

ЗАВИСИМОСТЬ ВЛАГИ ОТ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ МНОГОСЛОЙНОГО ГРУНТА

Исследуется зависимость влаги от толщины слоя при промерзании многослойного грунта. Определены влияние толщины отдельного слоя на влагу многослойного грунта.

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 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 застав-

ляет рассматривать каждую зону отдельно. Теплоемкость грунта в фазовой зоне меняется нелинейно и зависит от температуры и влажности грунта.

Аккумуляция тепла и теплоемкость. Важнейшей характеристикой грунта, определяющей его способность аккумулировать тепло, является коэффициент теплоемкости. Как известно, удельная теплоемкость всякого вещества (см., например, Эпштейн, 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

$$c(T) = c_{эф} = \frac{m_m}{m} \left\{ (c_m + \omega_n c_n + \omega_l c_l) + q_0 T \right\} = \frac{m_m}{m} \bar{c}_{эф}.$$

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

$$c = \frac{m_m}{m} (c_m + \omega_n c_n + \omega_l c_l) = \frac{m_m}{m} \bar{c}$$

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

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

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 ω (Чудновский, 1948, 1954; Франчук, 1941, 1949; Kersten, 1949). Это происходит потому, что при замене содержащегося в порах воздуха водой улучшаются контакты между частицами ($\lambda_{возд} = 0,02$ ккал/м·час·град, $\lambda_{воды} = 0,47$ ккал/м·час·град).

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

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

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

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 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] получены следующие системы уравнения:

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

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

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

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

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

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

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

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

Аналогично (6), можно написать уравнение баланса массы:

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

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 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 $I_z = -\gamma_0 \beta \frac{\partial T_\phi}{\partial z} = 0$, незави-

симо от величины градиента температуры. Это объясняется тем, что $\beta(\theta_1) = 0$. Непосредствен-

ным следствием является $z = h_1(t), \frac{d\omega_\lambda}{dt} = 0$ 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. В настоящей работе проведены численные расчеты, в которых определяются температура и влага во всех трех зонах многослойного грунта в процессе промерзаний.

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

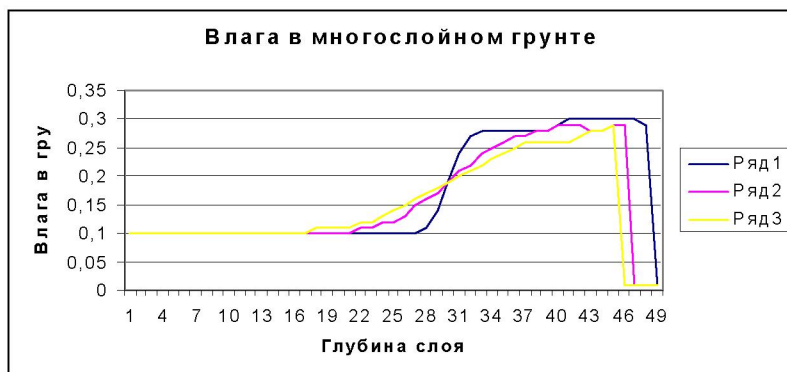


Рис. 1. Сравнительный график изменения влаги по времени. Ряд 1 влага через 4 дня, ряд 2 влага через 40 дней, ряд 3 влага через 83 дня

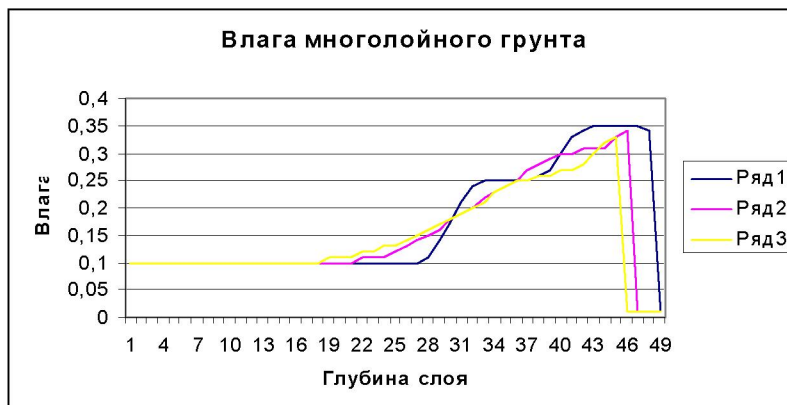


Рис. 2. Сравнительный график изменения влаги по времени. Ряд 1 влага через 4 дня, ряд 2 влага через 41 дней, ряд 3 влага через 82 дня

Рис. 3. Сравнительный график изменения влаги по времени.

Ряд 1 влага через 4 суток,
ряд 2 влага через 40 суток,
ряд 3 влага через 82 суток.

Перед вступлением холода
многослойный грунт имел
следующие характеристики:
влажность глины 0,1;
влажность суглинка 0,25;
влажность песка 0,35

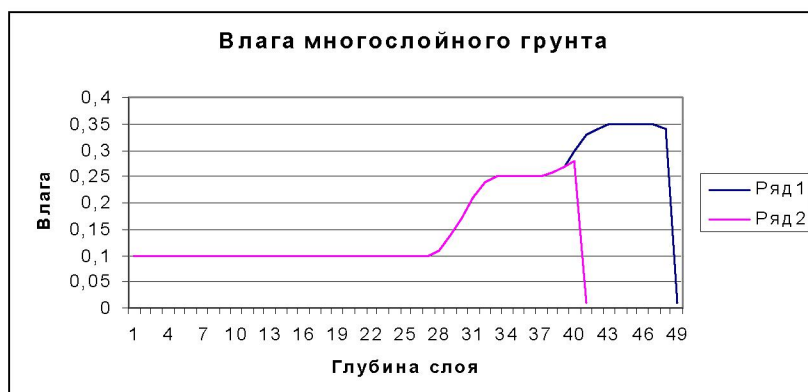
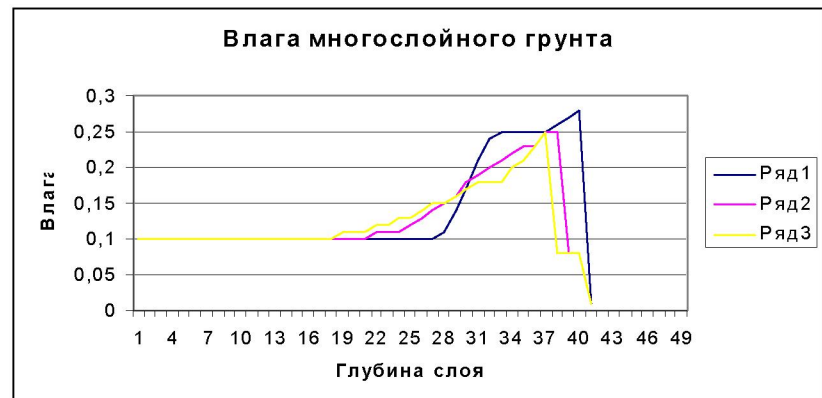


Рис. 4. Сравнительный график изменения влаги в зависимости от слоя грунта через 4 дня. Ряд 1 верхний слой (песок) имеет глубину 1 м, ряд 2 верхний слой (песок) имеет глубину 0,2 м

Рис. 5. Сравнительный график изменения влаги в зависимости от слоя грунта через 40 дней. Ряд 1 верхний слой (песок) имеет глубину 1 м, ряд 2 верхний слой (песок) имеет глубину 0,2 м

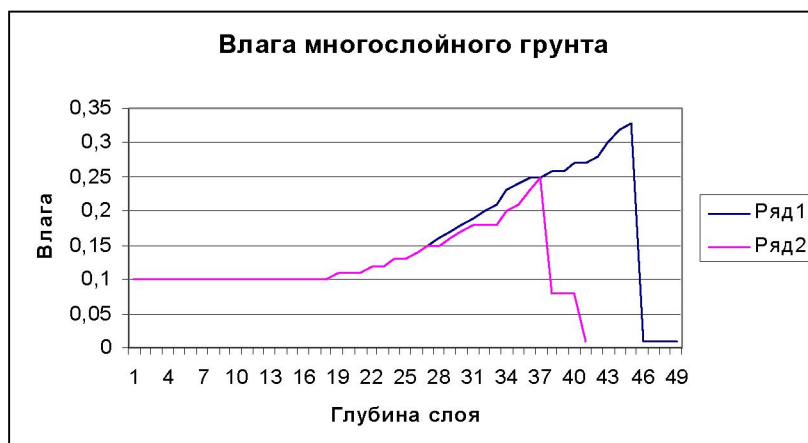
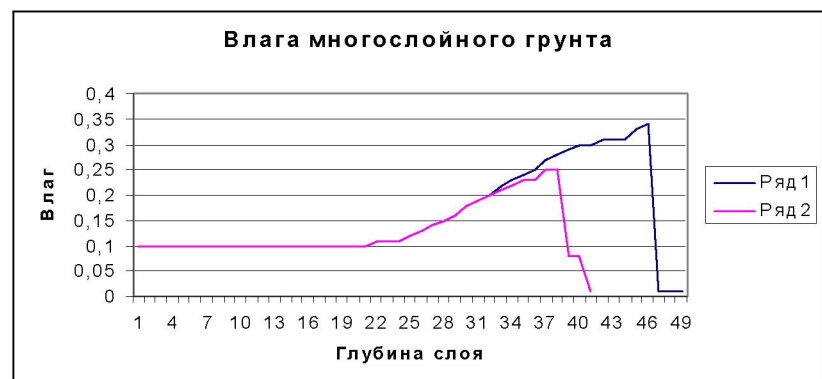


Рис. 6. Сравнительный график изменения влаги в зависимости от слоя грунта через 83 дня. Ряд 1 верхний слой (песок) имеет глубину 1 м, ряд 2 верхний слой (песок) имеет глубину 0,2 м

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.

Второй эксперимент. Состав грунта: 3.8 м глина, 1 м суглинка, 0.2 м песок. На поверхности лежит песок, второй слой суглинка, а третий слой глина.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартынов Г.А.* Тепло- и влагоперенос в промерзающих и оттаивающих грунтах. Основы геокриологии (мерзотоведения) / Под. ред. Н.А. Цытович. М., 1959. 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 filtrаций воды. М.: Мир, 1971. 451 с

6. *Рысбайұлы Б.* Метод конечных разностей для одномерного теплопроводного вязкого сжимаемого газа с контактным разрывом // Сибирский журнал вычислительной математики СО РАН. 2001. № 3. Т. 4. С. 295-303.

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

Резюме

Көп қабатты грунттың тоңға айналу процесіндегі ылғалдылықтың қабаттың қалыңдығына тәуелділігі зерттелді. Көп қабатты грунттың ылғалдылығына жеке қабаттардың қалыңдықтарының әсері анықталады.

*Казахстанско-Британский
технический университет;*

Евразийский национальный

университет им. Л. Н. Гумилева Поступила 20.06.07г.