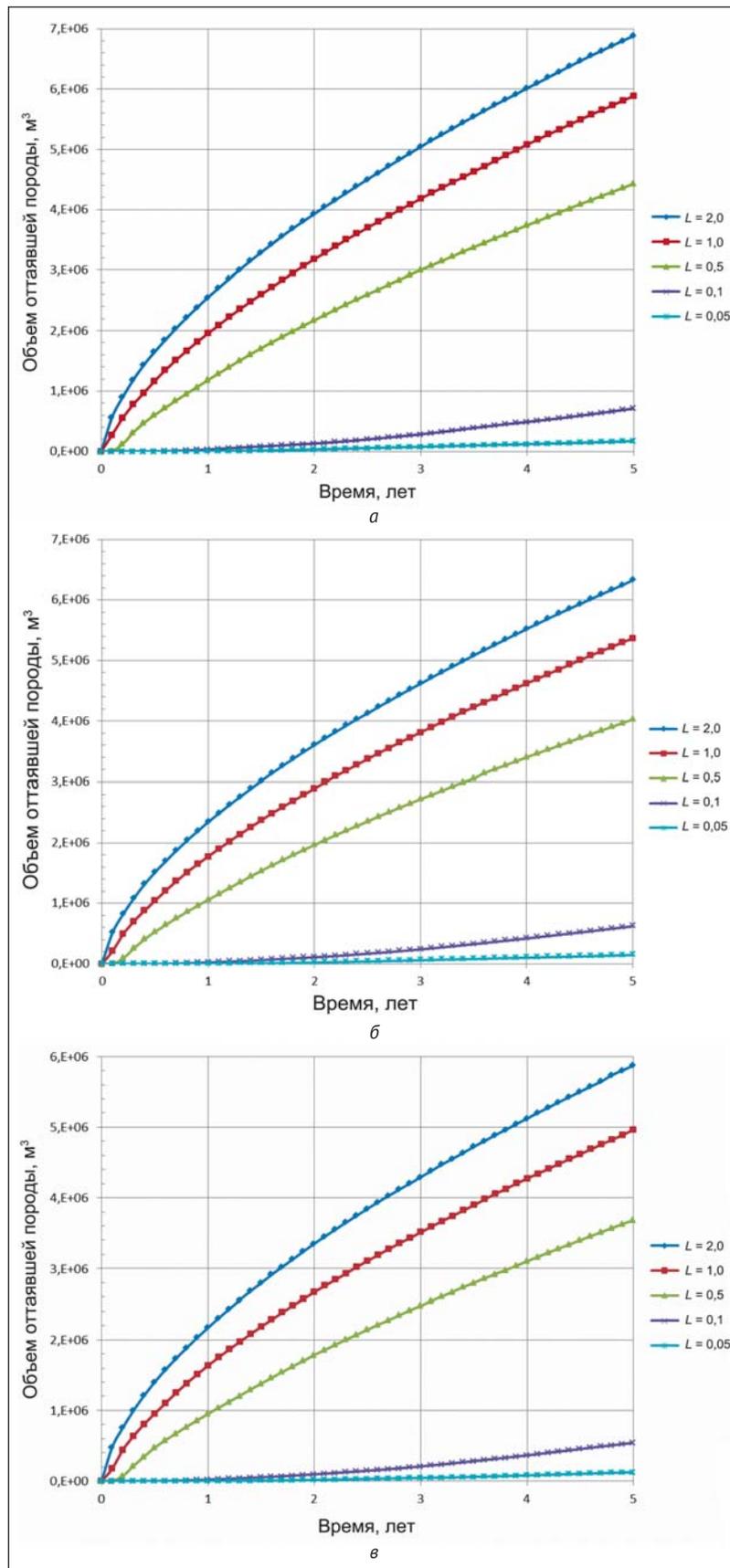


Рис. 4. Динамика объема оттаявшей породы при вариации коэффициента теплопроводности обделки (2,0, 1,0, 0,5, 0,1 и 0,05 Вт/(м·К)) и пористости ММПТ: а – 0,05, б – 0,075, в – 0,10

АСММ. Естественно, в этих условиях и форма области оттаявшей породы будет приобретать во времени более сложные очертания, что затрудняет оценку оттаявшего объема с геометрических позиций. Использование опробованного в работах [4; 5] подхода к оценке объема оттаявшей породы существенно облегчает исследование влияния важного параметра — пористости вмещающего массива — на объем оттаявшей породы в условиях сложной геометрии подземной АСММ.

Как было показано ранее [4; 5], для оценки объема оттаявшей породы удобно воспользоваться опцией программы, осуществляющей интегрирование ряда физических параметров. В частности, для области многолетнемерзлых пород удобно осуществлять контроль интегрирования такого параметра, как плотность. Известно, что плотности воды и льда различаются. А значит, при изменении объема оттаявшей породы интегрированная величина плотности (а это масса) также будет изменяться.

Продемонстрируем сказанное выше для случая, когда интеграл плотности по пространству массива дает массу. Введем необходимые обозначения: i — лед, w — вода, r — «скелет» породы. Пусть на начальный момент все поровое пространство массива V_p заполнено льдом. Тогда масса вмещающего массива есть сумма массы «скелета» породы $V_r \rho_r$ и массы льда $V_p \rho_i$. При наличии некоторого объема оттаивания на произвольный момент времени после интегрирования плотности по тому же объему получим новую большую массу, которая уже состоит из массы «скелета» породы $V_r \rho_r$ (она не изменяется), массы льда $(V_p - V_w) \rho_i$ и массы воды $V_w \rho_w$.

Очевидно, что изменение (в нашем случае — увеличение) массы обусловлено только различием в плотностях льда и воды:

$$\Delta m = [V_r \rho_r + (V_p - V_w) \rho_i + V_w \rho_w] - [V_r \rho_r + V_p \rho_i] = V_w (\rho_w - \rho_i).$$

Отношение изменения массы к разнице в плотностях воды и льда дает объем оттаивания, а поправка на пористость позволяет получить объем оттаявшей породы на рассматриваемый момент.

Эффект значений коэффициента теплопроводности обделки и пористости ММГП на объем оттаявшей породы можно хорошо проследить на графиках рис. 4а—4в. В данном случае расчеты были выполнены на срок до 5 лет, что обусловлено существенными затратами процессорного времени в расчетах с максимальной пористостью. Хорошо видно, что увеличение коэффициента теплопроводности обделки приводит к безусловному росту отслеживаемых объемов оттаявшей породы. Если при коэффициентах теплопроводности обделки на уровне 1,0 и 2,0 Вт/(мК) практически моментально начинают расти объемы оттаявшей породы, то при меньших значениях теплопроводности указанный процесс начинает запаздывать: чем меньше коэффициент теплопроводности, тем больше срок запаздывания. Второй интересный момент на представленных графиках — эффект снижения объема оттаявшей породы с ростом величины пористости ММГП. Это находится в согласии с высказанным авторами ранее утверждением [9], которое было сформулировано на основе анализа результатов работ, выполненных на базе двухмерных моделей (с ростом пористости происходит снижение глубины оттаивания). Данный результат объясняется физикой процесса: рост пористости увеличивает затраты энергии на фазовый переход «лед — вода», и при прочих равных условиях прогрев ММГП будет меньше.

В «долгоиграющих» расчетах (до 20 лет) прослежена динамика объема оттаявшей породы при тех параметрах теплопроводности обделки, которые обеспечивают вкуче с температурой внутри модулей минимум теплового воздействия подземной АСММ на ММГП, но при вариации пористости вмещающего массива. Результаты расчетов изображены на рис. 5.

Представленная информация свидетельствует, что при принятых значениях параметров модели в процессе функционирования подземной АСММ прогнозируются достаточно значительные количества объемов оттаявшей породы: порядка нескольких сотен тысяч кубических метров. Расположение графиков на рис. 5 вполне физично: внизу расположен график, отвечающий максимальной пористости. Именно при меньшей пористости, когда требуется меньшее количество теплоты на процесс растопления льда, при прочих равных условиях происходит

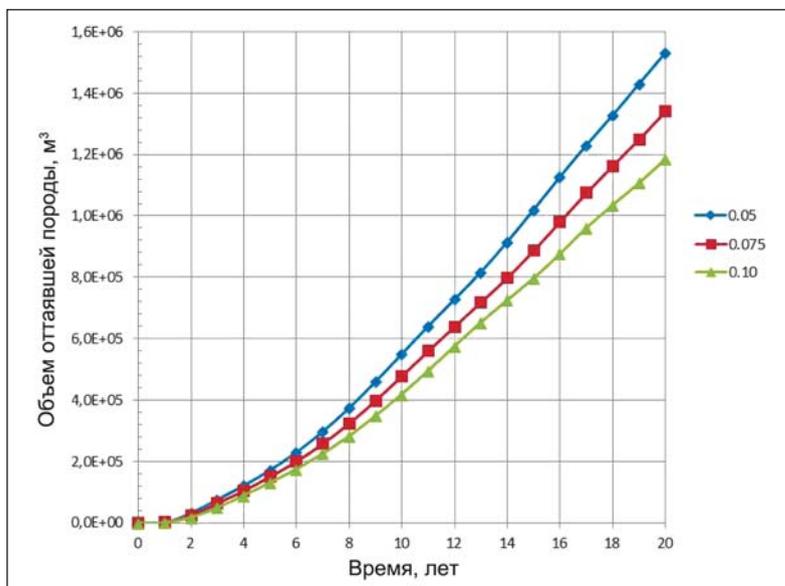


Рис. 5. Динамика объема оттаявшей породы для минимального значения коэффициента теплопроводности обделки при вариации пористости ММГП (0,05, 0,075, 0,10)

прогрев выше температуры фазового перехода большего объема породы.

Все три графика динамики объема оттаявшей породы (рис. 5) хорошо описываются с высокой степенью достоверности (0,998) посредством квадратичной функции $V1 = At^2 + Bt - C$, где $V1$ — объем оттаявшей породы, м³; t — время, годы; A , B и C — коэффициенты аппроксимации (свои для каждого значения пористости) (см. табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации квадратичной функции объема оттаявшей породы при вариации пористости многолетнемерзлых пород

Пористость	A , м³/год²	B , м³/год	C , м³
0,05	2186	36992	45319
0,075	1928	32009	40656
0,10	1669	29758	41858

Полученная аналитическая зависимость динамики объема оттаявшей породы позволяет легко получить функциональную зависимость скорости объема оттаявшей породы во времени, где $V/2$ — скорость объема оттаявшей породы, м³/год. Значение скорости объема оттаявшей породы минимально для максимального значения пористости.

Заключение

По итогам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Создана трехмерная компьютерная модель процессов теплопереноса в криолитозоне с учетом фазового перехода «лед — вода» при размещении в ММГП многомодульной подземной АСММ. Разработанная модель позволила выполнить симуляцию

распространения тепла в криолитозоне при фиксированном значении температуры в модулях АСММ и при вариации коэффициента теплопроводности обделки и пористости ММГП.

Анализ результатов численных экспериментов (на 5 и 20 лет процесса моделирования), выполненных при фиксированном значении температуры в модулях АСММ на уровне 20°C и при вариации как коэффициента теплопроводности обделки с 2,0 Вт/(мК) до 0,05 Вт/(мК), так и пористости ММГП (5%, 7,5% и 10%), в форме пространственного распределения изоповерхностей температуры по центральному сечению модели, а также динамики температуры в фиксированной точке пространства свидетельствует:

- максимальные скорости движения фронта оттаивания между модулями АСММ и максимальные объемы областей оттаивания соответствуют значениям коэффициента теплопроводности обделки на уровне 1,0 и 2,0 Вт/(мК);
- использование при строительстве обделки материалов с низкими значениями коэффициентов теплопроводности (эффективный коэффициент теплопроводности на уровне 0,05 Вт/(мК)) позволяет обеспечить целостность криолитозоны.

2. На базе численного моделирования в объемной постановке представлена реализация подхода, позволяющего выполнять достаточно строгие оценки объема оттаявшей породы, которая возникает в криолитозоне при размещении в ней источников тепловыделений (например, подземная АСММ). В основе оценки объема оттаявшей породы лежат интегрирование плотности по объему криолитозоны, а также известные различия в значениях плотности для воды и льда.

На примере варианта многомодульной подземной АСММ при фиксированных параметрах модели (температуры внутри модулей, коэффициента теплопроводности обделки и др.) выполнена оценка (в форме аналитических зависимостей) динамики объема оттаявшей породы и скорости объема оттаявших многолетнемерзлых пород при вариации пористости криолитозоны. Полученные результаты свидетельствуют: минимальному значению пористости соответствуют максимальные величины объема оттаявшей породы, что не противоречит физике процесса.

Исследования выполнены в Горном институте Кольского научного центра РАН в рамках бюджетной

темы 0232-2014-0027 «Разработка научных основ и методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности (АСММ) в условиях Арктики» (научные руководители академик РАН Н. Н. Мельников и профессор, доктор технических наук В. П. Конухин).

Литература

1. Иудин М. М. Геомеханическая модель оценки механических свойств мерзлых горных пород в массиве // Вестн. ЯГУ. — 2008. — Т. 5, № 2. — С. 40—45.
2. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Новожилова Н. В., Климин С. Г. Экология подземных объектов ядерной энергетики в условиях криолитозоны. — Ярославль: ООО «Принтхаус-Ярославль», 2015. — 119 с.
3. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г., Новожилова Н. В. Оценка области оттаивания криолитозоны при эксплуатации подземной АСММ на базе численного моделирования в трехмерной геометрии // Вестн. МГТУ. — 2016. — Т. 19, № 1/1. — С. 28—34.
4. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г. Оценка динамики размера области оттаивания криолитозоны интегрированием теплофизических параметров // Мат. методы в технике и технологиях — ММТТ. — 2016. — Т. 1. — С. 29—32.
5. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г. К вопросу оценки размера области оттаивания криолитозоны посредством интегрирования теплофизических параметров модели // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, 2016. — С. 294—298.
6. Мельников Н. Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России // Горный журн. — 2015. — № 7. — С. 23—27.
7. Казаков А. Н., Лобанов Н. Ф., Манькин В. И. Динамика развития теплофизических процессов при подземной изоляции тепловыделяющих РАО в многолетнемерзлых горных породах // Геоэкология. — 1997. — № 2. — С. 36—40.
8. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. ТСН 31-323-2002 Республики Саха (Якутия). — URL: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye_obekty_v_gornyykh_vyrobotkakh_kriolitozony_yakutii.pdf.
9. Амосов П. В., Новожилова Н. В. Влияние пористости многолетнемерзлых горных пород на глубину оттаивания // Вестн. КНЦ РАН. — 2014. — № 2 (17). — С. 58—64.

Информация об авторах

Амосов Павел Васильевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru.

Климин Сергей Гарольдович, ведущий технолог, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: klimin@goi.kolasc.net.ru.

Мельников Николай Николаевич, академик РАН, научный руководитель института, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г. Результаты численного моделирования теплового состояния криолитозоны при эксплуатации многомодульной подземной атомной станции малой мощности // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 82—90.

NUMERICAL MODELING RESULTS OF CRYOLITHIC ZONE'S THERMAL STATE WHILE EXPLOITING AN UNDERGROUND MULTI-MODULE SMALL NUCLEAR POWER PLANT

Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G.

Mining Institute of the Kola Science Center RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

Abstract

The paper gives the 3D numerical modeling results of heat-transfer processes in cryolithic zone with accounting the ice-water phase transfer when placing a multi-module underground small nuclear power plant (SNPP) with two reactor plants and required infrastructure in permafrost thickness. To perform numerical tests there was designed a 3D model of heat-transfer processes through COMSOL software (option Conduction in Porous Media). A methodical approach was described which allows assessment of volume of thawed rocks occurring in the cryolithic zone when installing there thermal-generating sources. The assessment is based on integration of density by the cryolithic zone volume and known difference in ice and water density values.

A set of thermal-physical parameter values for the model's main materials (rock matrix, lining) has been indicated as well as selected initial and boundary conditions. The calculations were performed at the fixed temperature of 20°C in the SNPP modules, at variation of a coefficient of thermal conductivity for the 1 meter lining of the SNPP modules (from 2.0 to 0.05 W/(m·K)) and at values of permafrost rocks porosity in an interval of 5-10%. For the observed boundary conditions there were determined space-time temperature distributions along the cryolithic zone space with accounting the ice-water phase transfer. Heterogeneity has been revealed in temperature distribution in the cryolithic zone's modeled object; large areas of thawed permafrost rocks have been noticed in the space between the largest SNPP modules (reactor and machinery rooms). The examples are given of the temperature dynamics in a control point located between the machinery room and a technical service module. It has been established that under the values of the coefficient of lining' thermal conductivity such as 2.0, 1.0 and 0.5 W/(m·K), the ice-water phase transfer in the control point is forecasted to be in 1.5, 2.1 and 3.1 exploitation years of the SNPP. Under smaller values of the coefficient of lining' thermal conductivity the transfer through 0°C in the control point for the five-year exploitation lifetime is not forecasted. It has been shown that under the chosen value of temperature in the SNPP modules the efficient coefficient of thermal conductivity of lining material equal to 0.05 W/(m·K) allows providing the integrity of the cryolithic zone close to the object.

The multi-module underground small nuclear power plant has been a basis to implement the approach proposed and estimate (in the form of analytical dependencies) dynamics of thawed rocks volume and velocity of thawed permafrost rocks volume at varied porosity of cryolithic zone. It has been shown that minimal values of porosity agree with maximal values of thawed rocks and this doesn't conflict with the physics of the process.

Keywords: *Underground multi-module small nuclear power plant, cryolithic zone, porosity, coefficient of thermal conductivity, thermal state, volume of thawed rocks.*

Studies have been performed by the Mining Institute KSC RAS within the budget theme 0232-2014-0027 "Development of scientific foundations and a methodology for constructing the underground complexes for disposing small nuclear power plants (SNPP) under the Arctic conditions" (research leaders: academician N. N. Melnikov, professor V. P. Konukhin).

References

1. Iudin M. M. Geomekhanicheskaya model otsenki mekhanicheskikh svoystv merzlykh gornykh porod v massive. [Geo-mechanical model of evaluation of mechanical properties of frozen rocks in massif]. Vestn. YaGU, 2008, vol. 5, no. 2, pp. 40-45. (In Russian).
2. Melnikov N. N., Amosov P. V., Novozhilova N. V., Klimin S. G. Ekologiya podzemnykh obyektov yadernoy

energetiki v usloviyakh kriolitozony. [Ecology of underground nuclear power facilities under permafrost conditions]. Yaroslavl: OOO "Printkhaus-Yaroslavl", 2015, 119 p. (In Russian).

3. Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G., Novozhilova N. V. Otsenka oblasti ottaivaniya kriolitozony pri ekspluatatsii podzemnoy ASMM na baze chislennogo modelirovaniya v trekhmernoy geometrii. [Estimation of thawing cryolithic area with numerical modeling in 3D geometry while exploiting underground small nuclear power plant]. Vestn. MGU, 2016, vol. 19, no. 1/1, pp. 28-34. (In Russian).

4. Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G. Otsenka dinamiki razmera oblasti ottaivaniya kriolitozony integrirovaniyem teplofizicheskikh parametrov. [Dynamics assessment of size of permafrost rocks thawing area]. Mat. metody v tekhnike i tekhnologiyakh. MMTT, 2016, vol. 1, pp. 29-32. (In Russian).

5. Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G. K voprosu otsenki razmera oblasti ottaivaniya kriolitozony posredstvom integrirovaniya teplofizicheskikh parametrov modeli. [On a question to assess dimensions of cryolithic zone's thawing area through integrating thermal-physical parameters of the model]. Ecological Problems of the Northern Regions and Ways for Their Solution. Proceedings of V All-Russian Conference with

foreign participants, 2016, pp. 294-298. (In Russian).

6. Melnikov N. N. Rol Arktiki v innovatsionnom razvitiy ekonomiki Rossii [Role of the Arctic region in the innovation-driven economic development of Russia]. Eurasian Mining, 2015, no. 7, pp. 23-27. (In Russian).

7. Kazakov A. N., Lobanov N. F., Mankin V. I. Dinamika razvitiya teplofizicheskikh protsessov pri podzemnoy izolyatsii teplovydelyayushchikh RAO v mnogoletnemerzlykh gornyx porodakh. [Dynamics in development of thermal-physical processes during underground isolation of heat dissipating radioactive waste in permafrost rocks]. Geocology, 1997, no. 2, pp. 36-40. (In Russian).

8. Podzemnyye obyekty v gornyx vyrabotkakh kriolitozony Yakutii. TSN 31-323-2002 Respubliki Sakha (Yakutiya). [Underground objects in mining excavations of the Yakurian cryolithic zone. TSN 31-323-2002 Sakha Republic. (Yakutia)]. Available at: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye_obekty_v_gornyx_vyrabotkakh_kriolitozony_yakutii.pdf. (In Russian).

9. Amosov P. V., Novozhilova N. V. Vliyaniye poristosti mnogoletnemerzlykh gornyx porod na glubinu ottaivaniya [Influence of permafrost porosity on thawing depth]. Vestn. KSC RAS, 2014, no. 2 (17), pp. 58-64. (In Russian).

Information about the authors

Amosov Pavel Vasilyevich, Ph.D. of Engineering Sciences, leading researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru.

Klimin Sergey Garoldovich, leading technologist, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: klimin@goi.kolasc.net.ru.

Melnikov Nikolay Nikolayevich, Academician RAS, Doctor of Engineering Sciences, professor, Research Director, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

Bibliographic description

Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G. Numerical modeling results of cryolithic zone's thermal state while exploiting an underground multi-module small nuclear power plant. The Arctic: ecology and economy, 2017, no. 2 (26), pp. 82—90. (In Russian).

© Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G., 2017