

## ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ГЛУБИНУ ОТТАИВАНИЯ

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

### Аннотация

Представлен анализ результатов численного моделирования по влиянию пористости многолетнемерзлых пород на глубину оттаивания при подземном размещении модуля реакторной установки малой мощности. Продемонстрировано монотонное снижение глубины оттаивания с ростом пористости породы по квадратичной зависимости.

### Ключевые слова:

*многолетнемерзлые горные породы, пористость, оттаивание.*



### Введение

В Горном институте КНЦ РАН в рамках научно-исследовательской работы (научные руководители академик Н.Н. Мельников и профессор В.П. Конухин) проводятся исследования, цель которых – разработка концепции, обоснование научных и инженерных основ проектирования и строительства заглубленных и подземных атомных станций малой мощности (АСММ) модульного типа для энергоснабжения

горнопромышленных предприятий и населенных пунктов в труднодоступных регионах России. Рассматриваются отдаленные районы Восточной Сибири [1] (Республика Саха, Чукотский АО), для которых характерны условия сплошной вечной мерзлоты.

В качестве перспективных для исследований по выбору технологий АСММ российскими специалистами рассматриваются различные проекты реакторов малой мощности, например, КЛТ-40С (150 МВт, тепл.), ВК-50 (150 МВт), АБВ-6М (38 МВт) и «УниTERM» (15-50 МВт) [2]. На начало 2012 г. из базовых и перспективных реакторных установок (РУ) лицензию Госатомнадзора получила только установка КЛТ-40С для плавучей атомной станции.

Оценка теплового воздействия АСММ на многолетнемерзлые горные породы (ММГП) необходима, поскольку для режима нормальной эксплуатации с учетом фазовых переходов и климатических особенностей регионов, где предполагается разместить реакторы, это позволяет получить представление о размерах области оттаивания вокруг подземного объекта. Результаты выполненных исследований по влиянию пористости ММГП на глубину оттаивания массива при подземном размещении модуля реакторной установки (как отдельная небольшая задача) представлены в данной публикации.

### Параметры модуля реакторной установки и ММГП

Как отмечалось в работе [3], для характеристики площадки размещения подземной АСММ на текущей стадии исследований можно использовать представительный набор теплофизических параметров. Указанные выше потенциальные территории размещения АСММ относятся к районам сплошной вечной мерзлоты с температурами от -10 до -5 °С на глубине 10–15 м [4]. Авторами рассматриваются две площадки: Томтор (Якутия) и Песчанка (Чукотка). Значения среднегодовой температуры ММГП на подошве слоя сезонного оттаивания для рассматриваемых площадок разные: для Песчанки -6 °С, для Томтора -7.5 °С. Глубина слоя также различна: для Песчанки – 12 м, для Томтора – 9 м. Геотермический градиент принят равным -0.02 °С/м.

Чтобы исследовать обсуждаемый вопрос, представляется достаточным рассмотреть нестационарную тепловую задачу с учетом фазовых переходов «лед – вода» в двухмерной постановке. Модель ММГП включает в себя два слоя вмещающего массива: 1-й слой до границы

сезонных колебаний и 2-й слой – нижележащий массив с указанным выше геотермическим градиентом.

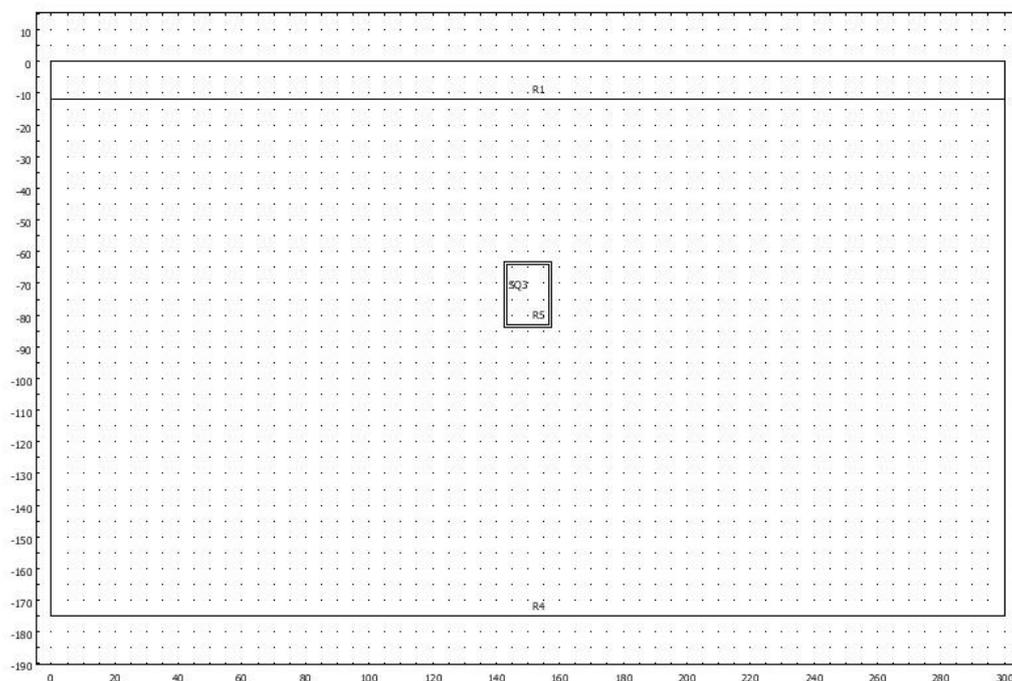


Рис. 1. Геометрическая схема задачи

В исследовании рассмотрен единственный модуль реакторной установки (с габаритами КЛТ-40С), который размещается симметрично вдоль горизонтальной оси и в отметках -84 м – -63 м вдоль вертикальной оси (рис. 1). Модуль располагается в ММГП на глубине не менее 50 м от поверхности, как того требуют строительные нормативы [5], применяемые для районов Крайнего Севера. Толщина слоя обделки равна 1 м. Теплофизические характеристики перечисленных материалов модели сведены в таблицу.

#### Теплофизические характеристики материалов

Параметры	ММГП	Обделка
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1.8	2.0
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	800	840
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2200	2500

В отличие от работы [3], в данной публикации обсуждается ситуация, когда температура в модуле проварьирована в диапазоне от 60 до 20 °С с шагом в 20 °С. Представляется, что низкие температуры можно обеспечить за счет специального усовершенствования системы вентиляции (с учетом практически неиссякаемых запасов холода).

Для решения тепловой задачи заданы следующие граничные условия:

- на поверхности – условие 3-го рода (коэффициент теплообмена 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и температура -11.6 °С (Песчанка), -14 °С (Томтор), что соответствует среднегодовой температуре в исследуемых районах) [6, 7];
- на боковых границах – условие нулевого потока;
- на нижней границе – фиксированная температура, определяемая глубиной границы и геотермическим градиентом.

Начальные условия: для ММГП – температура середины слоя модели; для слоя обделки – 10 °С. Продолжительность времени моделирования 10 лет.

Вариация основного параметра исследования пористости ММГП в области размещения модуля РУ составляла 1, 5, 10, 15, 20, 25 и 30%.

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 АСММ на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Указанные программные продукты позволяют симулировать тепловые процессы с учетом фазового перехода «вода – лед». Как и в программе А.Н. Казакова, указанные коды построены в целом на близких допущениях [8]:

- 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 посредством упомянутых программ, показал приемлемую сходимость результатов численных экспериментов [9]. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать информацию в требуемой графической форме.

### Анализ результатов

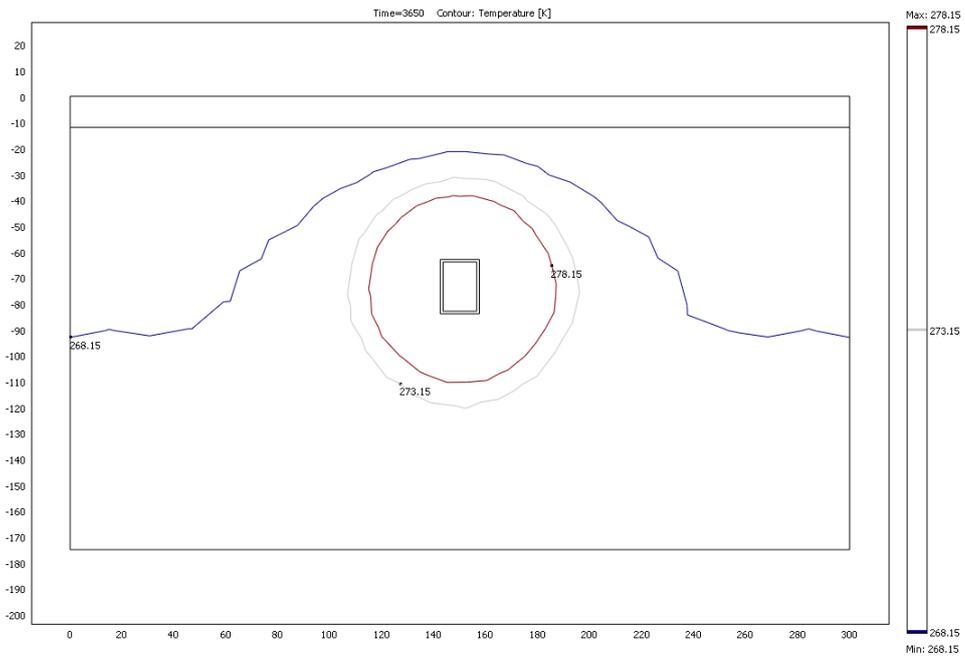
Ответ на поставленный вопрос в приближенной форме достаточно очевиден: с увеличением пористости ММГП (большее содержание льда, который требуется растопить) при прочих равных условиях относительно источника тепловыделений глубина оттаивания будет монотонно уменьшаться. Неясным остается вопрос о форме кривой, по которой предполагаемое будет уменьшаться эта глубина.

В качестве примера на рис. 2 представлены пространственные распределения изолиний температуры со значениями  $-5$ ,  $0$  и  $+5$  °С по всей области моделирования на 10 лет для района Песчанки: рис. 2а соответствует минимальной пористости (1%), а рис. 2б – максимальной (30%). Хорошо видно существенное изменение расположения изолиний  $0$  и  $+5$  °С относительно модуля РУ, в котором поддерживается температура  $60$  °С. Как видно на рис. 2, наблюдается существенное уменьшение глубины оттаивания с ростом пористости ММГП. Результаты анализа глубины оттаивания для обоих районов моделирования по всему указанному диапазону пористости приведены ниже.

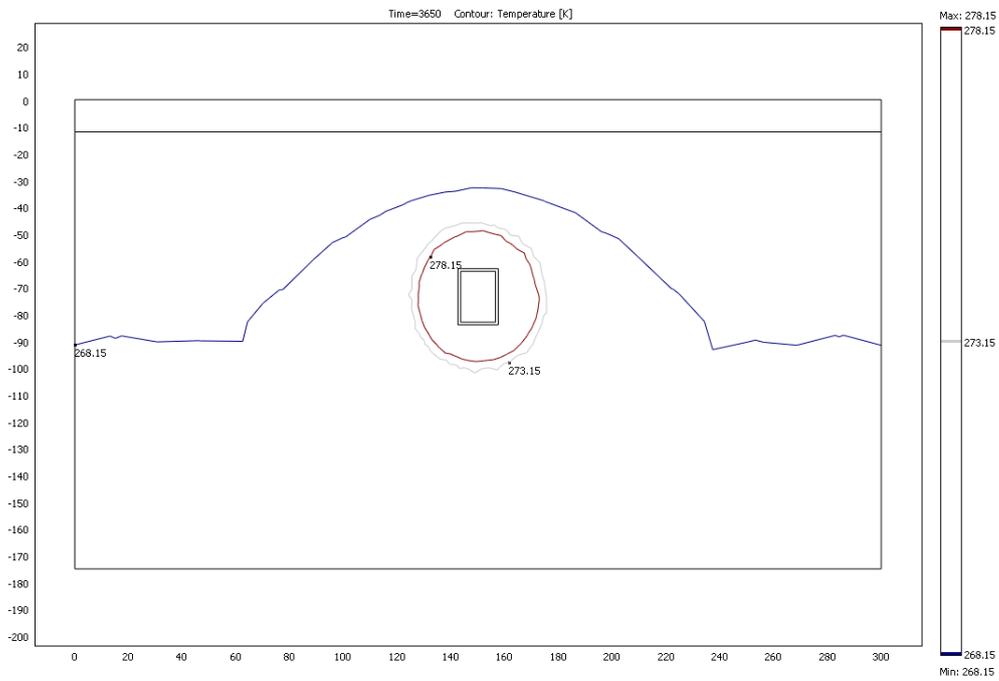
В частности, на рис. 3 представлены зависимости глубины оттаивания от пористости ММГП при температуре в модуле РУ  $60$  °С для месторождений Песчанка (а) и Томтор (б). При принятых теплофизических параметрах модели через 10 лет теплового воздействия АСММ на ММГП глубина оттаивания в горизонтальном направлении описывается квадратичной функцией для обеих выбранных площадок.

При этом диапазон изменения глубины оттаивания для Песчанки составляет почти 18 м, а сама глубина оттаивания монотонно уменьшается с 36 м до 18 м по квадратичной зависимости  $y = 0.017 \cdot x^2 - 1.1 \cdot x + 36.352$  с коэффициентом достоверности 0.986 для рассмотренного интервала пористости (рис. 3а).

Для месторождения Томтор зависимость глубины оттаивания от пористости ММГП можно выразить формулой  $y = 0.0198 \cdot x^2 - 1.2106 \cdot x + 35.937$  с коэффициентом достоверности выше, чем для месторождения Песчанка – 0.9906. Глубина оттаивания в горизонтальном направлении для этой площадки с ростом пористости также плавно монотонно снижается с 36 м до 17 м (рис. 3б).

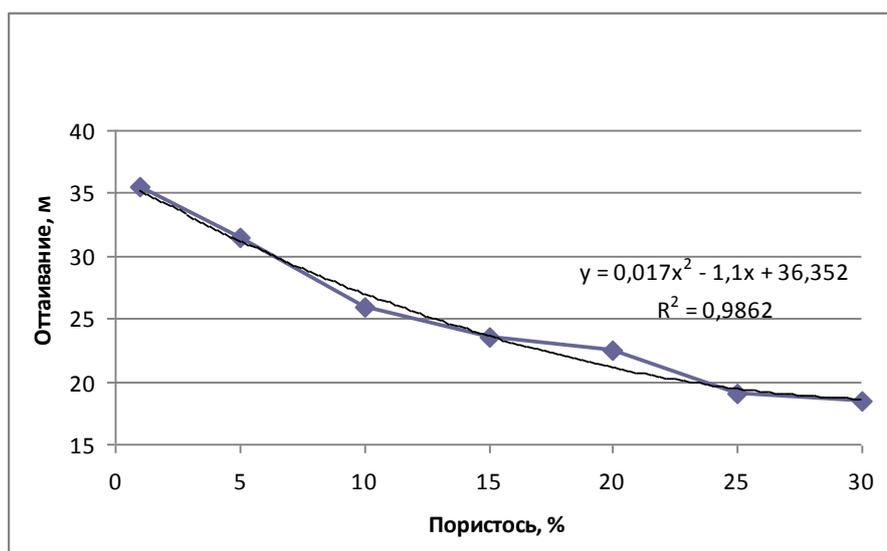


a)

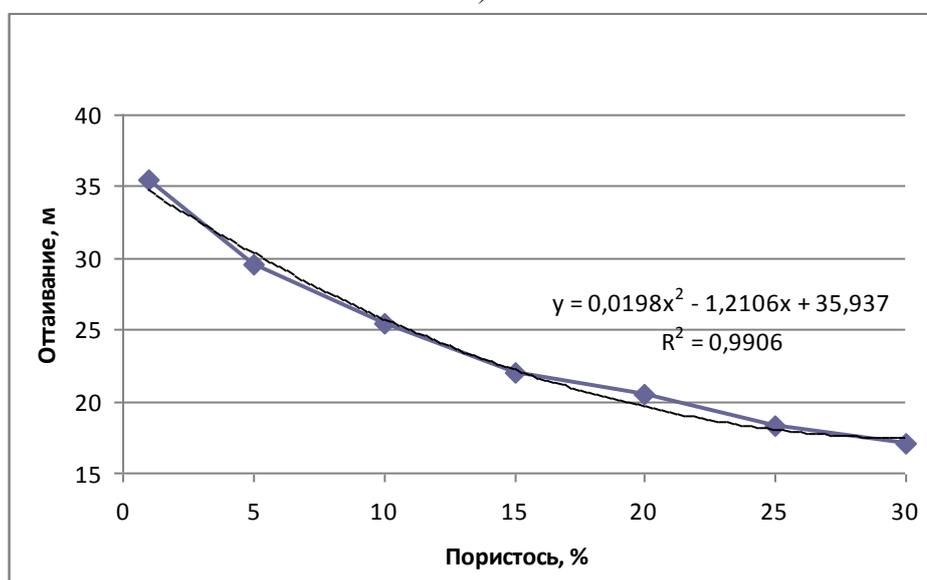


б)

Рис. 2. Пространственное распределение изолиний температуры со значениями  $-5$ ,  $0$  и  $+5$   $^{\circ}\text{C}$  по всей области моделирования района Песчанки на 10 лет при вариации пористости: а) 1% и б) 30% (температура в модуле РУ  $60$   $^{\circ}\text{C}$ )



а)



б)

Рис. 3. Зависимость глубины оттаивания ММГП в горизонтальном направлении от пористости вмещающего массива (время теплового воздействия 10 лет) для месторождений Песчанка (а) и Томтор (б) при температуре в модуле РУ 60 °С; маркеры – результаты численных экспериментов; сплошная линия – теоретическая кривая

Таким образом, высокое значение пористости действительно приводит к снижению глубины оттаивания, что объясняется существенными затратами энергии на фазовый переход «лед – вода».

#### Месторождение Песчанка

Результаты дополнительных численных экспериментов для месторождения Песчанка при других значениях температуры в модуле РУ также показывают, что высказанное выше утверждение сохраняет силу. Во всех сериях расчетов (60, 40 и 20 °С) прекрасно видно, что увеличение пористости ММГП приводит к монотонному снижению глубины оттаивания (рис. 4). Понижение температуры в модуле вызывает снижение диапазона изменения глубины оттаивания (при температуре 60 °С – 17 м, при температуре 40 °С имеем почти 15 м; при температуре 20 °С выходим примерно на 12 м).

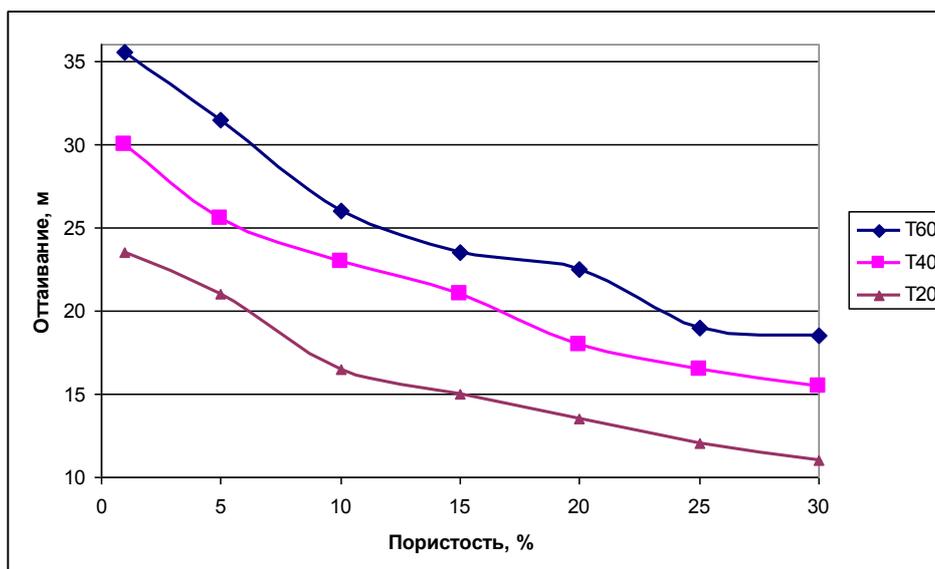


Рис. 4. Зависимость глубины оттаивания ММГП в горизонтальном направлении от пористости вмещающего массива (время теплового воздействия 10 лет) для месторождения Песчанка (в легенде указана температура в модуле РУ)

#### Месторождение Томтор

Для месторождения Томтор также была проварьирована температура в модуле РУ (60, 40 и 20 °С) для определения глубины оттаивания при различных значениях пористости ММГП. Полученные результаты показывают, что понижение температуры в модуле приводит к уменьшению диапазона изменения глубины оттаивания (при температуре 60 °С – 18 м, при температуре 40 °С ~ 16 м; при температуре 20 °С примерно 12 м) (рис. 5). При всех рассмотренных температурах в модуле РУ увеличение пористости ММГП приводит к монотонному снижению глубины оттаивания, как и на месторождении Песчанка. Разница в значениях глубины оттаивания для рассмотренных площадок при вариации пористости ММГП и температуре в модуле РУ совсем незначительна, всего 1–2 м. Причем на площадке Томтор глубина оттаивания меньше, поскольку климатические условия более суровые.

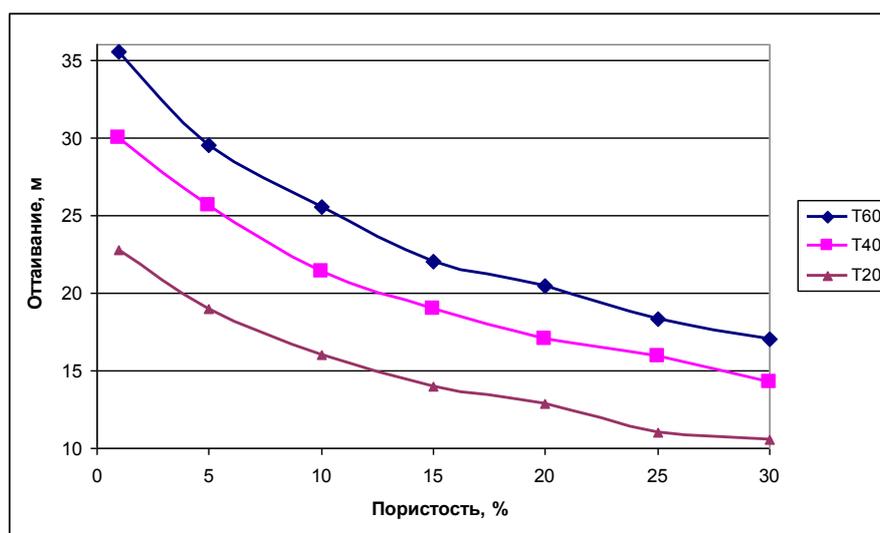


Рис. 5. Зависимость глубины оттаивания ММГП в горизонтальном направлении от пористости вмещающего массива (время теплового воздействия 10 лет) для месторождения Томтор (в легенде указана температура в модуле РУ)

### Стационарная задача

Дополнительно рассмотрена предельная ситуация по времени теплового воздействия, т.е. решена стационарная задача. Сравнительные результаты расчетных и аналитических зависимостей для двух временных интервалов функционирования теплового источника (10 лет и бесконечность) при температуре в модуле РУ 60 °С для месторождения Песчанка приведены на рис. 6. Оказалось, что и при такой постановке задачи глубина оттаивания остается монотонно убывающей функцией в зависимости от пористости ММП, но, естественно, с существенно большими значениями глубины оттаивания. Расчет показывает, что в этой ситуации значения глубины оттаивания выходят на уровень первой сотни метров. Оказалось, что в стационарной задаче теоретическая кривая с максимальным коэффициентом достоверности аппроксимации (0.9976) становится линейной. Кстати, если попытаться описать линейной зависимостью расчетные значения для нестационарной задачи (на 10 лет), то коэффициент достоверности заметно снижается – с 0.9862 до 0.9315 (ср. рис. 3а и рис. 6).

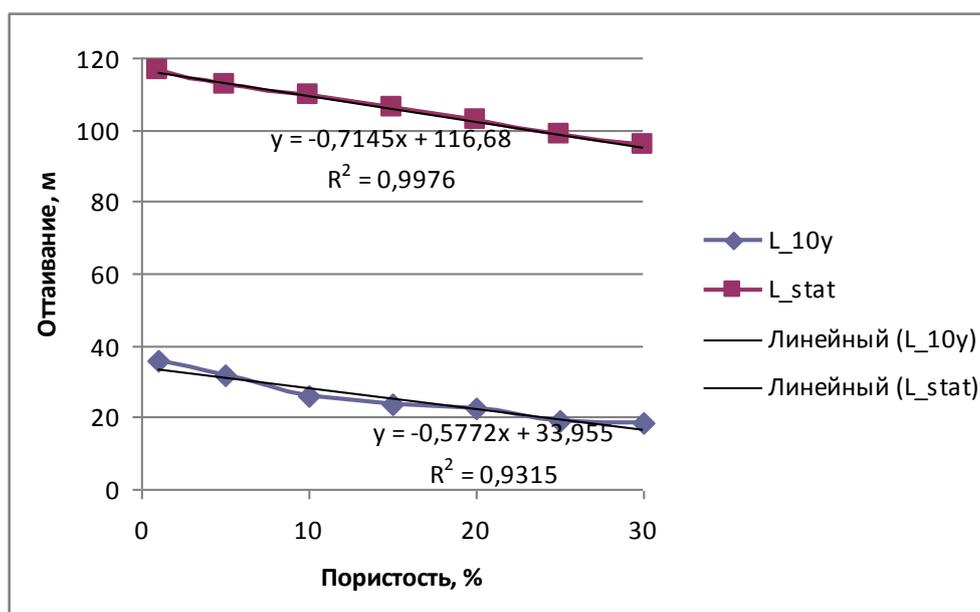


Рис. 6. Зависимость глубины оттаивания ММП в горизонтальном направлении от пористости вмещающего массива для месторождения Песчанка (время теплового воздействия 10 лет (10y) и бесконечность (stat)); маркеры – результаты численных экспериментов; сплошная линия – теоретическая кривая

### Выводы

Таким образом, поскольку высокое значение пористости обеспечивает существенные затраты энергии на фазовый переход «лед – вода», значения глубины оттаивания с ростом пористости будут снижаться. При рассмотренных параметрах модели уменьшение глубины оттаивания происходит по квадратичной зависимости. Представляется, что вид аналитических аппроксимирующих функций будет определяться, помимо рассмотренных выше параметров модели, еще геометрическими размерами и формой теплового источника.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Подземные атомные станции малой мощности для энергоснабжения горнопромышленных предприятий в труднодоступных регионах России / Н.Н. Мельников, В.П. Конухин, С.А. Гусак, В.А. Наумов // Тез. докл. XVI межрегион. науч.-практ. конф. (Апатиты, 16–18 апр. 2013 г.), Апатиты, изд-во КФ ПетрГУ. 2013. Ч. 1. С. 38–39.
2. Саркисов А.А. Новое направление развития - атомных станций малой мощности // Атомная энергия. 2011. Т. 111, вып. 5. С. 243–245.
3. Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы / Н.Н. Мельников, П.В. Амосов, С.А. Гусак, Н.В. Новожилова, С.Г. Климин // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 30–37.
4. Браун Дж. Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера / Дж. Браун, Н.А. Граве. Новосибирск. Наука. 1981. 88 с.
5. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. ТСН 31-323-2002 Республики Саха (Якутия). Режим доступа:

[http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye\\_obekty\\_v\\_gornyx\\_vyrabotkakh\\_kriolitozony\\_yakutii.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye_obekty_v_gornyx_vyrabotkakh_kriolitozony_yakutii.pdf) (дата обращения 16.04.2012). **6.** Омолон (село) – заголовок с экрана. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 10.03.2013 г.). **7.** Режим доступа: [http://www.eifs.ru/download/snir\\_23-01-99\\_klimat.pdf](http://www.eifs.ru/download/snir_23-01-99_klimat.pdf) (дата обращения 12.11.2012 г.). **8.** *А.Н. Казаков, Н.Ф. Лобанов, В.И. Манькин.* Динамика развития теплофизических процессов при подземной изоляции тепловыделяющих РАО в многолетнемерзлых горных породах // ГЕОЭКОЛОГИЯ. 1997. №2. С. 36–40. **9.** *Амосов П.В.* Проверка кода для численного моделирования тепловых процессов в пористой среде с учётом фазового перехода "лёд – вода" // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 641–643.

### **Сведения об авторах**

*Амосов Павел Васильевич* – к.т.н., с.н.с., старший научный сотрудник, Горный институт КНЦ РАН; e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru;

*Новожилова Наталья Викторовна* – младший научный сотрудник, e-mail: nat1966kis@mail.ru.