

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ФАЗОВОЙ ЗОНЫ В МНОГОСЛОЙНОМ ГРУНТЕ

(Представлена академиком НАН РК Т. Ш. Кальменовым)

Исследуется теплоемкость фазовой зоны многослойного грунта в процессе замерзания. Определяется влияние толщины отдельного слоя на теплоемкость фазовой зоны грунта.

Общеизвестно, что промерзающие и протаивающие грунты по своей структуре всегда не однородны. Действительно, даже в тех случаях, когда их литологический состав, влажность, плотность и т.д. совершенно одинаковы по объему, они не могут рассматриваться как однородные, поскольку в одних частях грунта вода уже замерзла, а в других – еще нет. В зависимости от фазового состава воды в промерзающих и протаивающих грунтах можно выделить три зоны – талого грунта, фазовых переходов и мерзлого грунта. В талой зоне грунта термоактивная влага находится только в жидкой форме, в зоне фазовых переходов вода и лед могут находиться в термодинамическом равновесии друг с другом и, наконец, в зоне мерзлого грунта практически вся термоактивная влага находится в фазе льда. В зависимости от того, в какой зоне протекает процесс переноса, механизм его существенно меняется, что заставляет рассматривать каждую

зону отдельно. Теплоемкость грунта в фазовой зоне меняется нелинейно и зависит от температуры и влажности грунта. Данная зависимость до сих пор не изучена с математической точки зрения. Поэтому в настоящей работе мы исследуем изменения теплоемкости многослойного грунта в зависимости от толщины каждого слоя и продолжительности времени промерзания.

В основу деления промерзающих грунтов на зоны был положен температурный признак. Это нашло свое отражение в том, что границами зон является θ – изотерма талой зоны, θ_1 – изотерма мерзлой зоны. Математическая модель изучаемой задачи подробно описана в работе [1], а сходимость разностной схемы для этой задачи изучена в работе [2].

Аккумуляция тепла и теплоемкость. Важнейшей характеристикой грунта, определяющей его способность аккумулировать тепло, является коэффициент теплоемкости. Как известно, удельная

теплоемкость всякого вещества (см., например, Энштейн, 1948) определяется формулой:

$$C = \frac{1}{m} \frac{dq}{dT}, \quad (1)$$

где m – масса всего вещества, q – количество тепла, сообщенное ему, и T – температура. При промерзании вся подтягивающаяся к фронту кристаллизации вода замерзает. Поэтому чем интенсивнее идет миграция в талой зоне, тем больше теплоты кристаллизации необходимо отвести от границы промерзания. Основное уравнение (1), определяющее удельную теплоемкость, остается справедливым и для грунтов, находящихся при температуре фазовых переходов. В этой зоне теплоемкость определяется по формуле

$$c(T) = c_{\phi} = \frac{m_m}{m} \left\{ (c_m + \omega_h c_h + \omega_l c_l) + q_0 T \right\} = \frac{m_m}{m} \bar{c}_{\phi}$$

Эта величина называется эффективной теплоемкостью грунта c_{ϕ} . Она является более общей характеристикой системы, чем истинная удельная теплоемкость

$$c = \frac{m_m}{m} (c_m + \omega_h c_h + \omega_l c_l) = \frac{m_m}{m} c_{\phi}$$

так как c_{ϕ} учитывает, кроме всего прочего, еще и теплоту фазовых переходов.

Эффективная теплоемкость c_{ϕ} обычно во много раз больше истинной теплоемкости c , так как льдистость возрастает с убыванием температуры довольно резко. Поэтому значение c_{ϕ} в этой области определяется главным образом членом $q_0 u$, величина которого зависит от влажности и от формы кривой незамерзшей воды

Система уравнений термопроводности для ненасыщенных грунтов. При совместном сосуществовании нескольких зон механизм распространения тепла и влаги в каждой из них остается тем же, что и при отсутствии других зон; взаимодействие же между зонами осуществляется только на подвижных границах, разделяющих их. Поэтому, учитывая эти особенности в работе [1], получено следующие системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0 \bar{c}_T \frac{\partial T_T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \omega_T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_0^2 K_\phi g \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \omega_T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \delta \frac{\partial T_T}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\}, \quad 0 < z < h(t), \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0 \bar{c}_\phi \frac{\partial T_\phi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_\phi \frac{\partial T_\phi}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \omega_\phi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\partial T_\phi}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\}, \quad h(t) < z < h_1(t), \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0 \bar{c}_m \frac{\partial T_m}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\}, \quad h_1(t) < z \leq \infty, \quad (4)$$

где $\bar{c}_\phi = \bar{c}_{\phi\phi} = \bar{c} + q_0 v$ – коэффициент эффективной теплоемкости; $\lambda_\phi = \lambda_{\phi\phi} = \lambda + q_0 \gamma_0 \beta$ – коэффициент эффективной теплопроводности; $h(t)$, $h_1(t)$ – пространственные границы зон, соответствующие изотермам θ и θ_1 .

Найдем условия сопряжения на границах $h(t)$, $h_1(t)$. По определению

$$\left. \begin{aligned} z = h(t), \quad T_T(h, t) &= \theta, \quad T_\phi(h, t) = \theta \\ z = h_1(t), \quad T_\phi(h_1, t) &= \theta_1, \quad T_m(h_1, t) = \theta_1 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Кроме того, на подвижных границах должен выполняться закон сохранения энергии:

$$z = h(t), \quad \lambda_\phi \frac{\partial T_\phi}{\partial z} - \lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial z} = p \frac{dh}{dt}, \quad (6)$$

Аналогично (6) можно написать уравнение баланса массы:

$$z = h(t), \quad \left[-\beta \frac{\partial T_\phi}{\partial z} \right] + \left[k \frac{\partial \omega_T}{\partial z} + \delta \frac{\partial T_T}{\partial z} \right] = \Delta_2 \omega \frac{dh}{dt}, \quad (7)$$

где $-k \left(\frac{\partial \omega_T}{\partial z} + \delta \frac{\partial T_T}{\partial z} \right)$ – представляет собой поток влаги к границе промерзания из талой зоны;

$-\beta \frac{\partial T_\phi}{\partial z}$ – поток влаги от границы промерзания в зону фазовых переходов; $\Delta_2 \omega \frac{dh}{dt}$ – количество влаги, фиксирующееся непосредственно на границе.

На границе между зоной фазовых переходов и зоной полностью мерзлого грунта миграция

влаги невозможна и $I_z = -\gamma_0 \beta \frac{\partial T_\phi}{\partial z} = 0$, независимо от величины градиента температуры. Это объясняется тем, что $\beta(\theta_1) = 0$. Непосредственным следствием является $z = h_1(t)$, $\frac{d\omega_1}{dt} = 0$ и $z = h_1(t)$, $\frac{d\omega_\phi}{dt} = 0$.

В работе [2] приведены численные методы решения задачи (1)–(7) и доказаны сходимость решения приближенной задачи к решению исходной в пространстве Соболева.

Первый эксперимент. Трехслойный грунт: верхний слой песок с толщиной 1 м; второй слой суглинка с толщиной 1 м; третий слой глина тол-

щиной 3 м; теплоемкость каждого слоя соответственно равны 0,67; 2,01; и 1,089 ккал/кг·град. Первоначальная влага соответственно равна 10, 25 и 35 процентов.

Второй эксперимент. Трехслойный грунт: верхний слой песок с толщиной 0,2 м; второй слой суглинка с толщиной 1 м; третий слой глина тол-



Рис. 1. Сравнительный график изменения теплоемкости многослойного грунта.
Ряд 1 – через 4 дня; ряд 2 – через 40 дней; ряд 3 – через 82 дня
после начала замерзания

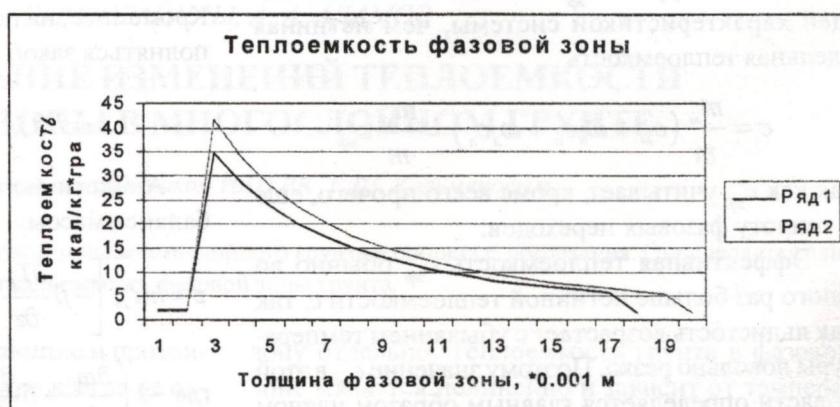
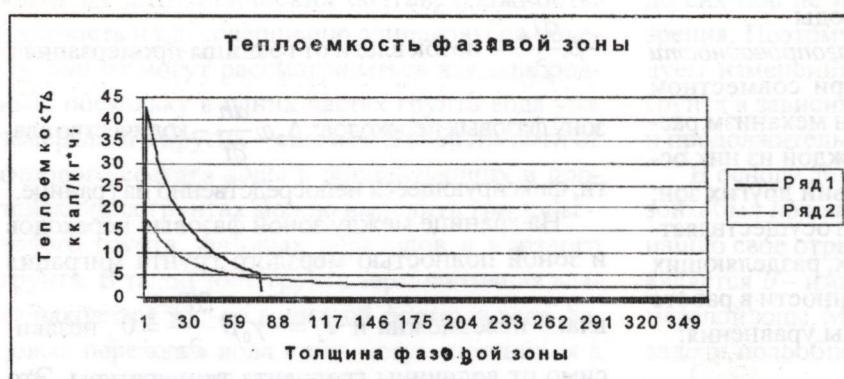


Рис. 2. Сравнительный график изменения теплоемкости многослойного грунта.

Через 4 дня после начала замерзания; ряд 1 – толщина песка 1 м; ряд 2 – толщина песка 0,2 м



толщиной 3 м; теплоемкость каждого слоя соответственно равны 0,67; 2,01; и 1,089 ккал/кг·град. Первоначальная влага соответственно равно 10, 25 и 35 процентов.

Рис. 3. Сравнительный график изменения теплоемкости многослойного грунта.

Через 82 дня после начала замерзания; ряд 1 – толщина песка 1 м; ряд 2 – толщина песка 0,2 м

ЛИТЕРАТУРА

- Мартынов Г.А. Тепло- и влагоперенос в промерзающих и оттаивающих грунтах. Основы геокриологии (мерзлотоведения). М.: 1959. Под. ред. Н. А. Цытович, гл. VI. С. 153–192.

2. Рысбайулы Б., Адамов А. Сходимость разностной схемы для уравнения кондуктивного теплообмена в многослойной области // Вестник НАН РК. 2007. №1. С. 60-62.

3. Рысбайулы Б., Адамов А.А. Устойчивость и сходимость приближенной задачи одномерного уравнения возникновения пучин на железнодорожном пути // ДАН НАН РК. 2004. №4. С. 5-8.

4. Рысбайулы Б., Адамов А.А. Сходимость приближенного метода расчета промерзания грунтов земельного полотна // Вестник НАН РК. 2005. №4. С. 54-57.

5. Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтраций воды. М.: Мир, 1971. 451 с.

6. Адамов А.А. Сходимость приближенного метода обобщенной задачи Стефана // Вестник ЕНУ. 2005. № 2(42). С. 45-50.

Резюме

Мұздаған кездегі көп қабатты грунттың фазалық аймағының жылусыйымдылығы зерттеледі. Әр қабаттың қалындығының жылусыйымдылыққа әсері анықталады.

Summary

The thermal conductivity of phase zone of multilevel frost penetrating ground is studied. It is defined the influence of the thickness of a separate layer to the phase zone heat capacity of the ground.

Казахстанско-Британский
технический университет;

Евразийский национальный
университет им. Л. Н. Гумилева

Поступила 8.08.07г.