

Б. РЫСБАЙУЛЫ, А. А. АДАМОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ФАЗОВОЙ ЗОНЫ В МНОГОСЛОЙНОМ ГРУНТЕ

Коэффициент теплопроводности λ представляет собой некоторую усредненную характеристику вещества. Поэтому величина λ определяется не только составом грунта и теплопроводностью отдельных его компонент (минеральный скелет, вода, лед, воздух), но и структурой и текстурой породы.

Большое влияние на величину коэффициента теплопроводности λ оказывает влажность грунта (Чудновский, 1948, 1954; Франчук, 1941, 1949; Kersten, 1949). Это происходит потому, что при замене содержащегося в порах воздуха водой улучшаются контакты между частицами ($\lambda_{\text{возд.}} = 0,02$ ккал/м·час·град, $\lambda_{\text{воды}} = 0,47$ ккал/м·час·град).

Величина λ зависит от минералогического состава грунта (Чудновский, 1948, 1954; Kersten, 1949). В литературе есть указания на то, что слоистые грунты анизотропны в отношении теплопроводности, причем последняя может меняться до 30% в зависимости от изменения направления теплового потока (Щербань, 1953). Аналогичное явление наблюдал Г. В. Порхаев и в мерзлых грунтах.

Наиболее исследована зависимость λ от объемного веса грунта \square (Чудновский, 1948), являющегося интегральной характеристикой текстуры. К сожалению, однозначного соответствия между текстурой и объемным весом нет, и судить о влиянии текстуры на теплопроводность по зависимости $\lambda = \lambda(\square)$ можно лишь весьма приближенно. Заметим только, что в естественных условиях объемный вес грунта меняется в сравнительно небольших пределах и изменение λ , вызванное им, как правило, также невелико. Однако тенденция здесь совершенно четкая: чем больше λ , тем контакт между частицами лучше и тем λ больше.

В грунтах тепло может распространяться как по минеральному скелету путем кондукции, так и через поры, причем через последние оно переносится кондукцией, конвекцией и излучением. При измерении величины λ всегда определяется суммарный поток тепла, состоящий из переносимых выше элементарных потоков. Поэтому

коэффициент теплопроводности является по существу некоторой эффективной характеристикой породы, учитывающей сразу несколько различных механизмов теплопередачи. Однако введение эффективной характеристики возможно лишь тогда, когда действие каждого механизма обусловлено одной и той же причиной (например, градиентом температуры).

Температурная зависимость λ проявляется несколько более четко, но она также довольно слаба (при повышении температуры на $\sim 50^\circ$ коэффициент теплопроводности возрастает на 10–20%; Чудновский, 1954). Последнее объясняется тем, что в обычных условиях доля тепла, переносимого с помощью внутриводной конвекции и излучения, интенсивность которых особенно сильно меняется с температурой, ничтожно мала.

Поток тепла и теплопроводность. Основной закон, кондуктивного механизма теплопередачи

$$\vec{Q} = -\lambda \nabla T$$

справедлив и для зоны фазовых переходов. Однако, в отличие от других зон, коэффициент теплопроводности λ здесь зависит от температуры даже в случае тонкодисперсных грунтов. В этом случае эффективный коэффициент теплопроводности определяется по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda + q_0 \gamma_0 \beta.$$

Поскольку $q_0 = 80$ ккал/кг, $\gamma_0 \cong 1500$ кг/м³, $\beta \cong 10^{-5} \div 10^{-6}$ м²/град·час, то $\lambda_{\text{эф}} - \lambda \cong 0,1 \div 1,0$ ккал/м·час·град, т. е. изменение коэффициента теплопроводности в результате миграции – вполне ощутимая величина.

Известно что, промерзающие и протаивающие грунты по своей структуре всегда неоднородны. 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 грун-

та, 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. Теплопроводность грунта в фазовой зоне меняется нелинейно и зависит от температуры и влажности грунта. Зависимость теплопроводности фазовой зоны многослойного грунта от температуры и влаги до сих пор не изучена с математической точки зрения. Поэтому в настоящей работе мы исследуем изменения теплопроводности 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. Математический модель изучаемой задачи подробно описано в работе [1], а сходимость разностной схемы для этой задачи изучена в работе [2].

Система уравнений термовлагопроводности 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 уравнения:

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

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

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

где $\bar{c}_\phi = \bar{c}_{\phi\phi} = \bar{c} + q_0 \nu$ – коэффициент эффективной теплоемкости, $\lambda_\phi = \lambda_{\phi\phi} = \lambda + q_0 \gamma_0 \beta$ – коэффициент эффективной теплопроводности, и $h(t)$, $h_1(t)$ – 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 $-\left(\frac{\partial \omega_T}{\partial z} + \delta \frac{\partial T_T}{\partial z} \right)$ (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 и $\Delta_2 \omega \frac{dh}{dt}$ – 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 $z = h_1(t)$, $\frac{d\omega_n}{dt} = 0$ и

$$z = h_1(t), \quad \frac{d\omega_\phi}{dt} = 0.$$

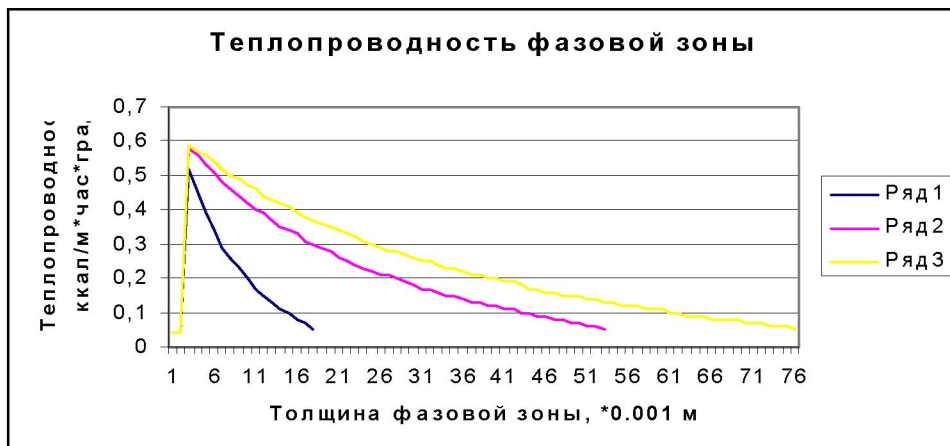


Рис. 1. Сравнительный график изменение коэффициента теплопроводности многослойного грунта. Ряд 1 – через 4 дня; ряд 2 – через 40 дней; ряд 3 – через 82 дня после начала замерзаний

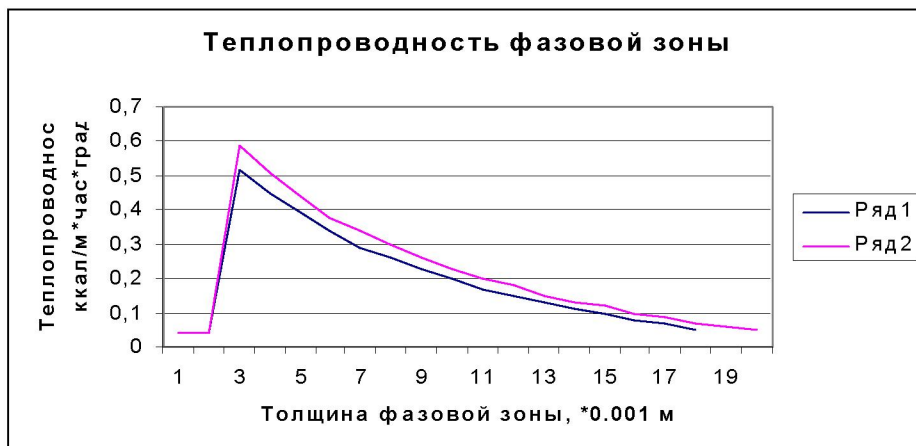


Рис. 2. Сравнительный график изменения теплопроводности многослойного грунта. Через 4 дня после начала замерзания; ряд 1 – толщина песка 1 м; ряд 2 – толщина песка 0,2 м

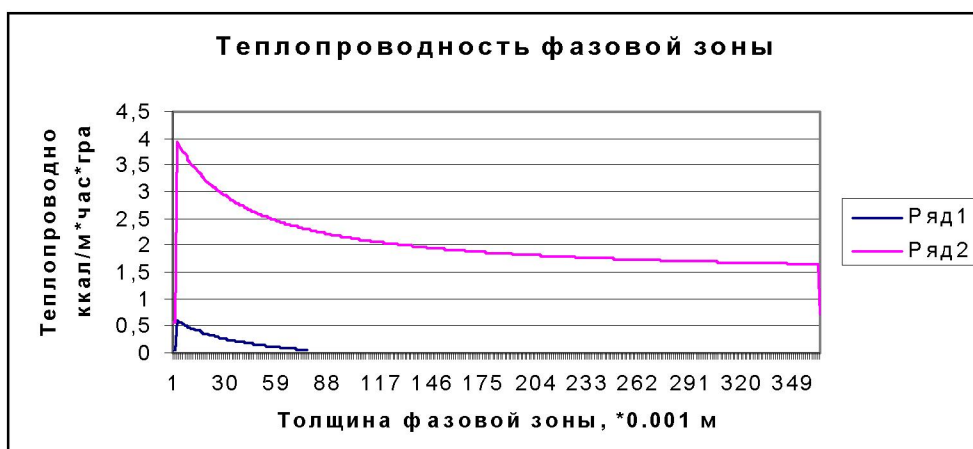


Рис. 3. Сравнительный график изменения теплопроводности многослойного грунта. Через 82 дня после начала замерзания; ряд 1 – толщина песка 1 м; ряд 2 – толщина песка 0,2 м

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 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.

Второй эксперимент. Трехслойный грунт: верхний слой песок с толщиной 0.2 м; второй слой суглинка с толщиной 1 м; третий слой глина 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартынов Г.А.* Тепло- и влагоперенос в промерзающих и оттаивающих грунтах. Основы геоэкологии (мерз-

лотоведения). М.: 1959. под. ред. Н. А. Цытович. Гл. VI. С. 153-192.

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

3. *Рысбайұлы 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. *Рысбайұлы 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.

Резюме

Тоңу кезіндегі көп қабатты грунттың фазалық аймағының жылуөткізгіштігі зерттеліп, әр қабат қалыңдығының жылуөткізгіштікке әсері анықталған.

Казахстанско-Британский технический Университет, г. Алматы;

Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана

Поступила 20.08.07г.