

УДК 624.131.4

Аналитическая оценка теплового воздействия заглублённой атомной станции малой мощности на многолетнемёрзлые горные породы

П.В. Амосов^{1,2}, Н.В. Новожилова¹

¹ Горный институт КНЦ РАН

² Физико-энергетический факультет КФ ПетрГУ, кафедра теплофизики

Аннотация. Представлены результаты исследования теплового воздействия модуля заглублённой атомной станции малой мощности на многолетнемёрзлые горные породы на базе аналитического подхода, разработанного Фельдманом Г.М. Приведены оценки потенциальной глубины протаивания пород при варьировании основного параметра модели – температуры реакторного помещения, а также значений нормализованных коэффициентов чувствительности к вариациям других параметров модели.

Abstract. The paper presents the study results relating thermal impact of low-power inground nuclear plant module on permafrost rocks based on the analytical approach developed by G.M. Feldman. Potential depth of rock thawing at variation of the basic model parameter – reactor room temperature, and of values of normalized sensitivity coefficients to variation of other parameters of the model has been estimated.

Ключевые слова: глубина протаивания, многолетнемёрзлые горные породы, атомная станция

Key words: thawing depth, permafrost rocks, nuclear plant

1. Введение

Исследованиями тепловых процессов в многолетнемёрзлых горных породах (ММГП) занимались многие учёные, а также инженеры-строители, непосредственно связанные с созданием объектов различного назначения в районах Крайнего Севера (Мельников П.И., Вялов С.С., Порхаев Г.В., Иванов Н.С., Фельдман Г.М., Ершов Е.Д. и др.).

В ряде исследований основной целью было создание методики расчётов тепловых полей в многолетнемёрзлых породах с использованием инженерного подхода. Например, авторы "Практического руководства по производству тепловых расчётов оснований в районах с вечномёрзлыми грунтами" (*Практическое руководство...*, 1976) ещё в далекие 70-ые годы прошлого столетия попытались создать унифицированную, максимально приспособленную для практического применения методику расчёта температурных полей грунта под естественными и искусственными тепловыми источниками наиболее типичных геометрических форм и режимов теплообмена. На взгляд авторов статьи, разработанная методика работоспособна, но всё же слишком сложна и трудоёмка, поскольку требует от проектировщиков неоднократного обращения к графическим рисункам (номограммам), к аппроксимации и интерполяции табличных значений. Всё это снижает точность конечных результатов.

В представленной работе авторы попытались оценить тепловое воздействие на ММГП заглублённым модулем атомной станции малой мощности (АСММ). Эти исследования выполняются в рамках текущей НИР, посвящённой обоснованию и разработке концепции создания заглублённых и подземных АСММ модульного типа в труднодоступных регионах России, под научным руководством академика Мельникова Н.Н. и профессора Конухина В.П. При этом в рамках сценария нормальной эксплуатации энергетического объекта предлагается применить хорошо апробированный и "прозрачный" аналитический подход, разработанный Фельдманом Г.М. (1985). Данный подход, как и руководство (*Практическое...*, 1976), содержит ряд упрощений (однородность грунта, фиксированные значения теплофизических параметров, геометрически простое описание теплового источника и др.), но позволяет сравнительно легко и точно оценить ряд важных параметров теплового состояния ММГП.

С помощью изложенного в работе (Фельдман, 1985) метода расчёта глубины протаивания для мелководного озера авторы попытались оценить мощность стационарной чаши протаивания при заглублённом размещении модуля с ядерным реактором малой мощности (например, СВБР-10). Для исследований была выбрана площадка района Билибинской АЭС, на которой в скором времени начнутся работы по выводу из эксплуатации этой АЭС (Санеев и др., 2011), а новая АСММ, после принятия принципиального решения по типу реакторной установки, возможно, придёт ей на смену.

2. Постановка задачи

В "Методических указаниях по расчёту температурного режима грунтов" *Фельдмана Г.М.* (1985) рассматривается следующая задача. Имеется мелко-водное озеро прямоугольной формы размером $2a \times 2b$. В пределах озера среднегодовая температура донных отложений равна $t_1 > 0$; вне озера среднегодовая температура ММГП на подошве слоя сезонного оттаивания $-t_2 < 0$. Значения коэффициентов теплопроводности талого (λ_m) и мерзлого ($\lambda_{\text{м}}$) грунтов различны. Геотермический градиент в талом грунте ниже подошвы толщи вечной мерзлоты g . Мощность стационарной чаши протаивания h_m под центром озера (рис. 1) определяется из решения трансцендентного уравнения (*Фельдман, 1985, с.47*):

$$a \cdot b / [h_m \cdot (h_m \cdot h_m + a \cdot a + b \cdot b)^{1/2}] = \text{tg}[-\pi \cdot (t_2 + \varepsilon \cdot g \cdot h_m) / (\varepsilon \cdot t_1 - t_2) / 2].$$

Для решения уравнения авторами реализовано два подхода: графический на основе MS Excel и численный (метод деления отрезка пополам) через программу в среде FORTRAN POWER STATION 4.0. Оба подхода верифицированы на исходных данных *Фельдмана Г.М.* (1985), что позволило их рекомендовать к использованию для оценки теплового воздействия заглублённого модуля АСММ на ММГП.

Среди обширного перечня реакторных установок, рекомендуемых разработчиками и специалистами для применения на АСММ для удалённых и труднодоступных районов страны, есть проект блочно-модульной атомной теплоэлектроцентрали с реактором на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВБР-10 "Ангстрем" (*Кудрявцев, 2010*)). Существует проект транспортабельного реакторного блока с рассматриваемым реактором как функционально законченного реакторного отделения полностью заводского изготовления. Предполагается, что транспортабельный реакторный блок доставляется на площадку станции и вывозится с площадки для перегрузки активной зоны (например, водным транспортом) в ядерно-безопасном состоянии с "замороженным" в реакторе теплоносителем. Некоторые массово-размерные характеристики транспортабельного реакторного блока следующие: диаметр/высота – 8,0/11,2 м и масса с СВТ – 310 т.

На текущей стадии исследований предлагается для заглублённого (но не подземного!) варианта размещения реакторного модуля АСММ использовать приближение *Фельдмана Г.М.* (модуль замещает озеро) при следующих значениях параметров модели:

- инженерное сооружение представлено из условия эквивалентности площади поперечного сечения квадратом $2a = 2b = 7$ м;
- в пределах реакторного модуля температура t_1 проварьирована в диапазоне от 30 °С до 60 °С;
- вне блока для ММГП зафиксирована температура $t_2 = -5,3$ °С (*Лобанов, 2011*);
- значения коэффициентов теплопроводности талого λ_m и мерзлого $\lambda_{\text{м}}$ грунтов равны значениям коэффициентов теплопроводности пород, характерных для района площадки ($\varepsilon = 0,7$);
- геотермический градиент $g = 0,02$ °С/м.

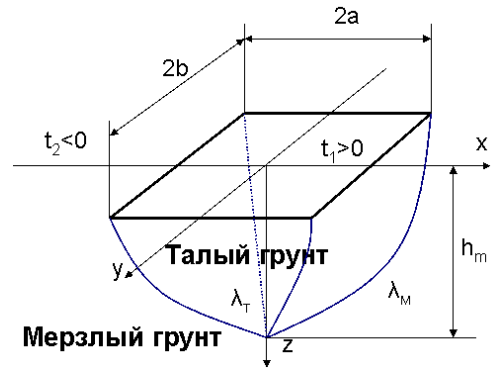


Рис. 1. Концептуальная схема модели в трёхмерной постановке

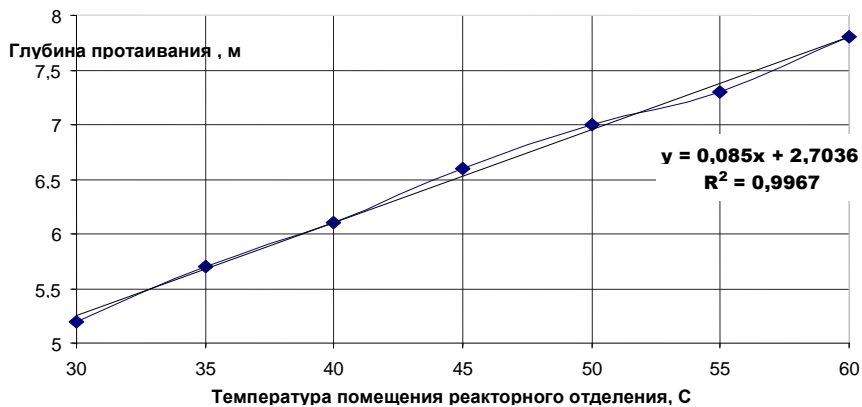


Рис. 2. Зависимость глубины протаивания под центром модуля АСММ от температуры в помещении реакторного отделения

3. Анализ результатов

Посредством освоенных подходов выполнена серия расчётов глубины протаивания h_m при вариации температуры t_1 в помещении модуля с шагом 5 °С. Результаты расчётов свидетельствуют, что глубина протаивания с повышением температуры в модуле увеличивается: при температуре 30 °С мощность стационарной чаши протаивания в ММГП составляет около 5 м, при 60 °С глубина протаивания увеличивается в 1,5 раза. Полученные значения h_m представлены на рис. 2 в виде графика зависимости глубины протаивания под центром модуля АСММ от температуры в помещении реакторного отделения. График функции h_m хорошо описывается линейной функцией $h_m = 0,085t_1 + 2,704$ с высоким коэффициентом корреляции (0,9967) в указанном выше интервале температуры модуля.

Заметим, что если на момент инженерных изысканий будет известна мощность стационарной чаши протаивания под центром модуля, то, следуя методологии *Фельдмана Г.М.* (1985), появится возможность определить направление и скорость движения границы фазовых переходов.

Дополнительно выполнена оценка нормализованных коэффициентов чувствительности глубины протаивания по другим параметрам модели: температура t_2 ММГП, отношение ε коэффициентов теплопроводности талого и мёрзлого грунтов, поперечный размер модели a ($t_1 = 45$ °С).

Значения нормализованных коэффициентов чувствительности рассчитаны посредством известного соотношения (*Амосов, Подшивалова*, 2010):

$$k_j = [(h_m^* - h_m^0) / h_m^0] / [(p_j^* - p_j^0) / p_j^0],$$

где h_m^0 – значение глубины протаивания при базовом наборе параметров p_j^0 ; h_m^* – значение глубины протаивания при изменении единственного параметра p_j^* . При этом весьма удобно изменение параметра выбирать на уровне 1 %.

Оказалось, что при приблизительно одинаковых значениях модулей коэффициентов чувствительности (на уровне 0,553-0,556) для двух первых параметров вариации их знаки противоположны: "минус" для 1-го параметра и "плюс" для 2-го. Очевидно, что результаты оценки соответствуют физике процесса. Действительно, чем ниже температура ММГП, тем меньше окажется и глубина протаивания. В то же время рост теплопроводности талого грунта приводит к более "лёгкому" проникновению тепла в мёрзлый грунт. Относительно 3-го параметра можно отметить, что именно к его изменению глубина протаивания оказалась наиболее чувствительной (+1,012), что также представляется весьма физичным. Действительно, при прочих равных условиях именно более габаритное сооружение обеспечит под его центром рост глубины протаивания.

4. Заключение

На основе небольшого проведённого исследования можно сформулировать следующие выводы:

- предложена простая концептуальная модель теплового воздействия заглублённого модуля АСММ (типа СВБР-10) на ММГП в приближении неглубокого озера (автор *Фельдман Г.М.*);
- посредством верифицированных подходов (графического и компьютерного кода) выполнена серия расчётов, позволивших оценить глубину протаивания ММГП под модулем в зависимости от температуры в реакторном модуле;
- результаты расчётов функции глубины протаивания от температуры в модуле описываются посредством линейного соотношения;
- определены значения нормализованных коэффициентов чувствительности по другим параметрам модели (температура ММГП, отношение коэффициентов теплопроводности талого и мёрзлого грунтов, поперечного размера модуля).

Литература

- Амосов П.В., Подшивалова А.В.** Моделирование теплового режима подземного объекта хранения тепловыделяющих радиационно опасных материалов. *Вестник МГТУ*, т. 13, № 3, с. 562-566, 2010.
- Кудрявцев А.В.** АС с реакторными установками СВБР – формирование требований к продукту. *Межотраслевая межрегиональная науч.-техн. конф., 11-12 ноября, Москва, ИБРАЭ*, 2010.
- Лобанов Н.Ф.** Создание опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ в толще многолетнемёрзлых пород в зоне размещения Билибинской АЭС. *Мат. семинара КЭГ МАГАТЭ "Экономика обращения с отработавшим ядерным топливом: переработка и непосредственная изоляции"*, Аронсборг, Швеция, 7 октября 2011. URL: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/WTS/CEG/CEG-Workshop-7-Oct-2011/3.5-Lobanov-Rus.pdf.
- Практическое руководство по производству тепловых расчётов оснований в районах с вечномёрзлыми грунтами. *Красноярск, Проектный и науч.-исслед. ин-т "Красноярский промышленный проект"*, 30 с., 1976.
- Санев Б.Г., Иванов И.Ю., Тугузова Т.Ф., Франк М.И.** Приоритеты использования атомных станций малой мощности на Востоке России. *Атомная энергия*, т. 111, вып 5, с. 276-281, 2011.
- Фельдман Г.М.** Методические указания по расчётам температурного режима грунтов. *Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР*, 70 с., 1985.