

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.328/345

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
СЕГРЕГАЦИОННОГО ЛЬДА\*

Р.И. Гаврильев

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, Мерзлотная, 36, Россия, mpi@ysn.ru*

Для оценки коэффициента теплопроводности сегрегационного льда можно использовать модельное представление пористого льда с цилиндрическими капиллярными (сквозными) и замкнутыми порами вдоль теплового потока, а также со сферическими воздушными включениями при учете дополнительного конвективного теплопереноса посредством диффузии водяного пара в пузырьках. Расчеты можно осуществить на основе теории обобщенной проводимости Максвелла–Рэля. Показано, что рассчитанные значения коэффициента теплопроводности сегрегационного льда оказались гораздо выше, чем экспериментально измеренные, что, возможно, связано с некоторыми методическими упущениями как в расчете, так и в эксперименте. В дальнейшем требуется проведение новых экспериментов на методической основе, свободной от ограничений по отношению к слоистости испытуемой среды, и осуществление рентгенографических исследований по уточнению структуры сегрегационного льда.

*Сегрегационный и объемный льды, пузырьки воздуха, коэффициенты тепло- и температуропроводности, объемная теплоемкость, диффузия пара*

THEORETICAL ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF SEGREGATED ICE

R.I. Gavriliev

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 36, Russia, mpi@ysn.ru*

To estimate the thermal conductivity of segregated ice, a model of porous ice with open and close cylindrical pores along the heat flow and with spherical air bubbles can be used taking into account the additional convective heat transfer by vapour diffusion in air bubbles. The basis (frame) of the model consists of a continuous body of pure hexagonal ice (ice I). Calculations can be based on the Maxwell–Rayleigh theory of generalized conductivity. The calculated thermal conductivities of segregated ice are much higher than the experimental values, probably due to some methodological shortcomings in both the calculation and the experiment. New experiments need to be conducted using a methodology free of limitations on the layered structure of the test medium, and X-ray investigations are required to determine more precisely the structure of segregated ice.

*Segregated and bulk ice, air bubbles, thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric heat capacity, vapour diffusion*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, сегрегационные льды формируются в промерзающих тонкодисперсных породах в результате подтягивания свободной воды к фронту промерзания. При этом образуются слоистые и сетчатые криогенные текстуры.

В практике тепловых расчетов при оценке теплофизических свойств мерзлых пород с криогенной текстурой параметры сегрегационного льда обычно задают исходя из параметров чистого объемного льда. Однако в зависимости от условий миграции влаги при ее замерзании в прослойке

льда могут развиваться различные сети воздушной пористости, что будет отражаться на теплофизических свойствах сегрегационного льда. Так, по экспериментальным данным авторов работ [Гречищев и др., 2002, 2003], коэффициент теплопроводности сегрегационного льда, образованного при медленном замораживании супесчаного грунта в лабораторных условиях, при пористости около 10 % составляет порядка 1,1 Вт/(м·К), что почти в два раза меньше теплопроводности ( $\lambda$ ) чистого льда. Этот факт авторы объясняют наличием в се-

\* Печатается в порядке обсуждения.

грегационном льду пузырьков воздуха и тем, что во время криогенной миграции влаги растворенный в ней воздух может создавать самостоятельный массопоток со своими характеристиками внутри газированного флюида “вода + воздух”, выделяясь в виде пузырьков при фазовом переходе воды в лед, фиксируясь в последнем.

На этом фоне любопытно для сравнения привести экспериментальные данные ряда авторов: Н.Н. Зубова [1945], Ю.Л. Назинцева [1964] и В.В. Шулейкина [1968], полученные для пористого объемного (массивного) льда. Согласно этим данным, теплопроводность льда при пористости около 20 % составляет 1,5–1,8 Вт/(м·К), в среднем 1,7 Вт/(м·К), т. е. величина  $\lambda$  льда за счет пористости порядка 20 % уменьшилась только на 25 %. Таким образом, экспериментальные данные исследователей по сегрегационному и объемному льду сильно расходятся.

Интересно было бы проанализировать этот вопрос с единых теоретических позиций посредством модельного представления пористого льда с учетом специфики формирования состава и структуры льда и строения пор при замерзании воды в тонкодисперсном грунте и свободном пространстве.

#### СВЕДЕНИЯ О СТРУКТУРЕ И СОСТАВЕ СЕГРЕГАЦИОННОГО И ОБЪЕМНОГО ЛЬДА. ХАРАКТЕРИСТИКА СТРОЕНИЯ ПОР ВО ЛЬДУ

Для льда известно девять полиморфных форм [Эйзенберг, Кауцман, 1975]. В нормальных природных условиях существует лед I с гексагональной кристаллической сингонией – обычный или гексагональный лед. Другие восемь форм полиморфного льда созданы искусственно при высоком давлении (выше 2 кбар). Они характеризуются высокой плотностью и находятся в метастабильном состоянии. При переходе к нормальному давлению при низких температурах они превращаются в обычный гексагональный лед. Описанное относится к объемному льду.

В грунте связанная вода испытывает огромное давление поверхностных сил минеральных частиц. Замерзая, она выходит из сферы влияния поверхностных сил минерального скелета грунта и образует “свободный” лед. При этом основная масса воды кристаллизуется в виде “макроскопических” прослоек льда. Рентгенографические исследования, проведенные Т.П. Костецкой и Г.А. Мартыновым [Основы..., 1959], показали, что даже при образовании “микроскопических” кристалликов льда-цемента последние выходят из непосредственного контакта с поверхностью частиц и, следовательно, также образуют “свободный” лед. То есть можно заключить, что сегрегационный и объемный льды по структуре одинаковы и относятся ко льду I с кристаллами гексагональной сингонии (обычный гексагональный лед).

В мерзлых грунтах структура сегрегационного льда тесно связана с составом грунта и условиями промерзания. Согласно исследованиям О.С. Конновой [1957], в тонких шлирах сегрегационного льда мерзлого пылеватого суглинка преобладают кристаллы пластинчатой формы, а в более мощных ледяных прослойках – преимущественно столбчатые кристаллы. Однако независимо от этого чистый лед без пузырьков воздуха имеет постоянный коэффициент теплопроводности, равный 2,25 Вт/(м·К) при нормальном атмосферном давлении и температуре 0 °С; кроме того, у него не наблюдается анизотропия коэффициента теплопроводности [Вейнберг, 1940]. Это объясняется тем, что теплопроводность льда как кристаллического тела определяется фонной передачей тепловой энергии колеблющейся кристаллической решеткой, независимой от макростроения ледяных кристаллов.

Прослойки сегрегационного льда обычно содержат некоторое количество минеральных примесей. Однако их влияние на коэффициент теплопроводности льда должно быть незначительно. Это можно показать на результатах наших исследований (рис. 1), проведенных для влагонасыщенных мерзлых грунтов в широком диапазоне изменений влажности [Лаврильев, 1989]. Как видно на рис. 1, с увеличением влажности коэффициент теплопроводности влагонасыщенных мерзлых

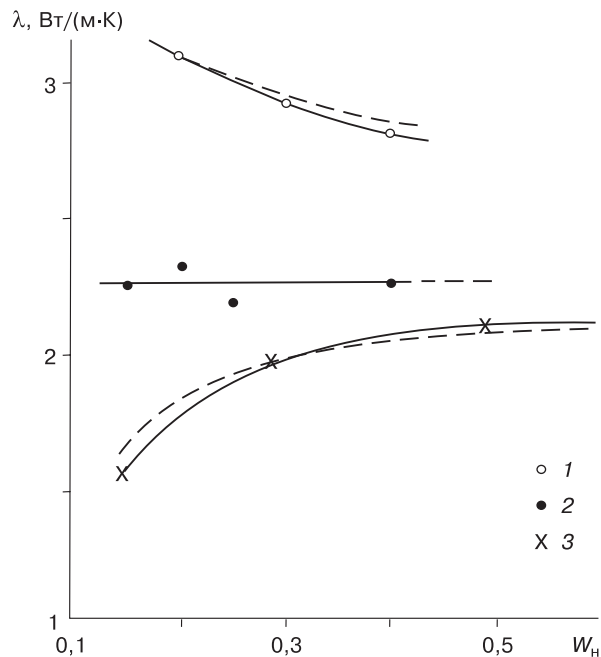


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности аллювиальных грунтов от влажности насыщения в мерзлом состоянии:

сплошные кривые – экспериментальные результаты, штриховые – расчетные; 1 – песок; 2 – супесь, 3 – суглинок.

грунтов стремится к теплопроводности льда. Сказанное тем более соблюдается для льда с минеральными примесями, содержание которых значительно меньше, чем количество минерального скелета во влагонасыщенных грунтах. Во всяком случае влияние примесей на коэффициент теплопроводности льда вполне можно учесть на основе теории Максвелла–Рэлея. Например, для этой цели можно привести следующее выражение, построенное по данным рис. 1 [Гаврильев, 2004]:

$$\lambda(W_n) = 2,25 \left[ 1 + \frac{l_1}{1 + l_2(W_n - 0,15) + l_3(W_n - 0,15)^2} \right], \quad (1)$$

где  $W_n \geq 0,15$ ;  $W_n$  – влажность полного насыщения грунта. Значения параметров  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  даны в таблице.

Между влажностью насыщения ( $W_n$ ) и объемным содержанием примеси грунта ( $v_{ск}$ ) существует следующая связь:  $W_n = (2,7/v_{ск}) - 0,37$ .

Основным фактором, от которого зависит величина коэффициента теплопроводности льда, является его пористость.

Пористость во льду возникает в основном при большой скорости замерзания воды и зависит от условий перемешивания воды в процессе замерзания и интенсивности потока воздуха в воде. В естественных условиях это может наблюдаться при развитом ветровом перемешивании верхнего слоя воды. Для формирования сегрегационного льда плотностью 0,7–0,8 г/см<sup>3</sup> скорость потока из пузырьков воздуха, согласно оценкам [Гречищев и др., 2003], может в 3–5 раз превышать скорость криогенного миграционного потока поровой влаги.

Поры в объемном льду могут различаться своей формой, взаимным расположением, величиной, наличием или отсутствием сообщения с верхней и нижней поверхностями ледяного покрова [Савельев, 1971]. В зависимости от градиентных условий температуры и давления при образовании льда поры могут иметь самую разную вытянутость вдоль теплового потока. Со временем под действием диффузионного переноса пара внутри пор в результате различий упругости пара воды в щелях или углублениях и над плоской стенкой происходит непрерывный процесс преобразования формы пор [Савельев, 1971]. Вначале удлиненные капил-

лярные поры в узких перешейках зарастают, образуются замкнутые ячейки, расположенные друг за другом в виде цепочек. В конце концов, последние принимают сферическую форму, как наиболее соответствующую минимуму поверхностной (свободной) энергии по условию термодинамического равновесия. Но это процесс длительный и происходит за геологическое время.

В результате механических или термических воздействий на ледяной покров во льду образуется большое количество мелких трещин, придающих ему непрозрачный молочный цвет. Однако трещинки довольно быстро, буквально за 10–30 ч, исчезают, зарастают, и лед вновь приобретает прозрачность [Савельев, 1971].

При замораживании грунтов в лабораторных условиях чаще всего образуются вытянутые вдоль теплового потока (перпендикулярно к плоскости шпиря) поры. Например, в опытах О.С. Конновой с каолином в шпирях содержалось много цилиндрических пор, вытянутых параллельно кристаллам, часть пор располагалась внутри кристаллов [Савельев, 1971].

В результате проведенного обзора приходим к следующему выводу относительно структуры и строения сегрегационного льда. Сегрегационный лед состоит из обычного льда I, как и в случае объемного льда, содержит некоторое количество минеральных включений и воздушных пор. Форма пор самая различная и со временем меняется, стремясь, в конце концов, к сферической. В начале процесса образования льда, в том числе и в лабораторных опытах, поры являются преимущественно цилиндрически капиллярными вдоль теплового потока, со временем они прерываются в узких перешейках и становятся замкнутыми. Преобразование формы и размеров воздушных включений во льду происходит за длительное геологическое время. Трещинные поры, создающие мутность льда, исчезают быстро.

Для выяснения вопроса о больших отличиях коэффициентов теплопроводности сегрегационного и объемного льда в зависимости от его пористости проведем модельный эксперимент с пористым льдом. За основу модельного представления структуры пористого льда примем сплошное тело из чистого гексагонального льда (остов), содержащее воздушные поры различной формы, вытянутости и расположения относительно теплового потока, порой даже отвлекаясь в какой-то степени от реальной картины. При этом ставится задача оценки возможных пределов изменения значений коэффициента теплопроводности пористого льда для сравнения с приведенными данными по сегрегационному льду.

Рассмотрим следующие формы пор: сферические, цилиндрические капиллярные (сквозные) и замкнутые, блинчато-сплюснутые. Последние

**Значения параметров формулы (1) для основных типов грунтов**

Грунт	$l_1$	$l_2$	$l_3$
Песок	0,47	1,34	2,56
Супесь	0,06	0	0
Суглинок	–0,31	9,51	16,63

во льду появляются в результате изменения скорости кристаллизации. Сплошные пластинчатые (слоистые) поры из рассмотрения исключаются, так как при этом теряется устойчивость пористой системы.

**СХЕМА РАСЧЕТА**

При таком представлении структуры пористого льда идеально подходит теория Максвелла–Рэля, на основе которой П. Швердтфегером [Schwerdtfeger, 1963] предложена следующая формула для расчета коэффициента теплопроводности пористого льда  $\lambda_{пл}$  со сферическими воздушными порами:

$$\lambda_{пл} = \lambda_{л} \frac{1 + 0,5f - v_{в}(1-f)}{1 + 0,5f + 0,5v_{в}(1-f)}, \quad (2)$$

где  $f = \lambda_{в}/\lambda_{л}$ ;  $\lambda_{в}$  и  $\lambda_{л}$  – коэффициенты кондуктивной теплопроводности воздуха и чистого льда;  $v_{в}$  – относительное объемное содержание воздуха во льду, равное пористости льда.

В теории Максвелла–Рэля размеры отдельных пор не учитываются, оценивается только общее объемное содержание пор при их одинаковых размерах и форме.

В случае сложной формы воздушных включений (пор) для расчета коэффициента теплопроводности льда можно использовать обобщенную формулу на основе теории Максвелла–Рэля, предложенную нами ранее для оценки теплопроводности крупнообломочных грунтов [Гаврильев, 1986]:

$$\lambda_{пл} = \lambda_{л} \left[ 1 + \frac{(\lambda_{в} - \lambda_{л})v_{в}}{\lambda_{л} + K_{\phi}(1 - v_{в})(\lambda_{в} - \lambda_{л})} \right], \quad (3)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент формы воздушных пор.

Для общности рассматривается эллипсоидальная форма включений, так как изменением соотношения полуосей эллипсоидов можно получить практически все типы форм воздушных пор. Например, для эллипсоидов вращения слоистая пористость обеспечивается при их сплющивании:  $c/a \rightarrow 0$  ( $c, a$  – малая и большая полуоси эллипсоидов), когда они превращаются в пластинчатые прослойки. В случае вытянутых эллипсоидов вращения с радиусом основания  $c$  при условии  $c/a \rightarrow 0$  воздушные включения во льду принимают цилиндрическую форму. При любых других значениях соотношения  $c/a$  отображается эллипсоидальная форма пор с той или иной степенью вытянутости или сплюсненности. При  $c/a = 1$  воздушные включения принимают сферическую форму.

В формуле (3) коэффициент формы включений  $K_{\phi}$  равен

$$K_{\phi} = abcC(0), \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – полуоси эллипсоидов ( $a > b > c$ );  $C(0)$  – интеграл вида [Овчинников, 1971]

$$C(0) = \frac{2}{a^3} \left[ \frac{\sqrt{1 - p^2 \sin^2 \varphi} \operatorname{tg} \varphi - E(\varphi, p)}{1 - p^2} \right]; \quad (5)$$

$E(\varphi, p)$  – эллиптический интеграл второго рода;

$\varphi = \arcsin \sqrt{1 - c^2/a^2}$  – амплитуда интеграла;

$p = \sqrt{(1 - b^2/a^2)/(1 - c^2/a^2)}$  – модуль интеграла.

Эллиптический интеграл  $E(\varphi, p)$  протабулирован, а коэффициент формы пор вполне можно найти через соотношения их размеров  $a, b, c$ . В практических расчетах можно ограничиться более простым случаем эллипсоидов вращения. Тогда интеграл  $C(0)$  выражается через элементарные функции [Карслоу, Егер, 1964]. Рассмотрим два примера.

1. Поры имеют форму сплюсненного эллипсоида вращения ( $a = b > c$ ). Тогда по направлениям полуосей имеем

$$K_{\phi c} = \frac{1}{\beta} \left( 1 - \frac{c}{a\beta} \arcsin \sqrt{\beta} \right), \quad (6)$$

$$K_{\phi a} = K_{\phi b} = \frac{c}{2a\beta} \left( \frac{c}{\sqrt{\beta}} \arcsin \sqrt{\beta} - \frac{c}{a} \right), \quad (7)$$

где  $\beta = 1 - c^2/a^2$ .

2. Поры имеют форму вытянутого эллипсоида вращения ( $b = c < a$ ). Тогда

$$K_{\phi c} = K_{\phi b} = \frac{1}{2\beta} \left( 1 - \frac{c^2}{2a^2\beta} \ln \frac{1 + \sqrt{\beta}}{1 - \sqrt{\beta}} \right), \quad (8)$$

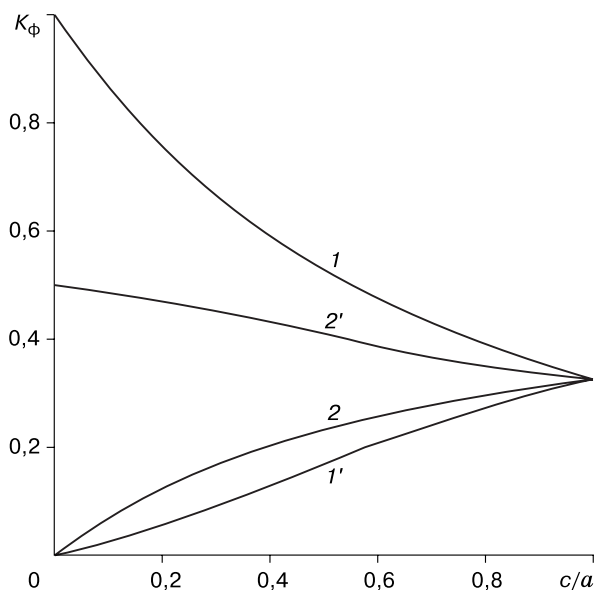
$$K_{\phi a} = \frac{c^2}{a^2\beta} \left( \frac{1}{2\sqrt{\beta}} \ln \frac{1 + \sqrt{\beta}}{1 - \sqrt{\beta}} \right). \quad (9)$$

На рис. 2 приведены зависимости вычисленных по формулам (6)–(9) значений коэффициентов формы  $K_{\phi}$  сплюсненных и вытянутых эллипсоидов вращения от отношения малой ( $c$ ) и большой ( $a$ ) полуосей образующего эллипса по разным направлениям. На рис. 2 видно, что для слоистой пористости ( $c/a = 0$ ) при расположении поровых прослоек поперек потока коэффициент  $K_{\phi} = 1$  (кривая 1), вдоль потока  $K_{\phi} = 0$  (кривая 1'). В случае цилиндрических пор ( $c/a = 0$ ) имеем перпендикулярно к тепловому потоку  $K_{\phi} = 1/2$  (кривая 2') и параллельно потоку  $K_{\phi} = 0$  (кривая 2).

При расположении воздушных включений протяженной формы под углом  $\psi$  к направлению теплового потока коэффициент теплопроводности льда рассчитывается по формуле

$$\lambda_{\psi} = \sqrt{\lambda_{\perp}^2 \sin^2 \psi + \lambda_{\parallel}^2 \cos^2 \psi}, \quad (10)$$

где  $\lambda_{\perp}$ ,  $\lambda_{\parallel}$  – вычисленные по формуле (2) при указанных значениях коэффициента  $K_{\phi}$  значения коэффициента теплопроводности пористого льда при перпендикулярном и параллельном расположении



**Рис. 2. Зависимость коэффициента формы  $K_\phi$  воздушных пор в виде сплюснутых (1, 1') и вытянутых (2, 2') эллипсоидов вращения от параметра  $c/a$  в разных направлениях:**

1, 2 – вдоль оси вращения; 1', 2' – перпендикулярно к оси вращения.

воздушных включений к направлению теплового потока.

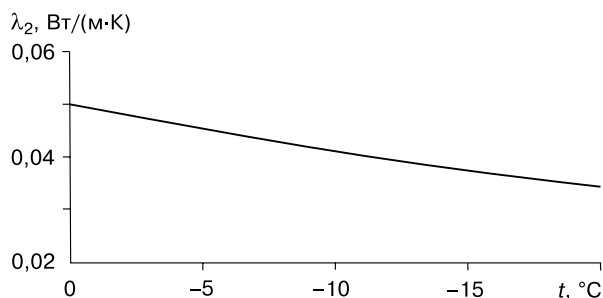
Коэффициент формы воздушных включений в зависимости от соотношения размеров  $c/a$  включений изменяется в пределах от 0 до 1. Для сферических воздушных включений ( $c/a = 1$ )  $K_\phi = 0,33$ .

Если учитывать конвективный перенос тепла диффузией водяного пара в воздушных пузырьках под действием градиента температур, то в формулы (2), (3) вместо кондуктивной теплопроводности воздуха  $\lambda_v$  необходимо подставить его эффективную теплопроводность  $\lambda_2$ , равную [Гаврильев, 1998]

$$\lambda_2 = \lambda_v + \frac{LDe_0}{RT^2} \left( \frac{L}{RT} - 1 \right) \exp \left[ \frac{L(T - T_0)}{RT_0T} \right], \quad (11)$$

где  $e_0 = 6,1 \cdot 10^2$  Па – упругость насыщенного пара при  $0^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 273$  К);  $R = 4,6 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К) – газовая постоянная водяного пара;  $T$  – абсолютная температура, К;  $L$  – скрытая теплота возгонки льда, равная  $2,830 \cdot 10^6$  Дж/кг при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $D$  – коэффициент диффузии водяного пара внутри воздушно-го пузырька.

Теперь выясним направленность диффузионного переноса пара внутри пор и теплового потока или градиента температуры во льду. Известно, что с повышением температуры концентрация пара увеличивается. Следовательно, оба процесса одно-



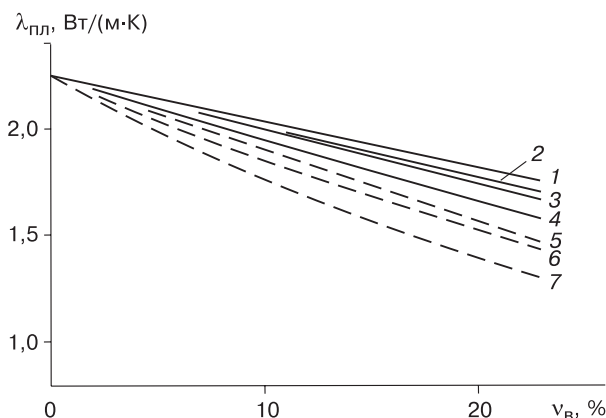
**Рис. 3. Температурная зависимость эффективного коэффициента теплопроводности воздуха внутри пор.**

направлены, и при учете диффузионного переноса пара в пузырьке воздуха коэффициент теплопроводности воздуха в формулах (2), (3) становится только больше, чем в спокойном воздухе (рис. 3).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По формуле (3) проведены расчеты коэффициента теплопроводности пористого льда при выделенных выше формах воздушных включений для их различных расположений относительно теплового потока: перпендикулярно и параллельно. Для расчетов выбрана температура  $-5^\circ\text{C}$ , при которой эффективный коэффициент теплопроводности воздуха внутри пор при учете термодиффузии водяного пара ( $D_m = 0,25$  см<sup>2</sup>/с) составляет  $0,042$  Вт/(м·К). Следует отметить, что в расчетах цилиндрические замкнутые поры представлены вытянутыми эллипсоидами вращения при  $c/a = 0,33$ , а блинчато-сплюснутые – сплошными эллипсоидами вращения ( $c/a = 0,33$ ).

Результаты расчетов приведены на рис. 4. Видно, что расхождения значений коэффициента теплопроводности льда в большей степени обусловлены ориентировкой пор относительно теплового потока, чем различиями в форме пор. Параллельное тепловому потоку расположение вытянутых (протяженных) и сплюснутых пор всегда обеспечивает большую величину коэффициента теплопроводности льда, чем в случае перпендикулярного их расположения к тепловому потоку. Осредненная между ними величина  $\lambda$  достигается при сферической форме пор. При пористости льда около 20 % максимальные расхождения значений коэффициента теплопроводности льда для всех рассмотренных форм и направлений воздушных пор не превышает 30 %, а при одинаковой ориентировке пор они значительно уменьшаются, например, до 10 % при параллельном и до 19 % при перпендикулярном расположении пор к тепловому потоку.



**Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности пористого льда от ориентировки воздушных пор относительно направления теплового потока параллельно (сплошные линии) и перпендикулярно (штриховые) при различных формах пор:**

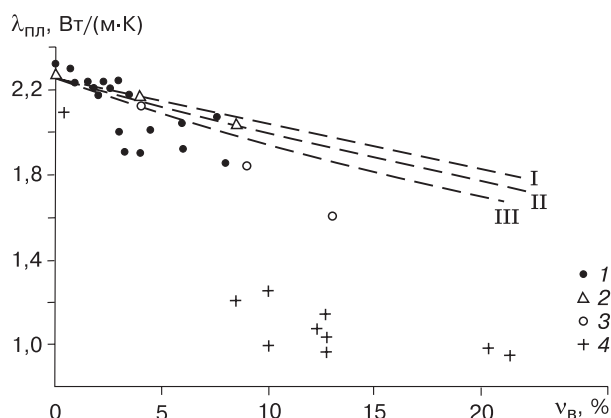
1, 6 – цилиндрические капиллярные (сквозные); 2, 5 – цилиндрические замкнутые; 3, 7 – блинчато-сплюснутые; 4 – сферические.

Отметим, что на рис. 4 даны теоретически возможные диапазоны изменений значений коэффициента теплопроводности пористого льда в пределах пористости до 20 %. Выше было показано, что сегрегационному льду, созданному в лабораторных условиях, более присущи сквозные капиллярные и (со временем) замкнутые цилиндрические поры, поэтому изменение теплопроводности сегрегационного льда в зависимости от пористости должно происходить согласно кривым 1 и 2 на рис. 4. Сегрегационному льду в природных условиях лучше соответствует кривая 4 на рис. 4, впрочем, их отличия незначительные.

На рис. 5 осуществлено сравнение результатов расчета  $\lambda_{пл}$  по формуле (3) при  $t = -5^\circ\text{C}$  с экспериментальными данными различных авторов для объемного и сегрегационного пористого льда. Видно, что модельное представление пористого льда независимо от условий его образования имеет близкое сходство с экспериментальными данными авторов, полученными для объемного льда. Данные для сегрегационного льда из работ [Гречищев и др., 2002, 2003] на рис. 5 лежат гораздо ниже, чем все остальные. Они оказались даже за пределами теоретически возможных минимальных значений коэффициента теплопроводности пористого льда. Неясно, чем это вызвано.

По-видимому, возможны следующие причины этих расхождений:

- установлена новая закономерность, требующая своего теоретического осмысления;
- метод температурной волны в однородном полубесконечном пространстве неприменим для



**Рис. 5. Теплопроводность пористого льда:**

точки – экспериментальные данные: 1 – Ю.Л. Назинцева [1964], 2 – Н.Н. Зубова [1945], 3 – В.В. Шулейкина [1968], 4 – С.Е. Гречищев и др. [2003]; штриховые линии – расчетные зависимости для сегрегационного льда при цилиндрических капиллярных (I) и замкнутых (II) порах и пористого льда со сферическими (III) воздушными включениями.

обработки результатов опытов со слоистыми телами конечных размеров;

– при проведении экспериментов были допущены погрешности.

Подчеркнем, что изложенное выше является всего лишь нашей позицией в вопросе о коэффициенте теплопроводности сегрегационного льда. В любом случае прояснение в этом вопросе может быть достигнуто только после новых экспериментов, возможно, на другой методической основе, например, по принципу стационарного теплового режима, который свободен от каких-либо ограничений по отношению к слоистости исследуемой среды.

## ВЫВОДЫ

1. Обосновано модельное представление сегрегационного льда для расчета его коэффициента теплопроводности. В нем основу (остов) модели составляет обычный гексагональный лед (лед I).

2. Проведен модельный эксперимент с пористым льдом при различных формах и ориентации воздушных пор относительно направления теплового потока, в котором выяснены теоретически возможные диапазоны изменения коэффициента теплопроводности льда в пределах пористости до 20 %.

3. Показано, что рассчитанные значения коэффициента теплопроводности сегрегационного льда оказались гораздо выше, чем экспериментально измеренные [Гречищев и др., 2002, 2003], что, возможно, связано с некоторыми методическими упущениями как в расчете, так и в эксперименте.

4. Для разрешения возникшего спора о величине коэффициента теплопроводности сегрегационного льда требуется, во-первых, проведение новых теплофизических экспериментов на другой методической основе, например, с использованием метода стационарного теплового режима, который свободен от каких-либо ограничений по отношению к слоистости исследуемой среды, во-вторых, осуществление рентгенографических исследований по уточнению структуры сегрегационного льда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-05-96126).

### Литература

- Вейнберг Б.В.** Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда. М.; Л., Гостехтеоретиздат, 1940, 524 с.
- Гаврильев Р.И.** Особенности изучения теплофизических свойств грунтов с крупнообломочными включениями // Инж. геология, 1986, № 5, с. 60–71.
- Гаврильев Р.И.** Теплопроводность вечномерзлых грунтов в зависимости от естественной влажности // Инж.-физ. журн., 1989, т. 56, № 6, с. 995–1001.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 280 с.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справ. пособие. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, 146 с.
- Гречищев С.Е., Павлов А.В., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В.** Лабораторные исследования физических свойств сегрегационного внутригрунтового льда // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 77–81.
- Гречищев С.Е., Павлов А.В., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В.** Зависимость физических свойств сегрегационного внутригрунтового льда от условий промораживания грунтов // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 49–54.
- Зубов Н.Н.** Льды Арктики. М., Изд-во Главсевморпути, 1945, 360 с.
- Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. М., Наука, 1964, 487 с.
- Коннова О.С.** Некоторые результаты исследований строения мерзлых пород // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов, 1957, вып. 3, с. 195–226.
- Назинцев Ю.Л.** Некоторые данные к расчету тепловых свойств морского льда // Тр. ААНИИ, 1964, т. 267, с. 31–47.
- Овчинников И.К.** Теория поля. М., Недра, 1971, 312 с.
- Основы геокриологии (мерзлотоведения).** Ч. 1. М., Изд-во АН СССР, 1959, 459 с.
- Савельев Б.А.** Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых горных пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1971, 507 с.
- Шулейкин В.В.** Физика моря. М., Наука, 1968, 1083 с.
- Эйзенберг Д., Кауцман В.** Структура и свойства воды. Л., Гидрометеиздат, 1975, 280 с.
- Schwerdtfeger P.** The thermal properties of sea ice // J. Glaciology, 1963, vol. 4, No. 36, p. 789–807.

*Поступила в редакцию  
8 августа 2006 г.*