НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 45–51 **http://www.izdatgeo.ru**

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 624.039:551.34:51–37

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДЗЕМНОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Н.Н. Мельников, П.В. Амосов, С.А. Гусак, Н.В. Новожилова, С.Г. Климин

Горный институт Кольского научного центра РАН,
184209, Мурманская область, Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Россия; vosoma@goi.kolasc.net.ru

Представлен анализ результатов численных экспериментов по оценке теплового состояния многолетнемерзлых горных пород с учетом фазового перехода “лед–вода” вокруг подземной атомной станции малой мощности. Тепловая задача рассмотрена на примере гипотетического размещения реакторной установки малой мощности в труднодоступных северных регионах Восточной Сибири (Якутия, Чукотка).

Атомная станция малой мощности, многолетнемерзлые горные породы, численное моделирование, фазовый переход, тепловое воздействие

THERMAL IMPACT OF SMALL UNDERGROUND NUCLEAR PLANT ON PERMAFROST

N.N. Melnikov, P.V. Amosov, S.A. Gusak, N.V. Novozhilova, S.G. Klimin

Mining Institute of the Kola Science Center RAS,
184209, Murmansk region, Apatity, Fersman str., 24, Russia; vosoma@goi.kolasc.net.ru

Analysis of results of numerical experiments on the assessment of the permafrost thermal state taking into account the “ice–water” phase transition around small underground nuclear power plant is presented. The thermal task has been considered on the example of hypothetic location of small reactor unit in the remote northern regions of the East Siberia (Yakutia, Chukotka).

Small nuclear plant, permafrost, numerical modelling, phase transition, thermal impact

ВВЕДЕНИЕ

В ряде исследований современного состояния экономики и топливно-энергетического комплекса Восточной Сибири и Дальнего Востока определенное место отводится возможному использованию атомных станций малой мощности (АСММ). Например, в статье [*Санеев и др., 2011*], подготовленной специалистами Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева и ОАО “Магаданэнерго”, представлена карта-схема конкретных мест размещения перспективных источников малой мощности в восточных регионах, в том числе АСММ. В частности, перспективными до 2030 г. районами размещения на Востоке России атомных станций малой мощности являются ***в Республике Саха (Якутия)***: с. Юрюнг-Хая (36 МВт (эл.)) для освоения Томторского ниобий-редкоземельного месторождения; с. Усть-Куйга (30 МВт (эл.)) для разработки Кючусского месторождения золота; пос. Тикси (12 МВт (эл.)) для обеспечения энергетических нагрузок при возобновлении функционирования Северо-Восточного морского пути (заметим, что последнее становится актуальным в связи с внесенной Минрегионом в Правительство РФ государственной программы развития Арктики и Северного морского пути [*Кривошапко, 2013*]); ***в Чукотском АО***: пос. Песчаное (до 200 МВт (эл.)) для освоения одноименного полиметаллического месторождения.

Российскими специалистами в качестве базовых и перспективных для исследований по выбору технологий АСММ рассматриваются различные проекты реакторов малой мощности, например, КЛТ-40С (150 МВт (тепл.)), ВК-50 (150 МВт), АБВ-6М (38 МВт), “Унитерм” (15–50 МВт) [*Саркисов, 2011*]. Проводившиеся в течение последних 20–25 лет многочисленные разработки различных реакторных установок (РУ) для малой энергетики так и не были реализованы в этом секторе энергопотребления. Проанализировав развитие событий, специалисты Росатома и НИЦ “Курчатовский институт” сделали вывод, что основные причины лежат не в сфере проектных решений, а в области

© Н.Н. Мельников, П.В. Амосов, С.А. Гусак, Н.В. Новожилова, С.Г. Климин, 2015

планирования, организации, инфраструктуры, эксплуатации и обслуживания, ответственности и владения реакторными установками [*Кривицкий, 2005; Сидоренко, 2011*]. Так, на начало 2012 г. из базовых и перспективных РУ лицензию Госатомнадзора получила только установка КЛТ-40С для плавучей атомной станции. По сообщению от 27 ноября 2013 г. [*Получено..., 2013*], результаты инженерных изысканий в рамках запланированного строительства опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВБР-100) прошли государственную экспертизу. По мнению генерального директора ОАО "АКМЭ-инжиниринг" Владимира Петроченко, полученное заключение позволяет перейти к государственной экспертизе проектной документации на строительство энергоблока.

Одной из важных проблем применения атомных станций является обеспечение их безопасности и оценка потенциального воздействия на окружающую среду. Горный институт Кольского научного центра РАН, наряду с другими институтами Академии наук, имеет определенный научный потенциал и задел в решении вопросов обеспечения комплексной безопасности радиационно опасных объектов [*Мельников, 2010*]. На рубеже 1980–1990-х гг. Горный институт в качестве головной организации при сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими и технологическими организациями страны выполнил комплексные НИР, направленные на обоснование основных положений концепции создания в СССР подземных атомных станций в рамках Государственной научно-технической программы "Экологически чистая энергетика".

В настоящее время в Горном институте проводятся исследования, целью которых является разработка концепции, научных и инженерных основ проектирования и строительства заглубленных и подземных атомных станций малой мощности модульного типа для энергоснабжения горно-промышленных предприятий и населенных пунктов в труднодоступных регионах России. Рассматриваются некоторые районы размещения АСММ [*Мельников и др., 2013*], предназначенные для энергоснабжения горно-промышленных предприятий на перспективных месторождениях полезных ископаемых, которые практически совпадают с площадками, указанными в [*Санеев и др., 2011*].

Одной из задач, решаемых Горным институтом КНЦ РАН, является исследование теплового воздействия АСММ на вмещающие породные массивы. Речь идет о гипотетическом размещении АСММ в геологических формациях скальных и многолетнемерзлых горных пород (ММГП) в режиме нормальной эксплуатации объекта с учетом фазовых переходов и климатических особенностей потенциальных районов. С научных позиций более интересна задача, когда тепловой источник (в данном случае – модули АСММ) располагается в многолетнемерзлых горных породах (с учетом фазового перехода "лед–вода"). Результаты выполненных изысканий представлены в настоящей статье.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ АСММ И ММГП

Оценка теплового воздействия АСММ на ММГП позволяет получить представление о размерах области оттаивания вокруг подземного радиационно опасного объекта, а также определить скорость движения границы фазового перехода. При исследовании теплового воздействия станции на ММГП рассмотрен режим нормальной эксплуатации. Как отмечалось в работе [*Мельников и др., 2014*], для описания площадки размещения подземной АСММ может быть использован представительный набор теплофизических параметров. Следует отметить, что значения основных параметров, используемых при численном решении тепловых задач (геотермический градиент, граница глубины сезонных колебаний температуры, мощность ММГП, среднегодовая температура воздуха), достаточно близки, но практически всегда указываются интервалом.

Все потенциальные территории размещения АСММ относятся к районам сплошной вечной мерзлоты с температурами на глубине 10–15 м от –10 до –5 °С [*Браун, 1981*]. Для дальнейших расчетов воспользуемся данными, представленными в работе [*Карапетян и др., 2012*] (для района Билибинской АЭС, расположенной севернее пос. Песчаное). Значение границы глубины сезонных колебаний принимаем порядка 12 м, а температуру на данной глубине –6 °С. Мощность ММГП этого района составляет 250–450 м.

На основе типичного распределения температуры горных пород криолитозоны с глубиной, представленного в [*Кершенгольц и др., 2008*], сделан вывод: для выполнения численных расчетов температурных полей обязательно потребуются такие параметры, как геотермический градиент, граница глубины сезонных колебаний, мощность ММГП. В ряде расчетов важное значение имеет среднегодовая температура воздуха. Во многих публикациях по криолитозоне Сибири указано, что геотермический градиент варьируется от 0,015 до 0,025 °С/м [*Браун, 1981*; *Кершенгольц и др., 2008*; *Карапетян и др., 2012*]. Будем использовать в расчетах значение 0,020 °С/м.

По мнению авторов, для исследования вопросов теплового взаимодействия модулей подземной АСММ и теплового состояния вмещающего массива достаточно рассмотреть нестационарную тепловую задачу с учетом фазовых переходов "лед–

вода” в двумерной постановке. Схема подземной АСММ, размещаемой в ММГП на глубине не менее 50 м (согласно строительным нормативам для районов Крайнего Севера [*Подземные объекты..., 2012*]), представлена на рис. 1. Упрощенная схема подземной АСММ состоит из следующих модулей: реакторный зал (РЗ) размером 14 × 60 м, бассейн выдержки (БВ) топлива размером 4 × 10 м и два модуля с реакторными установками, размеры которых соответствуют размерам выбранных реакторов малой мощности. Расстояние между модулями РУ составляет 20 м. В принятой модели габариты модулей, указанных на рис. 1, в целом соответствуют аналогичным помещениям объектов с РУ типа КЛТ-40С.

Модель ММГП включает два слоя вмещающего массива: ММГП1 до границы сезонных колебаний (примерно 12 м, температура –6 °С) и ММГП2 нижележащий массив с постоянным геотермическим градиентом (на уровне 0,02 °С/м). Пористость ММГП1 равна 0,15, ММГП2 – 0,10.

Слой обделки толщиной 1 м (для БВ 0,5 м) и слой теплоизоляции на примере полистирола толщиной 0,5 м. Теплофизические характеристики слоев даны в табл. 1.

В отличие от [*Мельников и др., 2014*], в настоящей работе обсуждается ситуация, когда температура во всех модулях АСММ находится в диапазоне от 60 до 10 °С. Представляется, что низкие температуры могут быть обеспечены за счет усовершенствования системы вентиляции (с учетом практически неиссякаемых запасов холода).

Для решения тепловой задачи были определены граничные условия:

1) на поверхности – условие третьего рода (коэффициент теплообмена 10 Вт/(м^2·К) и температура –11,6 °С, что соответствует среднегодовой температуре в исследуемом районе);

2) на боковых границах – нулевой поток;

3) на нижней границе – фиксированная температура, определяющаяся глубиной границы и геотермическим градиентом.

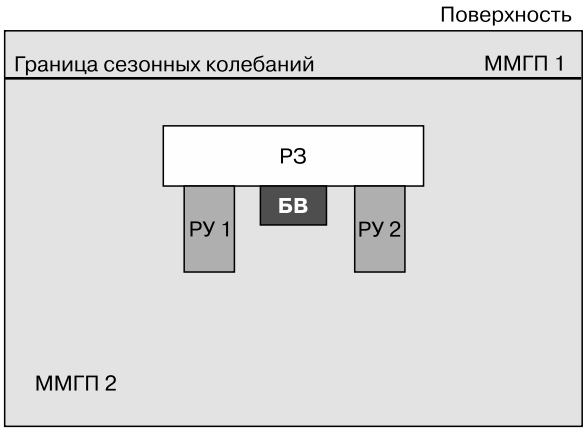

Рис. 1. Принципиальная схема модели подземной АСММ (пояснения в тексте).

ММГП – многолетнемерзлые горные породы; РЗ – реакторный зал; БВ – бассейн выдержки; РУ – реакторные установки.

Начальная температура для ММГП – температура середины слоев модели, для слоев обделки 10 °С. Период моделирования 10 лет. Дополнительно проварьирован коэффициент теплопроводности обделки λ = 2,0; 0,5; 0,05 Вт/(м·К). Рассмотрено два варианта моделей АСММ: без слоя теплоизоляции и со слоем теплоизоляции в модулях РУ.

Основным “инструментом” выполнения численных экспериментов являлся код COMSOL (фирма COMSOL). Можно было воспользоваться либо программным продуктом PORFLOW (фирма ACRi), либо программой, разработанной авторами для оценки воздействия подземных атомных станций малой мощности на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Эти программные продукты позволяют моделировать тепловые процессы с учетом фазового перехода “лед–вода”. Как и в работе [*Казаков и др., 1997*], используемые авторами коды построены на следующих 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” (*с. 38*).

Например, разработчики программного продукта PORFLOW задействовали модель J.A. Wheeler [*PORFLOW..., 1997*]. Код COMSOL и наша программа реализуют известный прием преобразования исходной нелинейной системы уравнений к квазилинейному виду посредством ввода дельта-функции Дирака, которая при численной реализации заменяется δ-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 [*2003*], авторы нашли в коллективных монографиях сотрудников Института горного дела

Таблица 1. **Теплофизические характеристики материалов**

Материал	λ, Вт/(м·К)	c_m, Дж/(кг·К)	ρ, кг/м^3
ММГП	1,8	800	2200
Обделка	2,0	840	2500
Теплоизоляция	0,03	1200	100

Примечание. λ – теплопроводность; c_m – удельная теплоемкость; ρ – плотность.

Севера им. Н.В. Черского СО РАН [*Курилко, 2011а, б*] и реализовали этот алгоритм в своей программе.

Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов, выполненных посредством указанных программ, показал их приемлемую сходимость [*Амосов, 2013*]. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать информацию в удобной графической форме.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Приведем несколько примеров результатов численных экспериментов. Графическое изображение пространственного распределения изолиний температуры со значениями –5, 0 и +5 °С по всей области моделирования при температуре 60 °С в модулях АСММ для варианта без теплоизоляции представлено на рис. 2. Коэффициент теплопроводности обделки $\lambda = 2$; 0,5; 0,05 Вт/(м·К). На рис. 3 приведено пространственное распределение тех же изолиний при температуре 10 °С для варианта, когда есть слой теплоизоляции в виде полистирола толщиной 0,5 м.

Анализ результатов расчетов показывает, что практически при всех указанных значениях теплофизических параметров поровое пространство вокруг модулей АСММ будет заполнено водой. Даже наличие слоя теплоизоляции не позволяет избавиться от воды в поровом пространстве массива вокруг модулей подземной АСММ. Самые обширные “влажные” области прогнозируются, естественно, при максимальных значениях температуры в модулях и теплопроводности обделки.

Уменьшение значений температуры и теплопроводности сокращает “влажную” область. При использовании в расчетах коэффициента $\lambda = 0{,}05$ Вт/(м·К) размер этой зоны заметно уменьшается, ее контуры приближаются к поверхностям модулей РЗ, БВ и РУ. Однако лишь при минимальных значениях обоих параметров “влажная” область практически исчезает (табл. 2).

Зная габариты модулей АСММ, несложно по данным табл. 2 оценить глубину оттаивания в горизонтальном (расстояние до изолинии 0 °С от середины левого модуля РУ) и вертикальном (расстояние вниз до изолинии 0 °С от середины основания этого же модуля) направлениях. Как графическое изображение прогнозной информации (рис. 4), так и табличная форма представления (табл. 2) убедительно демонстрируют эффект слоя теплоизоляции (его наличие и отсутствие) и влияние коэффициента теплопроводности обделки.

На рис. 4 представлены зависимости глубины оттаивания в горизонтальном и вертикальном направлениях от коэффициента теплопроводности обделки и температуры в модулях АСММ для варианта без теплоизоляции.

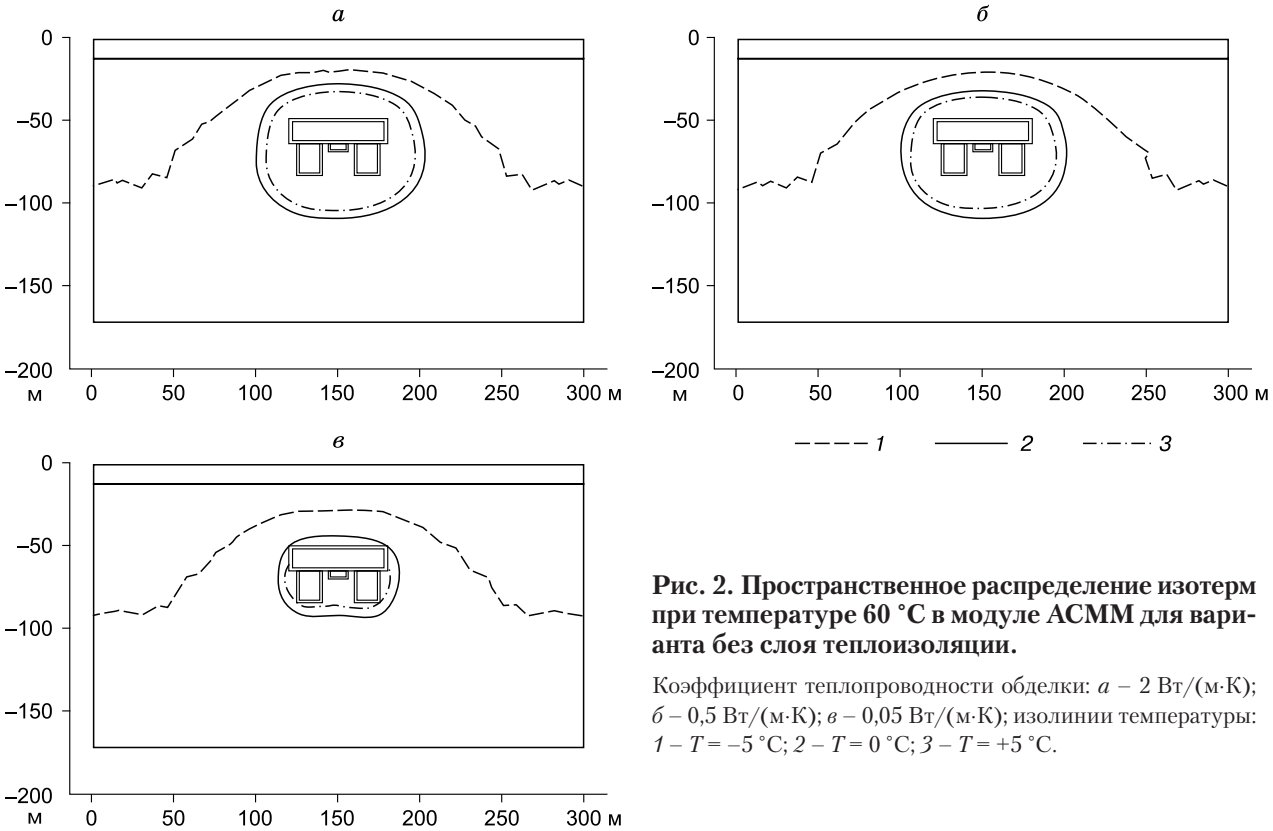

Рис. 2. Пространственное распределение изотерм при температуре 60 °С в модуле АСММ для варианта без слоя теплоизоляции.

Коэффициент теплопроводности обделки: *а* – 2 Вт/(м·К); *б* – 0,5 Вт/(м·К); *в* – 0,05 Вт/(м·К); изолинии температуры: *1* – $T = -5$ °С; *2* – $T = 0$ °С; *3* – $T = +5$ °С.

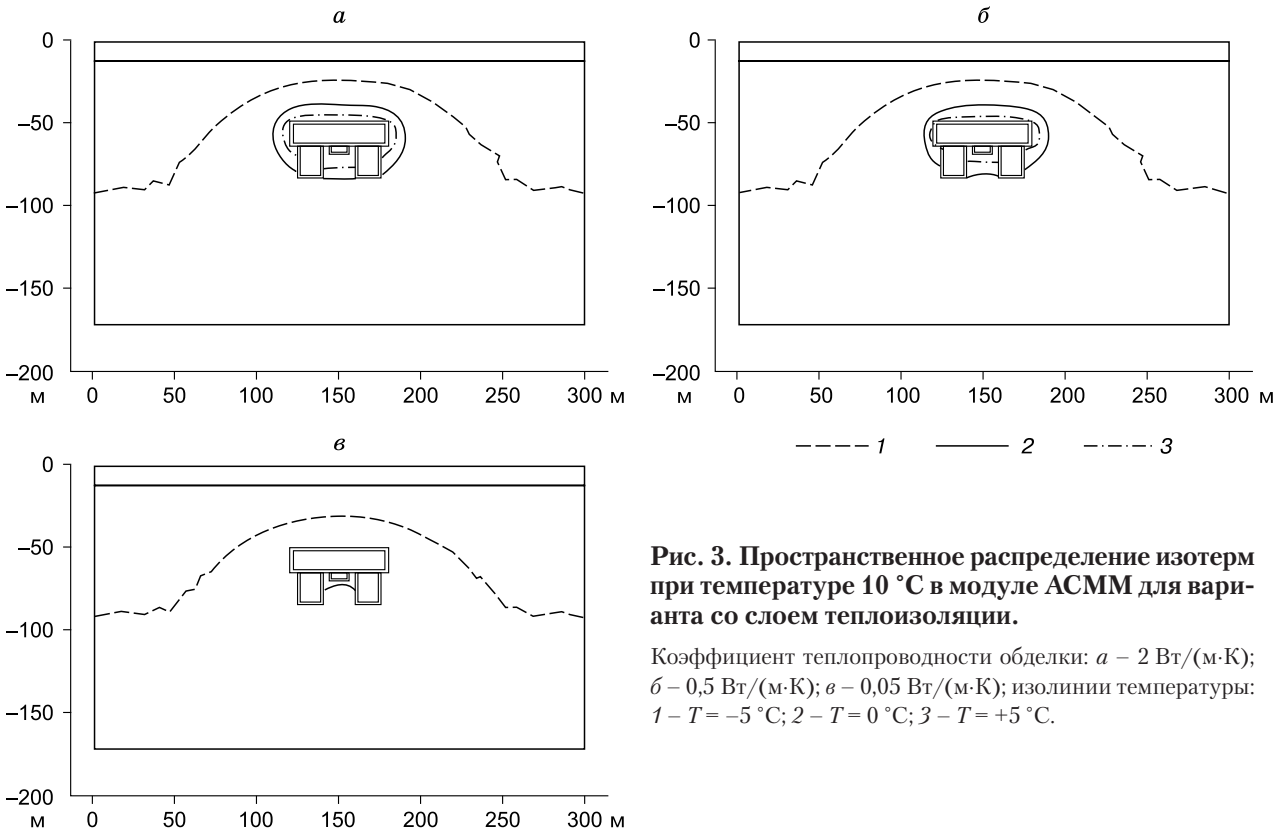

Рис. 3. Пространственное распределение изотерм при температуре 10 °С в модуле АСММ для варианта со слоем теплоизоляции.

Коэффициент теплопроводности обделки: *а* – 2 Вт/(м·К); *б* – 0,5 Вт/(м·К); *в* – 0,05 Вт/(м·К); изолинии температуры: *1* – T = –5 °С; *2* – T = 0 °С; *3* – T = +5 °С.

Отметим особенности поведения прогнозируемых глубин оттаивания:

– нелинейность отклика системы на изменения коэффициента теплопроводности;

– разная чувствительность к параметру температуры в модуле при разных значениях коэффициента теплопроводности;

– эффект сокращения горизонтального размера “влажной” области в зависимости от выбора материала при вариации коэффициента теплопроводности обделки в варианте без изоляции составляет от 26 до 32 м, тогда как в варианте с изоляцией – от 16 до 31 м;

– сокращение вертикального размера “влажной” области в зависимости от выбора материала при вариации коэффициента теплопроводности обделки в варианте без изоляции составляет от 23 до 34 м, в варианте с изоляцией – от 12 до 23 м.

Дополнительно исследовано влияние пористости ММГП на глубину оттаивания. Рассмотрен единственный модуль реакторной установки. Толщина слоя обделки 1 м. Основной параметр исследования – пористость ММГП (ε) составляет 1, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 %. Температура в модуле принята равной 60 °С.

Анализ результатов показывает, что при принятых теплофизических параметрах модели через 10 лет теплового воздействия АСММ на ММГП глубина оттаивания в горизонтальном направлении (h) описывается квадратичной функцией. При этом диапазон изменения глубины оттаивания составляет около 18 м, а сама величина по квадратичной зависимости $h = 0{,}017\varepsilon^2 - 1{,}1\varepsilon + 36{,}352$ с коэффициентом достоверности 0,986 монотонно уменьшается с 36 до 18 м для указанного интервала пористости.

Таблица 2. **Прогнозные размеры “влажной” области при вариации параметров модели для двух вариантов, м**

λ, Вт/(м·К)	$T_м$, °С	Вариант без изоляции	Вариант с изоляцией
2	60	116 × 82	108 × 68
	40	110 × 81	98 × 65
	20	100 × 70	88 × 59
	10	86 × 58	76 × 45
0,5	60	110 × 75	95 × 65
	40	106 × 72	92 × 63
	20	94 × 64	83 × 54
	10	84 × 53	68 × 43
0,05	60	86 × 50	77 × 45
	40	78 × 47	71 × 44
	20	72 × 40	61 × 39
	10	60 × 35	60 × 35

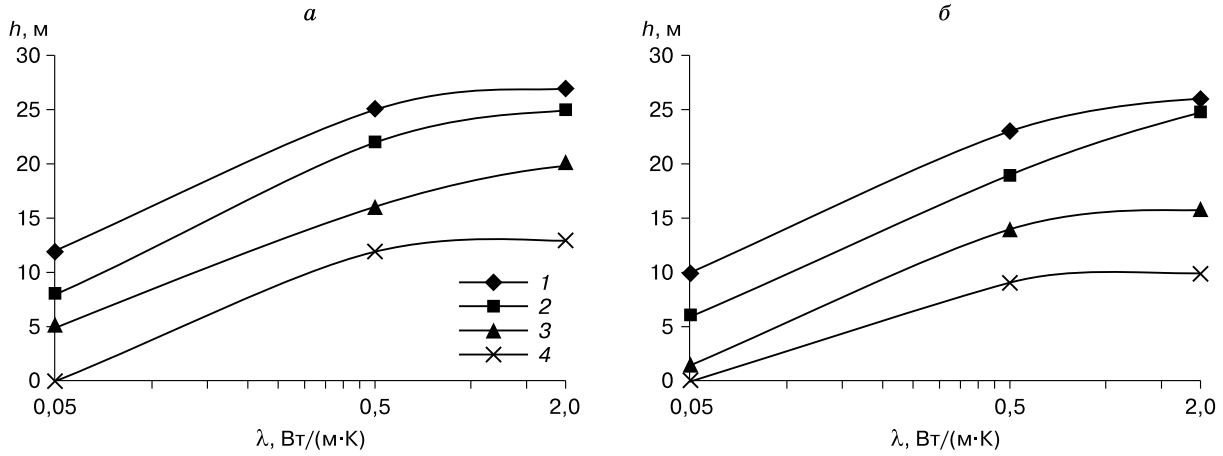

Рис. 4. Зависимость глубины оттаивания (*h*) в горизонтальном (*а*) и вертикальном (*б*) направлениях от коэффициента теплопроводности обделки (λ) и температуры модуля ($T_м$) АСММ (вариант без изоляции).

1 – $T_м$ = 60 °С; *2* – $T_м$ = 40 °С; *3* – $T_м$ = 20 °С; *4* – $T_м$ = 10 °С.

Можно констатировать, что высокое значение пористости приводит к снижению глубины оттаивания. Это объясняется существенными затратами энергии на фазовый переход “лед–вода”.

ВЫВОДЫ

По результатам представленных исследований по оценке теплового воздействия гипотетического подземного варианта размещения АСММ на вмещающие многолетнемерзлые горные породы можно сделать следующие выводы.

Построены двумерные цифровые теплофизические модели с учетом фазового перехода “лед–вода” в программе COMSOL для предлагаемых вариантов (без теплоизоляции и с теплоизоляцией модуля РУ) гипотетической подземной АСММ, размещаемой в ММГП на глубине 50 м от поверхности. Выполнены серии расчетов при вариации коэффициента теплопроводности обделки и температуры в модулях АСММ от 60 до 10 °С.

Проведен анализ результатов численных экспериментов. Спрогнозированы размеры области оттаивания вокруг модулей АСММ в рассмотренном сечении:

– максимальные размеры (~116 × 82 м) прогнозируются при использовании наиболее высоких значений теплопроводности обделки (2 Вт/(м·К)) и температуры в модулях 60 °С;

– минимальные размеры “влажной” области (на уровне геометрических характеристик модулей АСММ) обеспечиваются использованием материалов с коэффициентом теплопроводности обделки на уровне сотых долей ватта на метр-кельвин и температурой 10–20 °С в модулях АСММ.

Исследовано влияние пористости ММГП (диапазон изменения 1–30 %) на глубину оттаивания. Показано, что глубина оттаивания в горизонтальном направлении с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации описывается квадратичной функцией.

В целом результаты расчетов позволяют сделать вывод о необходимости конструктивных и горно-технических решений, направленных на снижение негативного влияния теплового фактора на физико-технические свойства вмещающих горных пород и устойчивость конструктивных элементов подземного комплекса АСММ.

Литература

Амосов П.В. Проверка кода для численного моделирования тепловых процессов в пористой среде с учетом фазового перехода “лед–вода” // Вестн. МГТУ, 2013, т. 16, № 4, с. 641–643.

Браун Дж. Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера / Дж. Браун, Н.А. Граве. Новосибирск, Наука, 1981, 88 с.

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.

Карапетян С.Б., Лопатин П.В., Парфенов В.П., Гармашева Н.В. Возможности создания опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и ТРО в толще многолетнемерзлых пород. URL: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Present12/Karapetan.ppt (дата обращения: 25.04.2012).

Кершенгольц Б.М., Иванов Б.И., Десяткин Р.В. и др. Использование естественного холода многолетнемерзлых пород для длительного хранения генетических ресурсов // Вестн. ВОГиС, 2008, т. 12, № 4, с. 524–532.

Кривицкий И.С. В роли Золушки пребывает пока в нашей стране малая энергетика // Атомная стратегия XXI, 2005, № 2 (16), с. 5–6. URL: http://www.proatom.ru/files/as16_01_08.pdf (дата обращения: 21.07.2013).

Кривошапко Ю. Лед тронулся // Российская газета, 2013, 22 нояб. (№ 264 (6240)).

Курилко А.С. Регулирование теплового режима подземных сооружений складского и специального назначения в условиях Севера / А.С. Курилко, В.В. Киселев, Ю.А. Хохолов, Е.К. Романова. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011а, 246 с.

Курилко А.С. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны / А.С. Курилко, А.С. Ермаков, Ю.А. Хохолов и др. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2011б, 139 с.

Мельников Н.Н. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на европейском севере России / Н.Н. Мельников, В.П. Конухин, В.А. Наумов и др. Апатиты, КНЦ РАН, 2010, 305 с.

Мельников Н.Н., Амосов П.В., Гусак С.А. и др. Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Арктика: экология и экономика, 2014, № 1 (13), с. 30–37.

Мельников Н.Н., Конухин В.П., Гусак С.А., Наумов В.А. Подземные атомные станции малой мощности для энергоснабжения горнопромышленных предприятий в труднодоступных регионах России // Тез. докл. XVI Межрегион. науч.-практ. конф. (Апатиты, 16–18 апр. 2013 г.). Апатиты, Изд-во КФ ПетрГУ, 2013, ч. 1, с. 38–39.

Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. ТСН 31-323-2002 Республики Саха (Якутия). URL: http:www.complexdoc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye_obekty_v_gornykh_vyrabotkakh_kriolitozony_yakutii.pdf (дата обращения: 16.04.2012).

Получено положительное заключение Главгосэкспертизы по проекту СВБР-100. URL: http://www.nuclear.ru/news/89628/ (дата обращения: 27.11.2013).

Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Франк М.И. Приоритеты использования атомных станций малой мощности на Востоке России // Атом. энергия, 2011, т. 111, вып. 5, с. 276–281.

Саркисов А.А. Новое направление развития атомных станций малой мощности // Там же, с. 243–245.

Сидоренко В.А. Задачи, проблемы и возможности создания атомной энергетики малых мощностей // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / Под ред. А.А. Саркисова. М., Наука, 2011, с. 79–87.

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.

Поступила в редакцию
20 мая 2014 г.