

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента размягчения от способа формования и введения гиперпластификатора

### ВЫВОДЫ

Использование ВМК в качестве пуццолановой добавки для ГЦПВ и одновременное применение гиперпластификатора Melflux 5581F позволяет получить водостойкий материал со значением коэффициента размягчения равным 0,92.

Простое прессование гипса с количеством воды, необходимым для протекания гидратации не привело к получению водостойкого материала. Применение Melflux 5581F также не дало повышения водостойкости гипсового материала, а лишь увеличило коэффициент размягчения.

Также водостойкий гипсовый материал был получен при формовании литьевым способом из гипса с применением гиперпластификатором Melflux 5581F. Коэффициент размягчения составил 0,90.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешова Л.В., Лапина Е.Н. Ипотечное кредитование как способ решения жилищного вопроса в России // Научный журнал КубГАУ, № 79 (05), 2012.
2. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Баранов И.М., Бурьянов А.Ф., Лосев Ю.Г., Поплавский В.В., Шишин А.В. Гипс в малоэтажном строительстве / Под общ. ред. А.В. Ферронской. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 240 с.

*Гаин О.А. – аспирант, Алтайский государственный технический университет, E-mail: mot-ka90@mail.ru, Пичугин А.П. – д.т.н., профессор, Хританков В.Ф. – д.т.н., профессор, Новосибирский государственный аграрный университет.*

УДК 624.131.7

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ В ГОДОВОМ ПЕРИОДЕ

А.А. Денисенко, Е.А. Ткачук

*Представлены порядок и результаты компьютерного моделирования температурного поля в многолетнемерзлом грунте, решена тестовая задача по определению глубины деятельного слоя.*

*Ключевые слова: вечномерзлый грунт, деятельный слой, фазовые переходы, компьютерное моделирование.*

### ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого века в России и за рубежом получил развитие метод промышленного строительства временных поселков на основе мобильных зданий [1]. Строительство на основе мобильных зданий может осуществляться в труднодоступных отдален-

ных регионах с суровыми и экстремальными условиями, включая низкие температуры, многолетнемерзлые грунты и т.д.

При строительстве на вечной мерзлоте возникает ряд общих проблем. Прежде всего, это протаивание основания под зданием за счет выделения тепла, при этом меняются

физико-механические свойства грунта. Как правило, при оттаивании мерзлый грунт становится пластичным, что может привести к недопустимым деформациям основания. Для мобильных зданий желательно не строить массивных фундаментов, обходиться наименее затратными работами по нулевому циклу. В связи с этим возникает ряд инженерных задач, в том числе и применение одновременно двух принципов строительства на вечной мерзлоте.

Первая группа задач – теплотехнические. Температурное поле в мерзлом грунте – один из основных факторов, учитываемых в расчетах.

Общеизвестно [2], что «расчетные температуры грунтов определяются расчетом теплового взаимодействия сооружения с вечномерзлыми грунтами основания с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности, формы и размеров сооружения, глубины заложения фундаментов в плане и т.д.». Для решения таких задач можно использовать современные программные комплексы, такие как ANSYS, COSMOS, FlowVision, Термогрунт.

В работе использован отечественный программный комплекс (ПК) FlowVision, который позволяет решать задачи теплообмена, в т.ч. с учетом аэродинамических особенностей (вентилируемые фундаменты и др.). Разработана компьютерная модель процесса сезонного оттаивания-замерзания вечномерзлого грунта в годовом цикле. Компьютерное моделирование при помощи различных программных комплексов, как правило, требует верификации. В связи с этим рассматривается типичная и практически значимая задача, для которой решение с результатами приведено в работе [3, с. 63].

#### РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ

Рассматривается массив однородного слоя мерзлого грунта, сложенного суглинком. Учитывается периодическое изменение температуры на поверхности, а также зависимости теплоемкости и теплопроводности грунта от температуры, теплота фазовых превращений воды. Рассмотрена модель «бесснежная долина» (наименование модели заимствовано из статьи [4]). Грунт принимается однородным, передачи тепла в горизонтальных слоях не происходит. Температурное поле изменяется только по глубине, т.е. рассматривается *одномерная задача*. В связи с тем, что на поверхности грунта происходят периодические

сезонные изменения температуры, температурное поле зависит от времени, т.е. рассматривается *нестационарная задача*.

Задача – *определить глубину сезонного оттаивания грунтов для района г. Уренгой*. Условия задачи приведены [3, с. 63].

#### Создание модели

Для решения задачи применен ПК FlowVision. Далее приведена информация по формированию расчетной модели в терминах и последовательности, принятых в этом ПК.

#### Расчетная область

Поскольку задача является одномерной, размеры и форма области в плане могут быть любыми. Глубина области должна быть не меньше глубины границы нулевых амплитуд сезонных колебаний температуры.

Принята следующая форма и размеры (в метрах) расчетной области (рисунок 1). Область создана средствами трехмерной графики AutoCAD и экспортирована в формат stl, после чего геометрия пригодна для дальнейшего решения в среде FlowVision. Задание размеров в плане выполняется в плоскости XOY, глубина изменяется вдоль оси Z.

#### Математическая модель

Для решения задачи используется модель *твердый материал*. Материал считается однородным, без примесей. Кроме того, внутри области отсутствуют энергетические особенности, такие как излучение и т.д.

#### Физические параметры

Начальная температура расчетной области принята равной минус два градуса относительно опорных параметров. Эта температура назначена равной  $T_0$  по условию рассматриваемой задачи. Поскольку задача является нестационарной, температурное поле выстроится автоматически в процессе расчета в течение определенного времени.

#### Вещество

Расчетная область рассматривается как однородное вещество без примесей, поэтому заданы свойства только одного вещества – Вещество0 (по терминологии ПК).

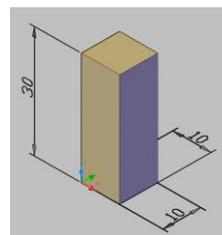


Рисунок 1- Форма и размеры расчетной области

Для задания свойств вещества использована опция загрузки из базы. Суглинок не является стандартным веществом программного комплекса, поэтому вещество и его свойства предварительно занесено в редактируемую базу веществ.

Для расчетов выразим необходимые параметры в единицах ПК. Плотность мерзлого грунта найдена по плотности сухого грунта и его влажности. Значения коэффициентов теплопроводности должны быть выражены в стандартных единицах СИ. Поскольку в ПК используется не объемная теплоемкость вещества, а его удельная теплоемкость, переведем соответствующие значения в нужные единицы, учитывая коэффициенты перехода в систему СИ и разделив заданные значения объемной теплоемкости на величину плотности.

Для учета зависимости теплофизических величин от температуры грунта воспользуемся приемом, описанным в работе, где применена эффективная теплоемкость на участке фазовых переходов [4]. Таким образом, получены следующие значения параметров, необходимые для расчета.

- Плотность вещества  $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$ ;
- Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии  $\lambda_f = 1,57 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ;
- Теплопроводность грунта в талом состоянии  $\lambda_{fh} = 1,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ;
- Теплоемкость грунта в мерзлом состоянии  $C_f = 1193 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ;
- Теплоемкость грунта в талом состоянии  $C_{fh} = 1652 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ;
- Теплота фазовых переходов (таяния-замерзания грунта)

$$L_v = 3,35 \times 10^5 \times (0,3 - 0,08) \times 1400 = 1,032 \times 10^8 \text{ Дж/м}^3.$$

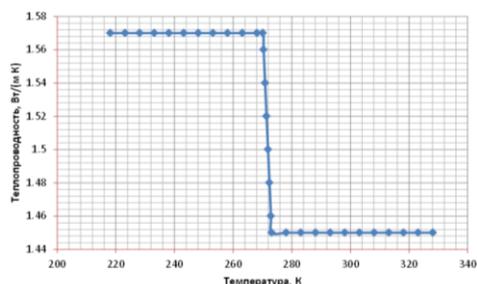


Рисунок 2 – Зависимость теплопроводности от температуры

Зависимость теплопроводности от температуры, подготовленная для экспорта в базу веществ ПК, приведена на рисунке 2. Зависимость удельной теплоемкости от температуры приведена на рисунке 3.

При построении зависимости исходили из того, что площадь пика на графике должна быть равна удельной теплоте фазовых переходов. Такая методика применена в работе [4]. Интервал температур основных фазовых переходов принят от  $-3^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$ . Удельная теплота фазовых переходов вычислена по влажности грунта и его плотности в естественном состоянии. Ее находим, разделив  $L_v$  на плотность.

Заметим, что в работе [4] принята плотность сухого грунта. Площадь пика на рисунке 3 должна быть равна

$$(1,032 \times 10^8) / 1820 = 56703 \text{ Дж/кг.}$$

### Граничные условия

На все боковые грани заданы одинаковые граничные условия – нулевой поток. Это позволяет смоделировать одномерную задачу.

На нижнюю грань задано условие – значение температуры на стенке минус  $2^\circ\text{C}$ . На верхней грани необходимо смоделировать периодическое изменение температуры в течение года. Это можно выполнить, задавая на этой грани условие – значение температуры на стенке в виде периодической бесконечной функции. Можно воспользоваться метеоданными [5] среднемесячной температуре поверхности земли для г. Новый Уренгой. Среднегодовая температура поверхности за период 1983-2005 г. составляет  $-6,32^\circ\text{C}$ , минимальная среднемесячная температура поверхности земли ( $-22,89^\circ\text{C}$ ) наблюдается в январе, максимальная ( $+15,94^\circ\text{C}$ ) – в июле.

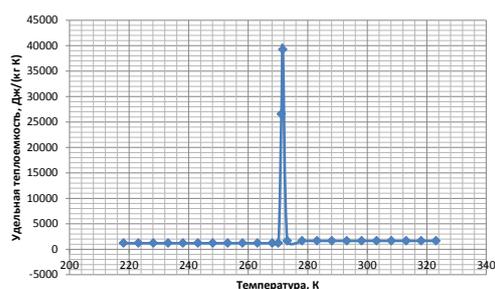


Рисунок 3 – Зависимость удельной теплоемкости от температуры

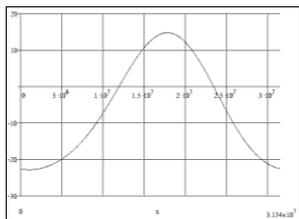


Рисунок 4 – График изменения температуры в течение одного года

Для решения задачи температура разложена в ряд Фурье, оставлены первые четыре члена. В ПК время задается в секундах. Выражение для температуры граничного условия найдено при помощи программы Mathcad. График изменения температуры в течение одного года приведен на рисунке 4. Функция может быть продолжена по времени на бесконечность (по оси абсцисс). Характерные значения времени и температуры поверхности земли, найденные по этому графику (в среде Mathcad):

- $t_1 = 0$  с;  $T \approx -22,66^\circ\text{C}$  – начало;
  - $t_2 = 1100000$  с;  $T \approx -22,91^\circ\text{C}$  – середина января, самая низкая температура;
  - $t_3 = 11934500$  с;  $T \approx 0^\circ\text{C}$  – середина мая, переход на положительные температуры;
  - $t_4 = 17800000$  с;  $T \approx 15^\circ\text{C}$  – середина июля, самая высокая температура;
  - $t_5 = 23404393$  с;  $T \approx 0^\circ\text{C}$  – начало октября, переход на отрицательные температуры;
- теплый период составляет 3186 ч ( $\approx 133$  суток); холодный период составляет 5574 ч. (232 суток).

Для получения характерной даты в любом следующем году используют формулу

$$t = n \times 31536000 + t_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число полных лет,  $t_i$  – характерное время, числовой коэффициент – количество секунд в году.

#### Начальная сетка

Для решения задачи используем равномерную сетку, исходя из следующих соображений. Поскольку решается одномерная задача, дробление области выполняем только по глубине, приняв количество шагов по осям  $Y$  и  $X$  равным 10 (можно 1), а по  $Z$  принимаем 300 равномерных шагов. Таким образом, шаг по глубине составляет 10 см, а по горизонтальным осям – 1 м. Задание сетки показано на рисунке 5.

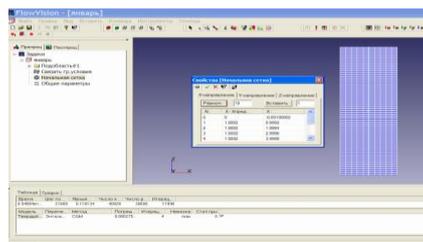


Рисунок 5 – Задание сетки

#### Общие параметры

Принят фиксированный шаг по времени. 21600 с, что составляет 6 часов. Чтобы проанализировать состояние системы на определенный момент времени, можно задать конечное время задачи, по которому произойдет автоматическая остановка расчета. Например, показанное на рисунке 6 конечное время 694892000 соответствует началу января 23-го года от начала процесса.

#### Выполнение расчета

Расчет выполняется от нулевого отсчета по времени и до автоматической остановки по конечному времени. При этом имеется возможность визуального наблюдения процесса сходимости решения (рисунок 7). На графике показано изменение во времени энтропии системы, которая в данный момент расчета меняется плавно и регулярно.

#### Результаты расчета

Далее приведены наиболее важные результаты выполненных расчетов. Температурные поля представлены в виде заливки и графиками. Наиболее низкая температура на поверхности грунта наблюдается в январе (рисунок 8). Наиболее высокая температура на поверхности и в пределах деятельного слоя – в июле (рисунок 9). Наибольшая глубина оттаивания грунта наблюдается в конце сентября (рисунок 10). Сводный график распределения температуры по месяцам представлен на рисунке 11.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерное моделирование процесса сезонного промерзания-оттаивания вечномерзлого грунта может быть выполнено при помощи ПК FlowVision с достаточной точностью. Запланированы дальнейшие исследования с применением этого ПК, включающие в себя тепловое взаимодействие между зданием и основанием через вентилируемые или неventилируемые воздушные прослойки разной формы и размеров, а также моделирование процессов морозного пучения.

# РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ В ГОДОВОМ ПЕРИОДЕ

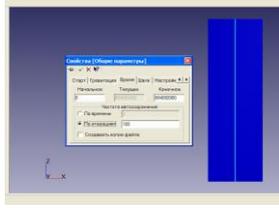
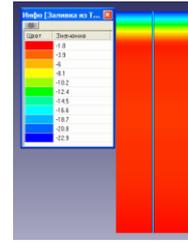


Рисунок 6 – Конечное время от начала процесса



температура грунта в январе

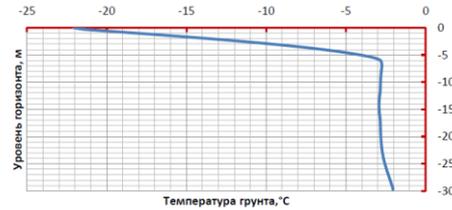


Рисунок 8 – Наиболее низкая температура на поверхности грунта

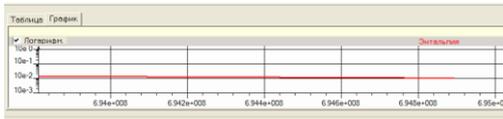
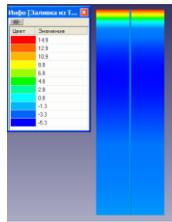


Рисунок 7 – Процесс сходимости решения



температура грунта в июле

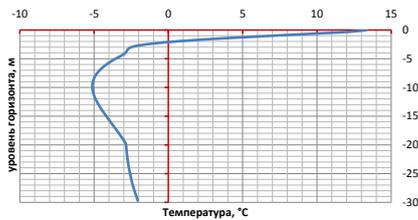
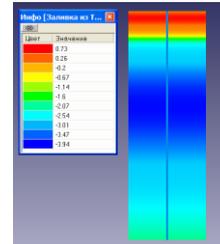


Рисунок 9 – Наиболее высокая температура на поверхности и в пределах деятельного слоя



Температура грунта в конце сентября

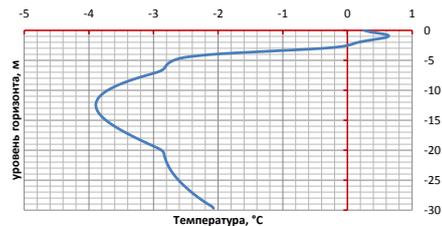


Рисунок 10 – Наибольшая глубина деятельного слоя

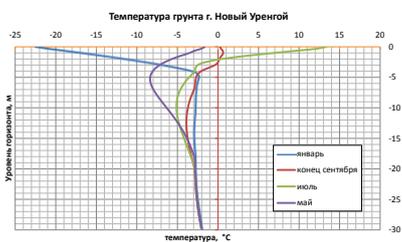


Рисунок 11 – Сводный график распределения температуры по месяцам

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапрыкина Н.А. Мобильное жилище для Севера. - Л.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
2. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Черышев С.Н. Механика

грунтов, основания и фундаменты. – М.: Высшая школа, 2004. – 566 с.

3. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Практикум по мерзлотоведению: учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 120 с.

4. Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малоуглубленный фундамент: работа в сезонно – промерзающих грунтах и практика теплового расчета // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 8.

5. <http://yanao-meteo.ru/novyyj-urengoij/years/earth-skin-temp> (дата обращения: 12.06.2012).

**Денисенко А.А.** – к.т.н., доцент, E-mail: [al\\_denisenko@mail.ru](mailto:al_denisenko@mail.ru); **Ткачук Е.А.** – инженер, E-mail: [veberin@mail.ru](mailto:veberin@mail.ru), Рубцовский индустриальный институт.