

УДК 622.02

Теплопроводность как один из процессов взаимодействия мерзлых песчано-глинистых горных пород с водной средой



КОЗЛОВ Вадим Анатольевич

*Канд. техн. наук, доцент, главный технолог
компании «Коралина Инжиниринг»
105005, г.Москва, Россия, e-mail: vak@coralina.ru*

В статье рассматриваются механизм водно-тепловой оттайки мерзлых осадочных горных пород, включающий такие одновременно протекающие процессы как: теплопередача с поверхности в мерзлую горную породу, которая приводит к вакуумно-фильтрационному эффекту, за счет таяния льда; фильтрационное движение воды в поверхностный слой горной породы за счет капиллярных сил; электроосмос, обуславливающий движение воды при движении ионов, растворенных в воде электролитических компонентов минералов, под действием электрического поля, возникающего при контакте мерзлой горной породы с водой. Показано, что экспериментально полученные значения скорости движения фронта фазового превращения льда в воду в мерзлой горной породе при разных условиях эксперимента в 2,6÷11,8 раз превышает расчетные значения полученное решением задачи теплопроводности без учета фильтрации воды в поверхностный слой оттаивающей горной породы. Таким образом, можно сделать вывод, что наряду с теплопередачей фильтрация воды в поверхностный слой оттаивающей горной породы за счет капиллярных сил, вакуумно-фильтрационного эффекта и электроосмоса многократно ускоряет процесс оттайки мерзлой осадочной горной породы.

Ключевые слова: *теплопроводность, фильтрация, капиллярная сила, электроосмос, фазовый переход лед-вода, песчано-глинистая горная порода*

При контакте поверхности массива мерзлых осадочных горных пород с водной средой, например при водно-тепловой мелиорации, возникают следующие процессы переноса энергии и вещества [1]:

1. Перенос теплоты от воды в массив мерзлой горной породы, определяемый теплопроводностью горной породы. Нагрев мерзлой горной породы приводит к таянию льда и возникновению вакуумно-фильтрационному эффекту. Плотность льда на 8,3 % меньше плотности воды и, следовательно, при фазовом переходе лед - вода первоначальный объем, занимаемый льдом в горной породе, уменьшится, способствуя подтоку окружающей воды в образующиеся пустоты.

2. Фильтрационное движение жидкости за счет градиента давления возникающего за счет капиллярных сил, возникающих при контакте воды с трещинами, образованными при замораживании влажной горной породы.

3. Электроосмос, приводящий к движению воды вместе с движением ионов, растворенных в воде электролитов, под действием естественного электрического поля, возникающего при контакте мерзлой горной породы с водной средой.

ИДЕЯ КРАТКО	ПРОБЛЕМА При контакте с водой мерзлой песчано-глинистой горной породы происходит быстрая ее дезинтеграция с потерей прочности	ПОЧЕМУ ЭТО ПРОИСХОДИТ Считается, что основным процессом потери прочности горной породы является ее нагрев за счет передачи тепла, т.е. теплопроводность	СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТОВ В экспериментах скорость движения фронта фазового перехода лед-вода многократно (3-11 раз) превосходит расчетную скорость движения фронта за счет теплопроводности
------------------------	---	---	--

В теории мерзлотоведения для расчета оттайки мерзлых грунтов или замораживании обводненных грунтов в основном учитывается только прямая передача тепла за счет теплопроводности грунта. Произведем расчет и оценим долю, вносимую теплопроводностью вещества горной породы в общий процесс взаимодействия мерзлой осадочной горной породы с водной средой.

Такие процессы как промерзание влажных осадочных горных пород и таяние льда в них при нагреве происходит с изменением агрегатного состояния вещества.

Процесс переноса теплоты, выделяемой или поглощаемой во фронте фазового превращения, например, при контакте массива мерзлой горной породы с водной средой, можно рассматривать как процесс нестационарной теплопроводности в полуограниченном теле (массиве) [2, 3].

Когда интенсивность выделения (поглощения) теплоты в зоне фазового превращения существенно превышает отвод (подвод) теплоты из нее за счет теплопроводности, то размеры такой зоны агрегатного превращения вещества локализируются в узком слое, называемом фронтом превращения вещества.

В соответствии с балансом подвода и отвода теплоты фронт фазового превращения вещества будет перемещаться с определенной скоростью, захватывая новые области процессом образования новой фазы. Температура во фронте фазового превращения принимается равной температуре фазового перехода при данном давлении (температура плавления и т.д.).

Рассмотрим задачу о движении фронта фазового превращения льда в мерзлой горной породе в воду, происходящем при температуре T_{ϕ} , в полуограниченной среде. В начальный момент времени $\tau = 0$ имеется исходная фаза – лед в мерзлой горной породе с постоянной по объему температурой T_{II} . На свободной поверхности исходной фазы поддерживается постоянная температура окружающей среды (воды) $T_C > T_{II}$. При этом

температура $T_C > T_\phi$. Считаем поверхность горной породы покрытой непроницаемой для вещества окружающей среды пленкой бесконечной теплопроводности и нулевой теплоемкости.

В этом случае на поверхности льда начинается процесс фазового перехода, так как тепловой поток, направленный к поверхности исходной фазы от окружающей среды приводит к нагреву льда. По мере нагрева льда до температуры фазового перехода T_ϕ происходит процесс его агрегатного превращения и появляется новая фаза – вода. С течением времени процесс образования новой фазы захватывает все больший объем исходной фазы, количество новой фазы увеличивается, а граница раздела фаз (фронт превращения вещества) продвигается в объем исходной фазы. При этом процесс нагрева льда сопровождается увеличением средней температуры мерзлой горной породы.

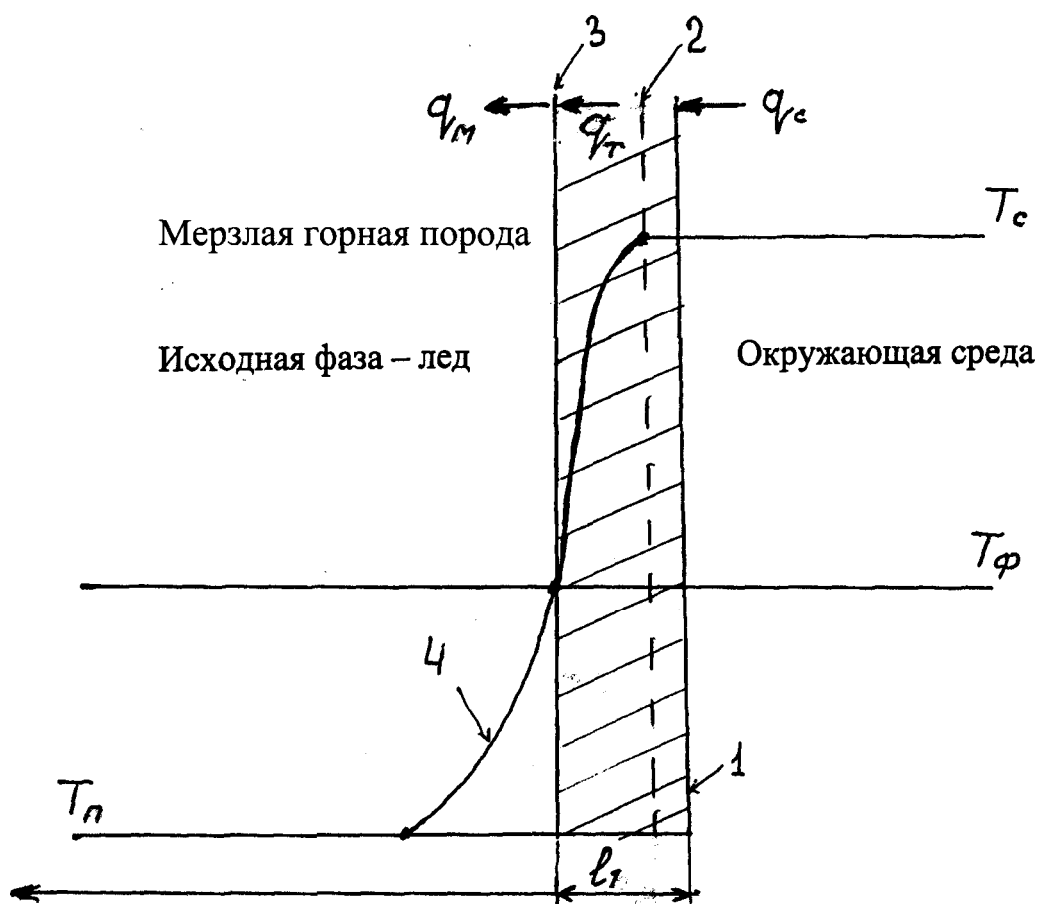


Рис. 1. Тепловая модель «таялая горная порода – мерзлая порода»:

1 – положение границы «горная порода – окружающая среда» в начальный момент времени $\tau = 0$; 2 – положение границы в момент времени $\tau_1 > 0$; 3 – положение фронта фазового превращения в момент времени τ_1 ; 4 – распределение температуры в талой и мерзлой горной породе.

Модель процесса агрегатного превращения льда в новую фазу – воду схематически показан на рис. 1., где приняты следующие обозначения: T_C - температура окружающей среды; T_Π - начальная температура мерзлой

горной породы вдали от поверхности раздела фаз; T_ϕ - температура фазового перехода (фронта превращения) льда в воду; l_1 - расстояние от границы раздела «горная порода – окружающая среда» в начальный момент времени до фронта фазового превращения; q_C , q_T , q_M - тепловые потоки, соответственно в окружающей среде, талой горной породе и мерзлой горной породе.

Задача состоит в нахождении распределения температурного поля в системе «таялая связная порода – мерзлая порода» в любой точке исследуемой области в любой момент времени, а также вычислении скорости движения фронта фазового превращения в зависимости от краевых условий.

Математически задачу об оттаивании мерзлых связных пород, в которых фазовые переходы совершаются при постоянной температуре, и образуется фронт оттаивания, для случая полуограниченного пространства можно сформулировать, как решение уравнений теплопроводности для граничных условий первого рода:

$$\text{в талой зоне} \quad \frac{\partial T_T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{при } 0 < x < l_1;$$

$$\text{в мерзлой зоне} \quad \frac{\partial T_M}{\partial \tau} = a_M \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{при } l_1 < x < \infty;$$

при начальном условии $T_M(x, 0) = T_{II}$; при граничном условии $T_T(0, \tau) = T_C$;

при условии на границе раздела талой и мерзлой зон $T_M(l_1, \tau) = T_T(l_1, \tau) = T_\phi = \text{const}$,

$$\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x} \Big|_{x=l_1} - \lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial x} \Big|_{x=l_1} = L_\phi V_i \rho_l \frac{\partial x}{\partial \tau} \Big|_{x=l_1}. \quad (1)$$

В приведенных выражениях приняты следующие условные обозначения: T - температура; τ - время; l_1 - расстояние от поверхности горной породы в начальный момент времени до фронта фазового превращения; a - коэффициент температуропроводности; λ - коэффициент теплопроводности; L_ϕ - теплота фазового превращения лед-вода; V_i - доля льда в единице объема мерзлой горной породы; ρ_l - плотность льда; индексы «Т» и «М» относятся соответственно к талой и мерзлой зонам.

Решение задачи о промерзании (протаивании) влажного грунта широко известной под названием задачи Стефана, имеет огромное значение не только для теоретического мерзлотоведения, но и для строительства и горной промышленности. Австрийский физик и математик Стефан получил решение, согласно которому закон движения границы раздела двух фаз имеет вид $\beta \cdot \tau^{1/2}$, где β - корень трансцендентного уравнения, отыскиваемый графическим путем или с помощью ЭВМ [4]:

$$\frac{2\lambda_M(T_\phi - T_{II})}{\sqrt{a_M} \operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_M})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_M}\right) - \frac{2\lambda_T(T_C - T_\phi)}{\sqrt{a_T} \operatorname{erfc}[\beta/(2\sqrt{a_T})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_T}\right) = L_\phi V_i \rho_l \sqrt{\pi} \beta. \quad (2)$$

В этом уравнении: $erf(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-U^2} dU$ - функция ошибок;

$erfc(U) = 1 - erf(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_U^\infty e^{-U^2} dU$ - дополнительная функция ошибок.

Рассмотрим решение тепловой модели, представляющей нагрев кусков мерзлых связных горных пород в виде шара.

При граничных условиях первого рода на поверхности куска мерзлой горной породы в виде шара радиусом R заданы:

начальное условие $T_M(r, 0) = T_{II}$;

граничные условия $T_T(0, t) = T_C$, $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$.

Аргументами будут являться $Fo = a\tau/R^2$ и $\eta = r/R$,

где Fo – критерий подобия Фурье; η – безразмерная координата; r – текущая координата относительно центра шара.

Решение уравнения теплопроводности для указанных условий относительно безразмерной температуры θ имеет следующий вид:

$$\theta = \frac{T_\phi - T_{II}}{T_C - T_{II}} = \sum_{n=1}^{\infty} 2(-1)^{n+1} \frac{\sin(n\pi\eta)}{n\pi\eta} \exp(-n^2\pi^2 Fo). \quad (3)$$

Для центра шара решение относительно безразмерной температуры будет:

$$\theta_u = \frac{T_\phi - T_{II}}{T_C - T_{II}} = 1 - 2\sqrt{\frac{1}{\pi Fo}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2}{4 \cdot Fo}\right]. \quad (4)$$

При граничных условиях третьего рода на поверхности куска мерзлой горной породы в виде шара заданы:

начальное условие $T_M(r, 0) = T_{II}$;

граничные условия $\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (T_C - T_{II})$, $T_C = \text{const}$, $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$.

Аргументами в данной задаче являются: $Fo = a\tau/R^2$, $Bi = \alpha R/\lambda$, $\eta = r/R$,

где Bi – критерий подобия Био; α .- коэффициент теплоотдачи.

Безразмерная температура в центре шара:

$$\theta_u = \frac{T_\phi - T_{II}}{T_C - T_{II}} \approx 2 \cdot Bi \exp[(Bi-1)^2 Fo + (Bi-1)] \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2\sqrt{Fo}} + (Bi-1)\sqrt{Fo}\right]. \quad (5)$$

По уравнениям (4) и (5) можно вычислить время за которое температура в центре шара станет равной T_ϕ , т.е. когда фронт фазового превращения достигнет центра шара, и, следовательно, можно вычислить скорость движения фронта фазового превращения. Однако, время за которое

температура в центре шара станет равной T_ϕ по уравнениям (4) и (5) определяется без учета теплоты фазового перехода лед-вода. Истинное значение времени за которое температура в центре шара станет равной температуре фазового перехода будет во столько раз больше расчетных значений, во сколько теплота фазового перехода лед-вода в единице объема горной породы больше теплоты нагрева горной породы от температуры T_{II} до $\frac{1}{2} T_C$.

Численные решения уравнений (2), (4), (5) для мерзлой связной горной породы типа супеси, используемой в экспериментах в лаборатории ТИ (Ф) ЯГУ при условиях: $T_\phi = -1 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{II} = -17 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_C = +10 \text{ }^\circ\text{C}$; $V_i = 30 \%$, с учетом теплоты фазового перехода лед-вода приведены в таблице 1. В экспериментах на образцах мерзлой горной породы кубической формы с ребром 70 мм получено значение $\beta_{\text{экс.}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{1/2}$.

При расчете (4) и (5) уравнений радиус шара принимался из условия равенства геометрических объемов шара и куба с ребром 70 мм. Таким образом, эквивалентный радиус шара $R = 4,34 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

В решении задачи третьего рода, уравнение (5), для сравнения принимались два значения коэффициента теплоотдачи воды горной породе 100 и 500 Вт/(м²·К). Эти значения, согласно работе [3], находятся в пределах области изменения коэффициента теплоотдачи для естественной конвекции воды возле поверхности твердого тела.

Таблица 1.

Таблица расчетных скоростей движения фронта фазового превращения в мерзлой горной породе (типа супеси) при различных условиях постановки задачи теплопроводности

Условия, показатели	Полуограниченное пространство (массив горной породы)	Кусок горной породы шарообразной формы эквивалентного радиуса		
		Первого рода	Третьего рода при α , Вт/(м ² ·К)	
Краевые условия задачи	Первого рода (температура на поверхности const)		100	500
Номер уравнения по тексту статьи для вычисления $\beta_{\text{расч.}}$	(2)	(4)	(5)	(5)
Расчетная скорость движения фронта фазового превращения, $\beta_{\text{расч.}}$ [м/с ^{1/2}]	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$

<p>Отношение экспериментального значения скорости $\beta_{\text{экс.}}$, для образца горной породы кубической формы с ребром 70 мм, к расчетному значению</p>	<p>2,6</p>	<p>9,3</p>	<p>11,8</p>	<p>10,8</p>
---	------------	------------	-------------	-------------

Из таблицы 1 видно, что экспериментально полученное значение скорости движения фронта фазового превращения лед-вода в мерзлой горной породе $\beta_{\text{экс.}}$ в 2,6÷11,8 раз превышает расчетные значения $\beta_{\text{расч.}}$, полученное решением задачи теплопроводности без учета фильтрации воды в поверхностный слой оттаивающей горной породы.

Вывод

Сравнение расчетной скорости движения фронта фазового перехода лед-вода за счет процесса передачи тепла в горную породу теплопроводностью с реальной скоростью движения фронта оттайки горной породы показали, что процесс фильтрации воды в поверхностный слой мерзлой осадочной горной породы за счет капиллярных сил, вакуумно-фильтрационного эффекта и электроосмоса по скорости многократно превосходит процесс теплопроводности по эффективности переноса тепла.

Литература:

1. Козлов В.А., Рочев В.Ф. К теории разрушения мерзлых глинистых горных пород в водной среде при необратимом термодинамическом процессе.// Горнодобывающая Якутия на рубеже III-го тысячелетия: Сб. научных трудов. Якутск: Изд-во Якутского ун-та, 2000.
2. Козлов В.А. Нестационарная теплопроводность при оттаивании мерзлых осадочных горных пород. // Тезисы докладов участников II Республиканской научно-практической конференции «Пути решения актуальных проблем добычи и переработки полезных ископаемых Южной Якутии». – Нерюнгри, изд-во ЯГУ, – 2004, С. 31–32.
3. Теплотехника: Учебник для вузов. // Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др. – М.: Высшая школа, 2000.
4. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах: учебник для вузов. – М.: Недра, 1990.