

Математическое моделирование управления нестационарным температурным полем в двухфазных средах

77-30569/330390

02, февраль 2012

Мельникова Ю. С.

УДК 551.340: 51-74

МГТУ им. Н.Э. Баумана

may301987@yandex.ru

Введение

Задачи, связанные с изучением, прогнозом и управлением температурными полями в грунтовых средах, в настоящее время являются одними из наиболее важных и востребованных в сфере инженерной геологии и строительства. В условиях современной ситуации, когда на территории Российской Федерации происходит разработка новых месторождений нефти и газа, все чаще поднимается проблема строительства в районах вечной мерзлоты. В частности, это относится к случаям строительства на территории Заполярья, а также планированию освоения месторождений в Северном Ледовитом океане.

В работе исследуется распределение температурных полей в двухфазных грунтовых средах, возможность прогноза и управления этими распределениями. Подобные задачи встречаются при расчетах температур грунтовых сред в процессе геотехнического мониторинга, который проводится перед строительством в криолитозоне. Исследованиям по этому направлению посвящено много работ. В большинстве случаев эти исследования рассматривают расчет и прогноз распределения температурных полей в грунтах с различными литологическими параметрами. В качестве управления температурными полями в настоящее время используются специальные устройства – термостабилизаторы, установка которых основывается на эмпирических наблюдениях. Но экспериментальные исследования не являются универсальным инструментом, поскольку часто возникает необходимость исследования новых районов с иными климатическими характеристиками и физико-химическими параметрами грунта. Таким образом, задачи, связанные с теоретическим определением оптимального управления температурными полями пока остаются мало изученными.

Результаты данного исследования важны для дальнейших разработок решения проблем строительства в условиях вечной мерзлоты, где вопросы устойчивости фундаментов зданий и различных сооружений стоят наиболее остро. Возможность расчета, прогноза и, что наиболее важно, управления температурными полями в грунтовых средах в данной ситуации играет определяющую роль.

Настоящая работа посвящена изучению вопроса математического моделирования распределения температурных полей в грунтовых средах при наличии различных воздействующих факторов: окружающей среды, сооружений на грунтах, сезоннодействующих охлаждающих устройств. Выбрано численное решение такой задачи, и представлены результаты расчетов.

1 Математическая постановка задачи

В качестве объекта исследования будем рассматривать двухфазную грунтовую среду, содержащую воду и лед, температурные поля в которой могут проходить границу в 0°C , то есть влага в грунте будет претерпевать фазовые превращения. С этими фазовыми переходами связаны выделение и поглощение большого количества тепла, которые существенно влияют на температурное поле рассматриваемой среды и ее динамику [8, 9]. Так, при охлаждении ниже 0°C грунтовой среды с влажностью 20 % в результате замерзания влаги, содержащейся в 1 г породы, выделяется порядка 70 Дж тепла, которого оказалось бы достаточно для нагревания этого же грамма породы почти на 40°C .

На границах расчетного объема могут быть заданы различные граничные условия: первого, второго или третьего типов. Кроме этого, будут рассматриваться грунтовые среды с внедренными в них термостабилизаторами, которые будут позиционироваться как дополнительные источники тепла [6].

Базовым уравнением для разработки методов прогноза процессов замерзания и таяния в грунтах является уравнение баланса тепла в интегральной форме [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V H dv = - \iint_{\Sigma} \vec{q} \vec{n} d\sigma + \iiint_V F dv. \quad (1)$$

Здесь V - контрольный объем, Σ - окружающая его поверхность, t - время, $H = H(T)$ - энтальпия (внутренняя энергия) на единицу объема, T - температура, \vec{q} - вектор потока тепла, λ - коэффициент теплопроводности, \vec{n} - внешняя нормаль к рассматриваемому

объему, F – приток тепла на единицу объема. В грунте поток тепла \vec{q} определяется по закону Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad} T, \quad (2)$$

λ - коэффициент теплопроводности. Фазовые переходы (фронты замерзания) и скачки коэффициентов теплопроводности на границах грунтов различного типа или элементов строительных конструкций порождают разрывы в решениях [7]. При отсутствии таких разрывов на основе уравнений (1) и (2) выводится уравнение распространения тепла в дифференциальной форме:

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F(x, y, z). \quad (3)$$

Здесь $c_v = dH/dT = \rho c$ - объемный коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность, λ - коэффициент теплопроводности, $T(x, y, z, t)$ - температура среды. Здесь считается, что в случае наличия фазового перехода, где энтальпия терпит скачок, объемный коэффициент теплопроводности имеет вид

$$c_v = \rho c + Q \delta(T - T^*),$$

T^* - температура фазового перехода, Q - теплота фазового перехода, $\delta(T - T^*)$ - дельта-функция.

Энтальпия в общем случае нелинейная, монотонно возрастающая функция от температуры. В простейшем случае можно считать, что

$$H = H_0 + c_t (T - T^*), T > T^*,$$

$$H = H_0 + c_f (T - T^*) - Q, T < T^*.$$

Здесь c_t - объемная теплоемкость талого грунта, c_f - объемная теплоемкость мерзлого грунта, H_0 - константа определения энтальпии. В случае $H_0 = 0$ здесь энтальпия равна нулю при $T = T^*$.

В случае, когда коэффициент теплопроводности постоянная величина, из уравнения (3) выводится уравнение теплопроводности:

$$\frac{c_v}{\lambda} \frac{\partial}{\partial t} T = \frac{\partial^2}{\partial x^2} T + \frac{\partial^2}{\partial y^2} T + \frac{\partial^2}{\partial z^2} T + \frac{F(x,y,z)}{\lambda}. \quad (4)$$

В данной модели допускается, что при $T < 0$ может иметься область с частично замороженным грунтом, где процент замороженной воды зависит температуры, в связи с чем энтальпия при $T < 0$ - нелинейная функция температуры. Для описания области с частичной заморозкой существуют и более сложные двухфазные модели смеси жидкость-лед, где соотношение между водой и льдом зависит еще и от времени с начала процесса замерзания [9]. Такие модели требуют расчета двух уравнений теплообмена. В связи с тем, что здесь предполагаются длительно текущие процессы, эти модели не рассматриваются.

Применяется два разных аналитических подхода и соответственно два разных типа численных методов для решения задач с разрывами [4]. При первом подходе разрывы выделяются, а непрерывные области описываются уравнениями (1) или (2). На разрывах ставятся некоторые граничные условия, выводимые из (1) и (2). Для фазовых переходов граничные условия следующие:

$$U(H_2 - H_1) = \lambda_1 \left(\frac{\partial}{\partial \vec{s}} T \right)_2 - \lambda_2 \left(\frac{\partial}{\partial \vec{s}} T \right)_1, \quad T_1 = 0, \quad T_2 = 0. \quad (5)$$

Здесь U – скорость распространения поверхности разрыва в направлении ее нормали \vec{s} , индексы 1 и 2 обозначают значения соответствующих величин по разные стороны разрыва, нормаль \vec{s} направлена от области 1 к области 2. Предполагается, что на таком разрыве терпит скачок величина энтальпии при $T = 0$ в связи с наличием теплоты фазового перехода. Учитывается также скачок теплопроводности для мерзлого и оттаявшего грунта, но для существования разрыва наличие такого скачка не обязательно.

Для неподвижных разрывов, связанных со скачком коэффициента теплопроводности на границе раздела двух разных сред граничные условия следующие:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial}{\partial \vec{s}} T \right)_1 - \lambda_2 \left(\frac{\partial}{\partial \vec{s}} T \right)_2 = 0, \quad T_1 = T_2. \quad (6)$$

В одномерном случае, когда все зависит только от одной координаты, x эти соотношения принимают вид:

$$U(H_1 - H_2) = \lambda_1 \left(\frac{\partial}{\partial x} T \right)_1 - \lambda_2 \left(\frac{\partial}{\partial x} T \right)_2, \quad T_1 = 0, \quad T_2 = 0;$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_1 - \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_2 = 0, T_1 = T_2.$$

На границе расчетного объема ставятся три типа граничных условий.

Граничное условие первого типа:

$$T = \mu(t). \quad (7)$$

Примеры применения: поверхность грунта, на которой температура известна. Например, поверхность земли или поверхность пола в подвальном помещении, стена подвального помещения, примыкающая к грунту при условии высокой теплопроводности этой стены, сооружение без фундамента, располагающееся на поверхности грунта при условии хорошей теплопроводности пола, подтаявший снежный покров на поверхности грунта в летнее время. Стандартное условие для нижней границы расчетного объема: постоянная температура на глубине $T = T_b$.

Граничное условие второго типа:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \nu(t). \quad (8)$$

Примеры применения: плоское терморегулирующее устройство, позволяющее регулировать поток тепла с поверхности, при $\nu(t) = 0$ - теплоизолирующая поверхность, область контакта с хорошо утепленными элементами сооружения, стандартное граничное условие на боковой границе расчетного объема.

Граничное условие третьего типа:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\sigma (T - \mu(t)). \quad (9)$$

Применяется для описания области контакта с двусторонней теплопроводящей поверхностью, для которой с одной стороны температура совпадает с температурой грунта, а с другой – поддерживается заданная температура $\mu(t)$. Данное условие моделирует тонкий слой теплопроводящего материала. Величина σ рассчитывается по формуле: $\sigma = \lambda_m / h$, λ_m - теплопроводность материала, h – его толщина. Примеры применения: снежный покров на поверхности грунта в зимнее время, тонкая стена подвального помещения, пол, располагающийся непосредственно на грунте.

Для расчета непрерывных областей применяется любая сходящаяся численная схема, аппроксимирующая уравнения (3) или (4), но схемы, выведенные на основе уравнения (1), являются консервативными и потому более точными. Реализация условий (5) требует либо введения сетки, привязанной к разрыву, так называемой плавающей сетки, либо специальных формул расчета для ячеек вблизи поверхности разрыва. В связи со сложностями программной реализации в двумерном и трехмерном случае такой подход для расчета фазовых переходов обычно не используется.

При построении разностных схем всегда применяется интегральное уравнение (1). В свою очередь численные методы сквозного счета подразделяются на методы с регуляризацией и без нее. Регуляризация означает, что расчет разрывных решений заменяется расчетом гладких решений, где разрывы заменяются узкими переходными зонами и вводится малый параметр, определяющий ширину этой зоны. При стремлении этого параметра к нулю ширина зоны перехода тоже стремится к нулю и получается разрывное решение. В качестве малого параметра вводится температура полного замерзания T_z , отличная от нуля. Энтальпия на участке $T_z < T < 0$ - линейная функция от температуры. Такой подход позволяет избежать возможных проблем с устойчивостью расчета, связанных с существованием решений интегральных уравнений.

В соответствии с поставленной задачей реализован программный комплекс для проведения трехмерных расчетов тепловых процессов в грунтах при наличии фазовых переходов и переменном коэффициенте теплопроводности. Расчет ведется с помощью явной двухслойной схемы с переменными шагами по пространству и по времени. Функция энтальпии задается в виде непрерывной кусочно-линейной функции $dH/du = c_i$, $c_i = const$, где индекс $i=1,2,3$ определяет соответствующие значения для мерзлого грунта, оттаявшего грунта и переходной зоны, и позволяет осуществлять расчеты однородного грунта. Значения c_i постоянны для определенных диапазонов температуры $-\infty < T < T_z$, $T_z < T < T_0$, $T_0 < T < +\infty$, T_z - температура полного замерзания, T_0 - температура начала замерзания принимаемая равной 0°C . В зоне частичного замерзания величина c_i задается существенно большей, чем в зоне полного замерзания и оттаявшего грунта. Это позволяет моделировать распространенный подход, когда энтальпия задается как разрывная функция со скачком в точке замерзания, но применение непрерывной функции позволяет устранить возможные проблемы с некорректностью постановок задач с фронтом замерзания в трехмерных и двумерных случаях. Численная схема в программном комплексе рассчитана на однородный грунт.

2 Результаты численного моделирования

В качестве расчетного объема рассматривается двухфазная грунтовая среда размером 20x20x7,5 м. Берется грунт типа супесь (физические параметры этого вида грунтов представлены в таблице 1 [1]). Температурные показатели, необходимые для расчетов: на нижней границе задается постоянная температура -2°C , среднегодовая температура на поверхности -1°C с годовым перепадом в 40°C (таким образом, максимальная температура на поверхности 19°C , минимальная -21°C).

Т а б л и ц а 1

Физические параметры грунта типа супесь

Показатель	Единицы	Значение
Температура начала замерзания грунта	$^{\circ}\text{C}$	-0,2
Температура грунта на глубине 10 м	$^{\circ}\text{C}$	-2,0
Коэффициент теплопроводности талого грунта	$\text{Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$	1,62
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта	$\text{Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$	1,74
Теплоемкость объемная мерзлого грунта	$\text{Дж/ м}^3\cdot^{\circ}\text{C}$	2140000
Теплоемкость объемная талого грунта	$\text{Дж/м}^3\cdot^{\circ}\text{C}$	2310000
Влажность грунта суммарная	%	22
Влажность за счет незамерзшей воды	%	5
Влажность на границе раскатывания	%	13
Плотность сухого грунта	кг/м^3	1570
Плотность грунта суммарная	кг/м^3	1910
Условная теплоемкость	$\text{Дж/ кг}\cdot^{\circ}\text{C}$	5820

Первый этап расчетов – наблюдение за тем, как изменяется распределение температурных полей, если на поверхности грунта стоит сооружение размером 4x4 м, в котором поддерживается постоянная температура 20°C . Пространственные шаги расчета одинаковы по всем осям и составляют 0,25 м. Будем считать, что представленное сооружение - постройка на земляном полу, следовательно, в пределах этой области на верхней границе расчетного объема будет иметь место первое граничное условие: совпадение с температурой внутри сооружения. На рисунке 1 представлен горизонтальный разрез температур на глубине 0,5 м.

Рассмотрим, как меняется температура под сооружением с течением времени. На рисунках 2 и 3 представлены графики изменения температуры в точках наблюдения. Первая, вторая и третья точки наблюдения располагаются на оси симметрии здания, на углу здания и на свободном от влияния температуры здания пространстве соответственно, глубины залегания точек наблюдения – 0,1 м.

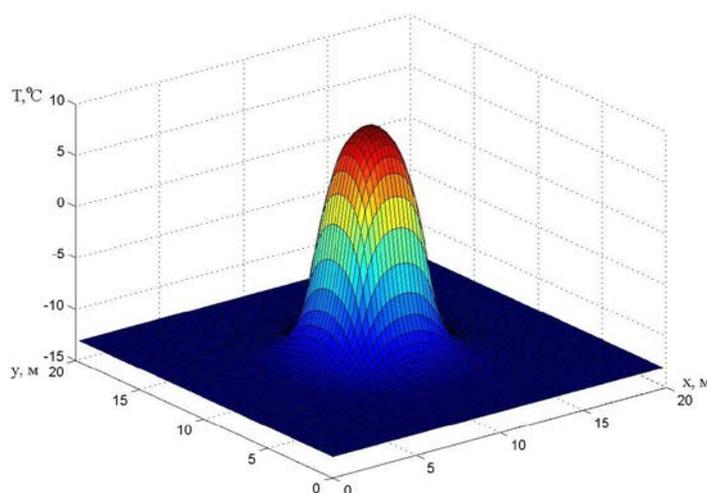


Рис. 1 – Горизонтальный разрез расчетного объема на глубине 0,5 м

Из рисунка 2 можно судить о явном влиянии сооружения на температуру грунта под ним. Если максимальная температура, приходящаяся примерно на 0,55 года (июнь-июль), близка для всех трех точек наблюдения, то минимальные температуры сильно разнятся. Максимальная температура воздуха достигает уровня в 19 °С, а температура, поддерживаемая в здании на протяжении года, – 20 °С, этим и объясняется близость температур под зданием и на открытом участке грунта в летний период.

Минимальные температуры грунтовой среды отличаются: в точке 3, где на грунт влияет только температура воздуха, этот показатель близок к минимальной температурной точке (-21°С), а под зданием – не опускается ниже 10 °С. Отличие профилей температур для точек 1 и 2 объяснимо тем, что точка 2, расположенная на углу здания, больше подвергается влиянию промерзшего грунта, чем точка, расположенная строго на оси симметрии сооружения.

Если проследить за изменением температур самых важных точек исследования (1 и 2 на рисунке 3) – тех, что расположены непосредственно под зданием, - то можно сказать, что характер этих изменений довольно стабилен. На протяжении трех лет прогнозная температура

под зданием колеблется в районе 17-18 °С (на оси симметрии) и 7-18 °С (для точек на углах здания). Очевидно, что это повлечет за собой скорую просадку сооружения и его разрушение.

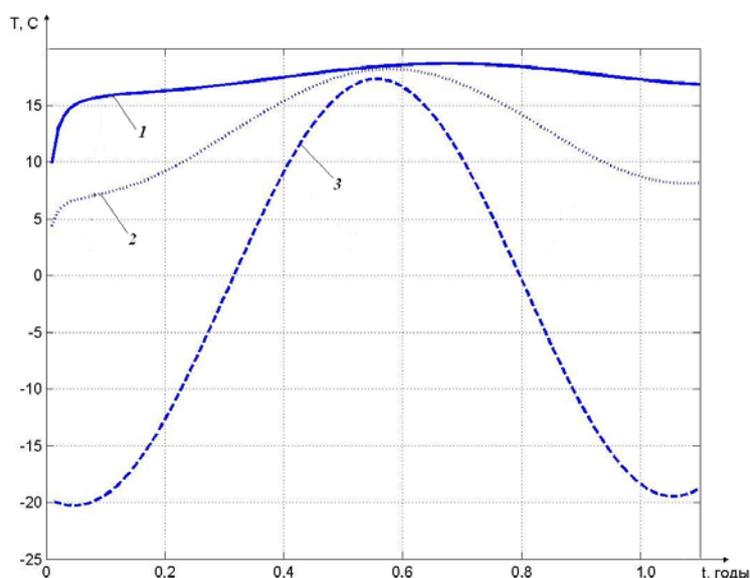


Рис. 2 – Изменение температуры в точках наблюдения в течение 1 года

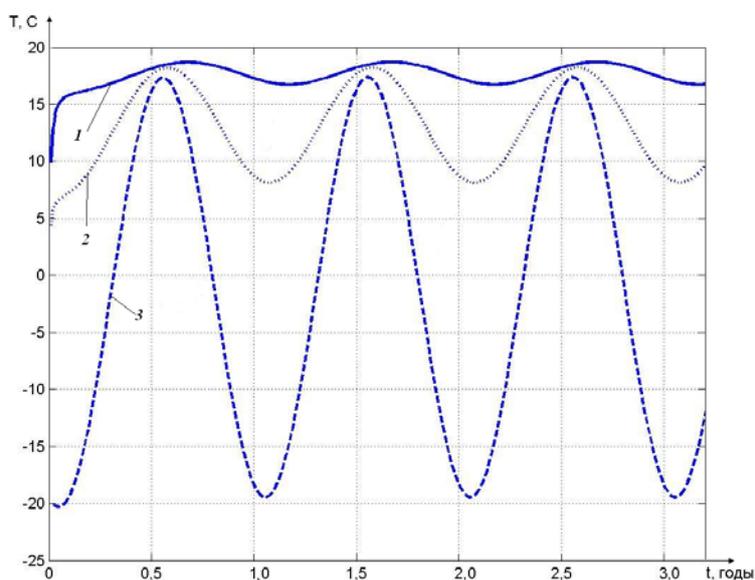


Рис. 3 – Изменение температуры в точках наблюдения в течение 3 лет

На втором этапе исследования рассматривается расчетный объем, на поверхности которого находится сооружение с углубленным фундаментом. Геометрические параметры сооружения те же, размеры фундамента с ним совпадают. Ввиду схожести результатов, примеры расчетов и прогнозов температурных профилей не приводятся, однако стоит

отметить, что, как и в вышерассмотренном случае, неотрицательная температура под фундаментом здания в течение теплого сезона неблагоприятно скажется на прочности сооружения: с такими температурами быстро образуется котлован, и здание разрушается. Только по достижении глубины 7 м можно наблюдать синусоидальный характер изменения температуры, когда максимум не превышает $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но отрицательные температуры на такой глубине никак не повлияют на охлаждение грунта непосредственно под самим зданием, поэтому критическая ситуация, когда сооружение может обрушиться из-за неустойчивости фундамента на талом грунте, остается острой. Решение этой проблемы представлено в третьем этапе исследования, когда для искусственного подмораживания грунта под зданием используются специальные устройства – термостабилизаторы.

Третий этап заключается в том, что, как и было упомянуто выше, в грунт по бокам здания с фундаментом внедряются термостабилизаторы. В программной реализации термостабилизатор представляет собой бесконечно тонкий источник тепла с постоянной мощностью. Расчетный объем, геометрические характеристики здания и фундамента остаются прежними.

Рассмотрим температурные профили в точках наблюдения. Точки наблюдения взяты аналогично первому этапу исследования: 1, 2, 3 – точки на оси симметрии сооружения, на углу фундамента и в грунте без стороннего теплового воздействия, глубина залегания – 3,1 м.

На рисунке 4 представлены результаты численного моделирования температурного распределения в точках 1, 2 и 3: влияние термостабилизаторов на грунт под сооружением ярко выражено – если раньше грунт прогревался почти до температуры фундамента, то теперь на оси симметрии температура не превышает $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Если рассматривать профили температур только для точек на оси симметрии здания на разных глубинах, то увидим следующее (см. рисунок 5): на глубине 3,1 м (прямо под фундаментом) грунт не тает даже в летний период, на глубине 5 м влияние термостабилизаторов еще заметно, а на глубине 7 м наблюдается почти постоянная температура около $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

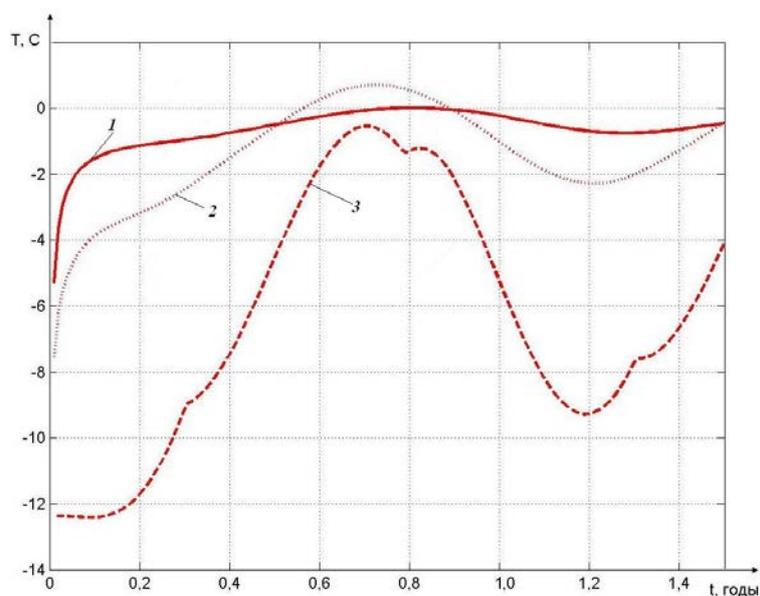


Рис. 4 – Изменение температуры в 1, 2, и 3 точках наблюдения в течение 1,5 лет

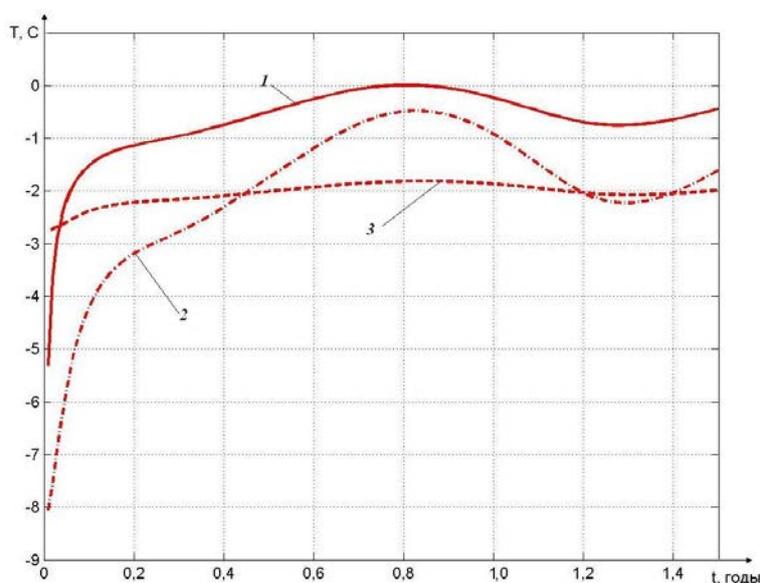


Рис. 5 – Изменение температуры в точках наблюдения на оси симметрии здания в течение 1,5 лет: 1 – на глубине 3,1 м, 2 – 5 м, 3 – 7 м

Наконец, сравним показатели температуры под зданием без применения и с применением термостабилизаторов. На рисунке 6 приведены температурные профили точек, располагающихся строго под фундаментом (1 и 3 – на оси симметрии, 2 и 4 – на углу фундамента). Черным цветом выделены графики температур в том случае, когда термостабилизаторы не применяются. Видно, как сильно прогревается грунт в этом случае. Красным цветом показаны температурные профили точек грунта, охлаждаемого четырьмя

термостабилизаторами. Здесь температуры имеют синусоидальный характер с максимумом в районе нуля. Только для точки на углу фундамента виден небольшой всплеск температуры после теплого периода. Его можно избежать, применяя более мощные термостабилизаторы. Также нужно обратить внимание, что максимумы температур грунта не совпадают с максимумом годовых температур. Это объясняется тем, что грунт прогревается постепенно, поэтому теплые температурные волны достигают показанной на графике глубины 3,1 м только спустя некоторое время.

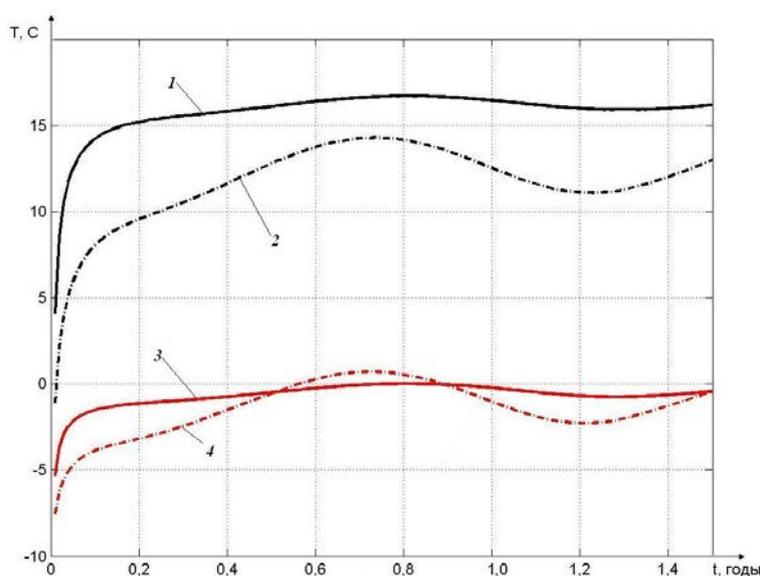


Рис. 6 – Показатели температур в точках наблюдения:

- 1 – точка на оси симметрии здания на глубине 3,1 м (термостабилизаторы не применяются);
- 3 – точка на оси симметрии здания на глубине 3,1 м (с применением термостабилизаторов);
- 2 – точка на углу фундамента здания на глубине 3,1 м (термостабилизаторы не применяются);
- 4 – точка на углу фундамента здания на глубине 3,1 м (с применением термостабилизаторов)

3 Сравнение работы вертикальных и горизонтальных термостабилизаторов и их влияния на распределение температурных полей

В этом разделе рассмотрена опора, погруженная в грунт (рисунок 7). Опора состоит из верхней зарытой в землю части размером 2x2x3 м и нижней размером 4x4x1 м. Грунт двухслойный, предельная глубина залегания первого слоя 5 м. Под нижним основанием опоры имеется насыпной грунт, занимающий область 4x4x1 м. Первая точка наблюдения

расположена на линии вертикальной оси опоры на глубине 4,5 м. вторая точка наблюдения находится на расстоянии 1,5 м от оси опоры на плоскости симметрии и на глубине 2 м.

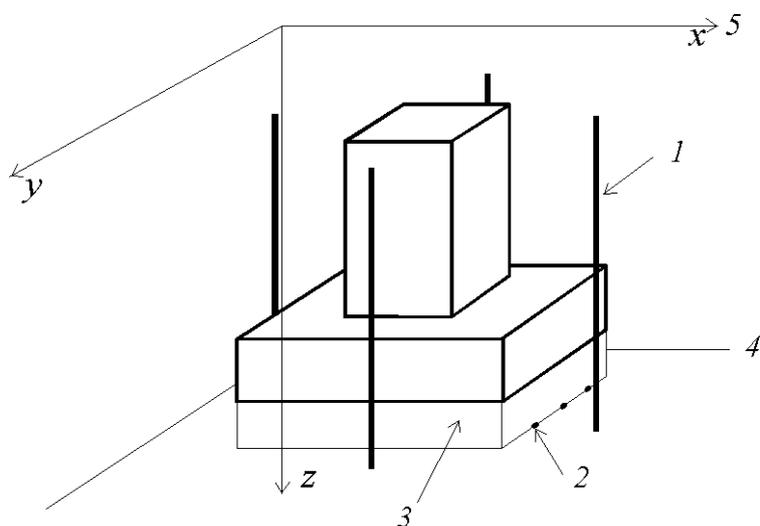


Рисунок 7 – Опора, погруженная в грунт: 1 – вертикальный термостабилизатор, 2 – горизонтальный термостабилизатор, 3 – насыпной грунт, 4 – граница раздела между двумя слоями грунта, 5 – поверхность грунта.

Рассмотрены задачи с тремя вариантами термостабилизаторов.

Первый вариант: имеется четыре термостабилизатора вертикального положения с максимальной глубиной 5 м. Термостабилизаторы расположены симметричным образом по разные стороны от опоры на расстоянии 3 м от ее оси.

Второй вариант: имеется один термостабилизатор горизонтального положения, помещенный симметричным образом под опорой на глубине 5 м, его длина 4 м.

Третий вариант: имеется два термостабилизатора горизонтального положения, помещенных симметричным образом под опорой на глубине 5 м, их длина 4 м.

Расчетная область имеет размеры 20x20x7,5 м, пространственные шаги расчета одинаковы по всем осям и составляют 0,25 м. Опора помещена в центре расчетной области.

Сначала выполняется расчет без термостабилизаторов, он показывает, что в точке наблюдения под опорой температура в летнее время близка к нулевой, возможно пучение грунта и есть необходимость в термостабилизации. Далее делаются расчеты с различными значениями мощности и осуществляется ее подбор для снижения температуры в этой точке на 2-3 градуса, это достигается при мощности охлаждения на единицу длины равной 2000 (ккал/час/м). Результаты для двух точек наблюдения и при отсутствии термостабилизации и при наличии ее показаны на рисунке 8.

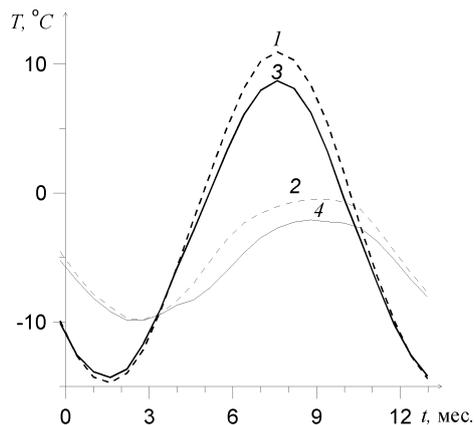


Рисунок 8 – Расчет с четырьмя вертикальными термостабилизаторами: 1 – температура в градусах Цельсия в первой точке наблюдения без применения термостабилизатора, 2 – температура во второй точке наблюдения без термостабилизатора, 3 – температура в первой точке при применении термостабилизатора, 4 – температура во второй точке при применении термостабилизатора.

Здесь и далее, кривые и 2 - графики без термостабилизации в первой и второй точке наблюдения, кривые 3 и 4 – с термостабилизацией. В этом расчете предполагается, что устройство включено только при положительной температуре воздуха. Приводятся результаты через четыре года после начала расчета, когда устанавливается годовой цикл колебаний.

Далее проводится расчет с термостабилизатором горизонтального положения, удовлетворительные результаты достигаются при мощности 1000 (рисунок 9).

Суммарная длина труб здесь шесть раз меньше, чем в предыдущем случае. Размещение термостабилизаторов под фундаментом при строительстве заранее значительно эффективней, чем последующая установка их по бокам в скважины. Однако обнаруживается запаздывание прихода тепловой волны с поверхности, поэтому целесообразно изменить режим работы устройства, сдвинув назад время его включения и выключения относительно годового цикла. На рисунке 10 показаны результаты расчета с той же мощностью но со сдвигом цикла включения и выключения устройства на 0,2 года назад, Устройство в этом случае работает гораздо эффективней.

Для более надежной и равномерной термостабилизации целесообразнее разместить два аналогичных устройства в два раза меньшей мощности на расстоянии 1 м от плоскости симметрии. Результаты расчета для третьего варианта представлены на рисунке 11.

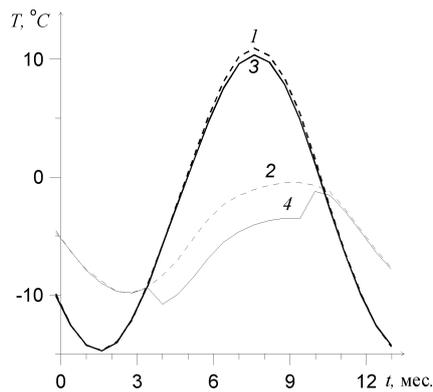


Рисунок 9 – Расчет с горизонтальным термостабилизатором: 1 – температура в первой точке наблюдения без применения термостабилизатора, 2 - температура во второй точке наблюдения без термостабилизатора, 3 – температура в первой точке при применении термостабилизатора, 4 – температура во второй точке при применении термостабилизатора

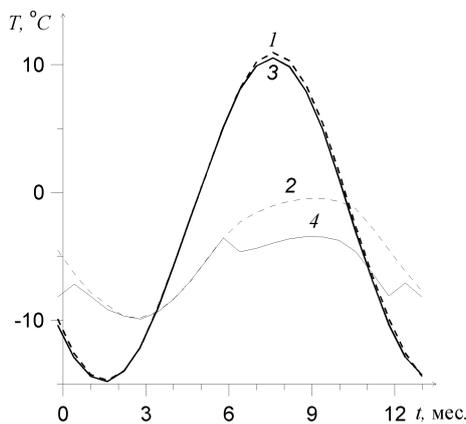


Рисунок 10 – Расчет с горизонтальным со сдвигом цикла функционирования: 1 – температура в первой точке наблюдения без применения термостабилизатора, 2 - температура во второй точке наблюдения без термостабилизатора, 3 – температура в первой точке при применении термостабилизатора, 4 – температура во второй точке при применении термостабилизатора

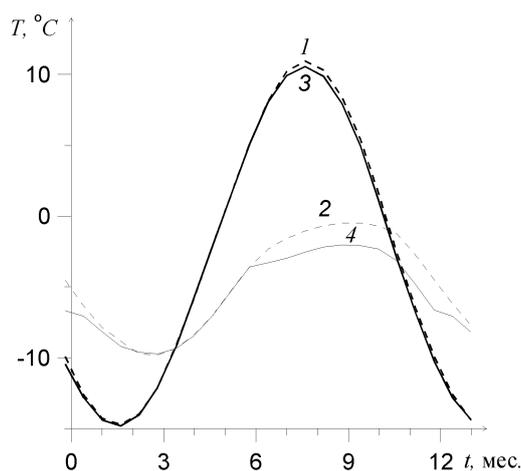


Рисунок 11 – Расчет с двумя горизонтальными термостабилизаторами со сдвигом цикла функционирования: 1 – температура в первой точке наблюдения без применения термостабилизатора, 2 - температура во второй точке наблюдения без термостабилизатора, 3 – температура в первой точке при применении термостабилизатора, 4 – температура во второй точке при применении термостабилизатора

Выводы

Сформулирована математическая постановка задачи в виде интегрального уравнения теплового баланса с учетом теплового потока, изменяющегося по закону Фурье, учтены скачки энтальпии и коэффициента теплопроводности. Решена задача расчета и прогноза распределения температурного поля в двухфазной грунтовой среде. Разработан численный метод и реализована разностная схема решения задачи. С помощью программного комплекса произведен расчет на грунтовом объеме с реальными литологическими параметрами. Рассмотрены различные варианты расположения геотехнических сооружений: на земляном полу; с фундаментом; с фундаментом при условиях наличия насыпного грунта; свайный фундамент. Проведено сравнение результатов распределения температурных полей с применением и без применения сезоннодействующих охлаждающих устройств – термостабилизаторов. Определено воздействие термостабилизаторов на температурное состояние грунта.

Список литературы

1. ГОСТ 25100-82. Грунты. Классификация. - М.: Изд-во стандартов, 1982
2. РСН 67-87 «Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномёрзлых грунтов численными методами»
3. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.
4. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. – 512 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Эдиториал УРСС, 2009. – 784 с.
7. Основы математического моделирования распределения температурных полей в многофазных средах/ Н.И. Сидняев [и др.] – Материалы Четвертой Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование. – Саров: Изд-во «Альфа», 2010. с. 86-93
8. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне. М. : Изд-во МГУ, 2005. 542 с.
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Наука, 1973. – 448 с

Mathematical simulation of time-dependent temperature field control in two-phase mediums

77-30569/330390

02, February 2012

Mel'nikova Yu.S.

Bauman Moscow State Technical University
may301987@yandex.ru

This article deals with geotechnical systems, such as engineering constructions with foundation in particular geological medium, for instance, even-frozen or thawing rock mantle. The calculation and forecast problems of temperature field extension into even-frozen ground under building's foundations in cryolithozone were studied. The mathematical formulation of the stationary thermal conductivity problem with different boundary conditions was given. Predicted results of ground's thermal condition in different spatial sections were included in the article.

Publications with keywords: [management](#), [numerical methods](#), [permafrost](#), [ground](#), [temperature field](#)

Publications with words: [management](#), [numerical methods](#), [permafrost](#), [ground](#), [temperature field](#)

Reference

1. State Standard 25100-82, Soils. Classification, Moscow, Izd-vo standartov - Standards Publishing House, 1982.
2. Ershov E.D., General geocryology, Moscow, Izd-vo MGU – MSU Press, 2002, 682 p.
3. Kalitkin N.N., Numerical Methods, Moscow, Nauka, 1978, 512 p.
4. Lykov A.V., Theory of heat conduction, Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 600 p.
5. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N., Computational heat transfer, Moscow, Editorial URSS, 2009, 784 p.
6. N.I. Sidniaev, et al., Fundamentals of mathematical modeling of distribution of temperature fields in multiphase media, in: Proc. of the Fourth all-Russian Youth Scientific Innovation Schools “Mathematics and Mathematical Modeling”, Sarov, Izd-vo «Al'fa», 2010, pp. 86-93.
7. Khrustalev L. N., Fundamentals of geotechnical engineering in the permafrost zone, Moscow, Izd-vo MGU - MSU Press, 2005, 542 p.
8. Tsytoich N.A., The mechanics of frozen soils, Moscow, Nauka, 1973, 448 p.