

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ ВОДОНАСЫЩЕННУЮ КЕРАМИКУ С ВКЛЮЧЕНИЕМ ЛЬДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ.

Часть 1. Градиент давления жидкости

В.С. Колунин, А.В. Колунин, А.Д. Писарев

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, askold@ikz.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований теплопереноса через водонасыщенную керамику с макровключением льда. Приведены зависимости потока массы через образец от перепада давления жидкости при различных средних температурах. Обнаружено отклонение экспериментальных данных от теоретических расчетов и проанализированы возможные причины этих расхождений.

Лед, вода, пористая среда, теплоперенос

HEAT AND MASS TRANSFER IN A WATER SATURATED CERAMICS WITH ICE INCLUSION INDUCED BY DIFFERENT THERMODYNAMIC FORCES. Part 1. Liquid pressure gradient

V.S. Kolunin, A.V. Kolunin, A.D. Pisarev

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, askold@ikz.ru

The results of the experiments of the heat and mass transfer through the water-saturated ceramics with ice inclusion are presented. The dependences of mass flux upon the liquid pressure gradient at the different average temperatures are obtained. The experimental data disagree with the theoretical predictions. Possible reasons are offered to resolve the contradiction.

Ice, water, porous medium, heat and mass transfer

ВВЕДЕНИЕ

Промерзание водонасыщенного мелкодисперсного грунта приводит, как правило, к движению жидкости к границе замерзания и увеличению влагосодержания мерзлого грунта.

Промерзание нарушает однородность мелкодисперсного водонасыщенного талого грунта, инициирует перераспределение компонентов грунта и образование криогенных текстур.

Структурные изменения промерзающего грунта наиболее интенсивно происходят в его мерзлой части вблизи температуры начала замерзания. Поэтому при моделировании криогенного текстурообразования тепло- и массообменные свойства этой области грунта играют определяющую роль.

В результате моделирования криогенного текстурообразования получают две важные для практики физические характеристики: влажность мерзлого грунта и параметр криогенной текстуры. Первая величина используется при оценке глубины сезонного промерзания–протаивания грунтов [Ершов и др., 1991; Комаров, 2003] и эффективности работы сезонных охлаждающих устройств [Аникин и др., 2009]. Вторая характеристика поз-

воляет определить величину осадки при оттаивании мерзлого грунта. Осадка оказывается максимальной для грунтов, промерзающих в условиях открытой системы, когда формируются слоистая и сетчатая криогенные текстуры [Цытович, 1973].

Современные модели дают способ расчета параметров криогенной текстуры слоистого типа (размеры шлиров льда и грунта массивной текстуры) [Горелик, Колунин, 2002; Комаров, 2003].

Необходимым элементом модели является переходная область между талым и мерзлым грунтами – промерзающая зона, содержащая лед и заметное количество жидкой фазы.

На температурной шкале промерзающая зона занимает диапазон в несколько десятых градуса ниже температуры начала замерзания. При такой температуре жидкая фаза воды может существовать в переохлажденном состоянии достаточно длительное время [Гречищев и др., 2004]. Например, водонасыщенный суглинок находится в талом состоянии при температуре -2°C более 8 сут. Поэтому лед в промерзающей зоне содержится не в виде отдельных включений, а представляет собой связанное тело сложной формы (ледяную сетку).

В процессе промерзания ледяная сетка меняет форму, а объемная доля льда увеличивается как за счет воды, поступающей из талого грунта, так и вследствие консолидации незамерзших грунтовых агрегатов внутри промерзающей зоны [Микростроение..., 1988]. С одной стороны, формирование криогенной текстуры – достаточно сложный вероятностный процесс, а с другой стороны, в основу наиболее физически обоснованных моделей этого процесса положен детерминистический подход, реализовать который удастся посредством упрощения свойств переходной области между талым и мерзлым грунтами.

Так, в модели О'Нейла–Миллера предполагается, что на контакте с мерзлым грунтом находится линза льда, которая вместе с ледяной сеткой промерзающей зоны образует единое жесткое тело. Во время роста линзы льда скелет грунта не деформируется, а ледяная сетка перемещается относительно грунтовых частиц вследствие режеляции [O'Neill, Miller, 1985]. Другой крайний вариант – ледяная сетка не обладает прочностью на изгиб. В этом случае лед в промерзающей зоне можно представить как совокупность отдельных включений, неподвижных относительно скелета грунта. Расчеты показывают, что обе модели дают примерно одинаковые параметры слоистой криогенной текстуры – размеры шпиров льда и толщины слоев мерзлого грунта массивной текстуры между шпирами [Горелик, Колунин, 2002]. Математическая составляющая моделей включает уравнения движения тепла (закон Фурье) и массы (закон Дарси).

Чтобы выяснить роль льда в тепло- и массообменных процессах, происходящих в переходной области промерзающего грунта, авторами настоящей работы был теоретически изучен тепломассоперенос через регулярную бипористую среду, т. е. пористую среду с бимодальным распределением пор по размерам, в которой крупные поры имеют одинаковый размер и периодически расположены в пространстве [Колунин, 2004; Kolunin, Kolunin, 2009]. В градиентном поле термодинамических потенциалов (температуры, давления жидкости и концентрации раствора) лед перемещается относительно каркаса пористой среды вследствие режеляции. Движение льда сопровождается парными фазовыми переходами плавление–замерзание, которые создают разделенные в пространстве источники и стоки тепла и массы. В этом случае законы переноса принимают общий вид: потоки тепла и массы выражаются через всю совокупность термодинамических сил.

В настоящей работе представлена первая часть экспериментальных результатов по изучению тепломассопереноса через модельную ячейку бипористой среды под действием перепада давления жидкости.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения тепло- и массообменных свойств пористых материалов, содержащих лед в виде макровключений, сконструирована экспериментальная установка (рис. 1), основной блок которой изображен на рис. 2, а. В качестве объекта исследования выбрана модельная ячейка бипористой среды – цилиндр из пористой керамики с полостью (см. рис. 2, б). Пористая среда сбоку от полости была собрана из трех колец керамики, разделенных тонким слоем герметика. Предполагалось, что весь поток массы через среднюю часть образца будет переноситься включением льда посредством режеляции.

Основные характеристики образца и элементов основного блока установки приведены в таблице.

Подготовительный этап опыта включал следующие работы: вакуумирование образца и подводящих трубок, заполнение системы дегазированной водой, одностороннее замораживание керамического образца и последующее оттаивание подводящих трубок 7 и емкостей 14 (см. рис. 2), замораживание воды в полости. По времени подготовительный этап занимал от трех суток до недели.

Керамика служила фазовым барьером от проникновения льда в емкости 14 вплоть до температуры $-0,05^{\circ}\text{C}$.

В эксперименте измеряются величины потоков тепла и массы через образец, вызванные разностью давлений жидкости в капиллярных трубках 7 или(и) разностью температур латунных пластин 2. Для определения величины теплового потока служат эталонные цилиндры 3, а поток жидкости находится по движению мениска жидкости в калиброванных капиллярных трубках. Температура измеряется в четырех точках 8

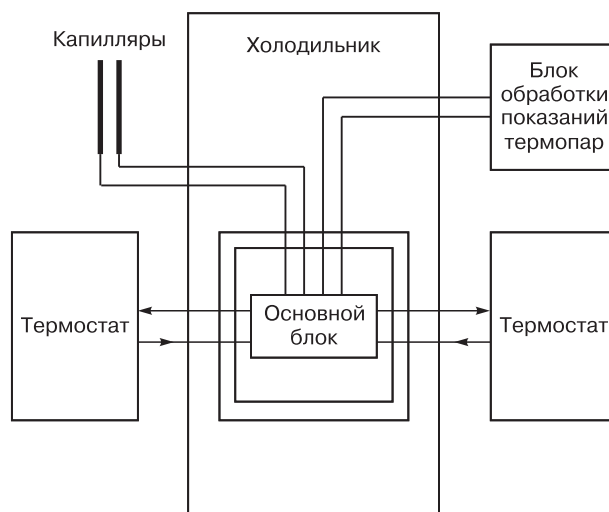


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки.

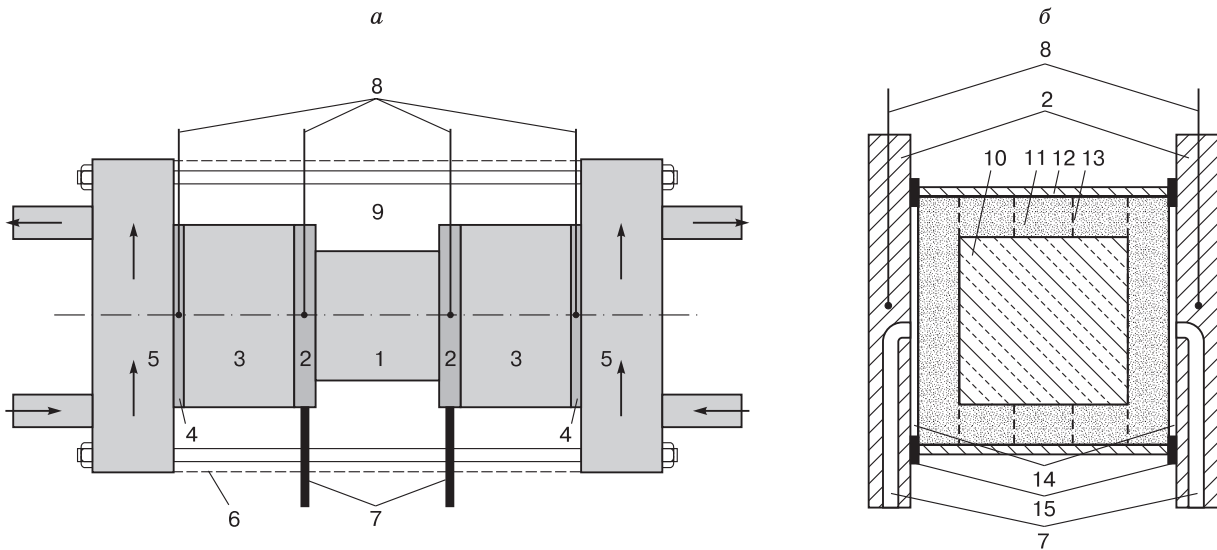


Рис. 2. Схема основного блока установки по измерению тепло- и массообменных параметров.

a – общий вид: 1 – образец, 2 – латунные пластины, 3 – измерительные цилиндры из плексигласа, 4 – медные пластины, 5 – латунные теплообменники, через которые прокачивается термостатируемая жидкость, 6 – экран из медной фольги, 7 – водоканалы, 8 – измеряющие концы разностных термопар, 9 – пенопласт; *б* – образец с пластинами: 10 – полость, 11 – пористая керамика, 12 – пластиковая обойма, 13 – стык колец из пористой керамики (герметик), 14 – зазоры, заполненные водой, 15 – резиновые уплотнители.

(см. рис. 2, *a*) при помощи разностных медьконстантановых термопар.

Температура опорного спая термопары поддерживалась около 0 °С посредством его погружения в термос с дистиллированной водой и измельченным льдом. В свою очередь, термос размещался в холодильнике с температурой воздуха незначительно выше 0 °С.

Для согласования разности электрического напряжения и перепада температуры на спаях термопары использовалась стандартная градуировочная характеристика [ГОСТ Р 8.585-2001].

ТермоЭДС термопар оцифровывалась 24-битным шестиканальным аналого-цифровым преобразователем, выполненным на микросхеме AD7794 [www.analog.com]. При помощи микроконтроллера PIC18F252 [www.microchip.com] показания в цифровом коде передавались на компьютер и регистрировались с интервалом 10 с. Для повышения

точности измерения выбрали частоту оцифровки, кратную сетевой помехе (50 Гц), и применяли методы цифровой фильтрации, алгоритмы которой реализованы в микропрограмме микроконтроллера и регистрирующей программе компьютера.

При помощи термостата определяли абсолютную погрешность системы измерения, которая составила не более ±0,01 град. Погрешность в измерении разности температур дифференциальным методом не превышала ±0,004 град.

Ниже представлены результаты опытов по изучению зависимости потоков через образец от перепада давления жидкости в капиллярных трубках при различных средних температурах образца.

Перед началом опыта устанавливалась одинаковая температура теплообменников 5 и, как следствие, латунных пластин 2 с точностью до 0,01 град при нулевом перепаде давления. Затем последовательно в течение суток поддерживалась

Характеристики элементов экспериментальной ячейки

Элемент ячейки	Номер на рис. 2	Диаметр (внешний), мм	Высота, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Полость (лед)	10	20,2	16,5	2,2
Керамика*	11	29,7	26,9	1,4
Обойма	12	32,2	26,9	0,35
Измерительный цилиндр	3	44,5	31,4	0,21
Пенопласт	9	79	102,5	0,044

* Коэффициент гидропроводности для керамики равен $1,9 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/(\text{Па}\cdot\text{с})$.

разность давлений в капиллярах 7 из следующего ряда значений: 0,37; 2,3; 12; 32; 64 кПа.

Для большинства измерений среднеквадратичное отклонение среднего значения температуры теплообменников не превышало 0,0005 град, латунных пластин – 0,005 град.

Для сравнения результатов измерений с теорией [Колунин, 2004] создана вычислительная программа по решению сопряженных тепловой задачи во внутренней области основного блока и задачи фильтрации в керамике. Входными параметрами являются температура теплообменников 5 и давление в трубках 7 (см. рис. 2, а). Программа находит скорость движения льда в полости ячейки, температуру латунных пластин 2, а также величины потоков тепла и жидкости через основную образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены результаты измерения потока воды через образец под действием градиента давления жидкости при различных средних температурах образца. Эксперимент показывает, что величина потока массы через образец уменьшается с понижением средней температуры. Это может быть объяснено гидравлическим сопротивлением пленки незамерзшей воды, разделяющей лед и каркас пористой среды [Горелик, Колунин, 2002]. Однако из сравнения с теорией, в которой

этот фактор исключен из рассмотрения, следует, что расчетная величина потока массы меньше наблюдаемой в эксперименте. Может быть истинное значение скорости движения льда выше теоретического?

В качестве индикатора скорости движения льда служит разность температур латунных пластин (рис. 4). При сближении со стенкой столбик льда плавится с поглощением тепла. На противоположной стороне включения происходит обратный процесс – замерзание воды и выделение тепла. Разделенные в пространстве источники и стоки тепла изменяют температурное поле окружающей среды и создают перепад температуры на пластинах, который пропорционален скорости движения льда. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, показывают, что с понижением средней температуры образца уменьшается перепад температуры на пластинах, а значит, и скорость движения льда в полости. Такое поведение системы может быть объяснено зависимостью гидравлического сопротивления пленки незамерзшей воды от температуры. Не противоречит этому объяснению и то, что экспериментальные точки оказываются ниже расчетных, так как в теоретическом исследовании гидравлическое сопротивление не принимается во внимание.

На основе результатов теплофизических измерений можно сделать вывод, что истинная ско-

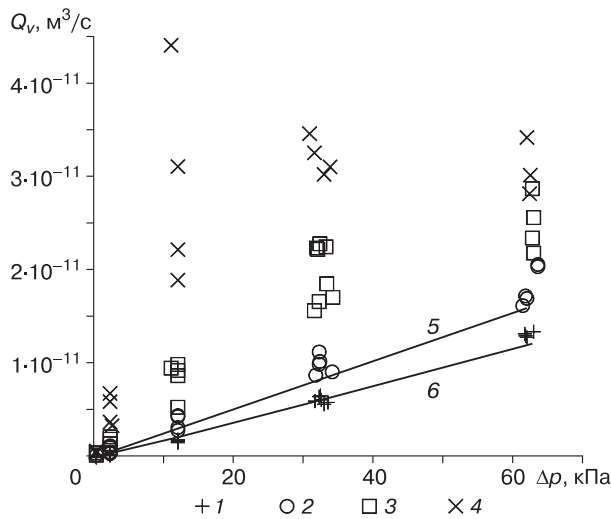


Рис. 3. Зависимость объемного потока жидкости (Q_v) через образец в зависимости от разности давлений (Δp) на границах образца при различных средних температурах.

Точки – экспериментальные данные при различных средних температурах: $-0,04$ °C (1), $-0,03$ °C (2), $-0,02$ °C (3), $-0,01$ °C (4). Линии – результаты расчета при перепадах температуры на латунных пластинах: 5 – нулевом, 6 – максимальном из опытных данных.

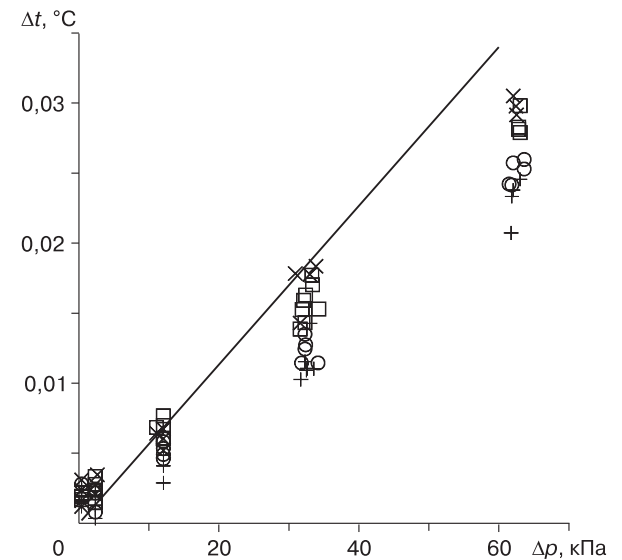


Рис. 4. Разность температур (Δt) между основаниями образца (латунными пластинами) в зависимости от перепада давления жидкости (Δp).

Линия – результат расчета при максимальном перепаде температуры на латунных пластинах 2 (см. рис. 2). Обозначения см. на рис. 3.

рость движения льда в полости не превышает теоретическую. В таком случае, чтобы объяснить более высокие значения потока жидкости в эксперименте по сравнению с теорией (см. рис. 3), необходимо ввести в рассмотрение дополнительные факторы. На наш взгляд, наиболее вероятной причиной расхождения экспериментальных и теоретических данных является наличие незамерзающих каналов жидкости между стенками полости и столбиком льда. Так, согласно расчетам, если убрать гидроизоляцию между керамическими кольцами 13 (см. рис. 2, б), поток массы в системе возрастает почти в 50 раз.

Нельзя также исключить возможность движения жидкости через лед по незамерзающим межзерновым каналам, свойства которых обсуждаются в ряде работ [Ketcham, Hobbs, 1969; Mader, 1992].

ВЫВОДЫ

В пористой среде, содержащей лед и воду, разность давлений в жидкости создает не только поток массы, но и поток тепла.

В диапазоне ниже температуры начала замерзания на 0,05 °С теоретическая модель может применяться для прогноза тепло- и массообменных процессов в пористых средах, содержащих макрополости.

Для улучшения предсказательной способности в исходной теоретической модели необходимо принимать во внимание гидравлические свойства пленки незамерзшей воды, разделяющей лед и пористую среду.

Пленка незамерзшей воды между льдом и мелкопористой средой увеличивает фильтрационные свойства мерзлой пористой породы, но уменьшает массоперенос воды в фазе льда.

Литература

- Аникин Г.В., Поденко Л.С., Феклистов В.Н.** Тепломассоперенос в вертикальном парожидкостном сифоне // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 54–58.
- Горелик Я.Б., Колунин В.С.** Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2002, 318 с.
- ГОСТ Р 8.585-2001.** Термопары. Номинальные статические характеристики. М., Госстандарт России, 2002, 78 с.
- Гречишев С.Е., Павлов А.В., Шешин Ю.Б., Гречишева О.В.** Экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 4, с. 41–44.
- Ершов Э.Д., Хрусталева Л.Н., Дубиков Г.И., Пармузин С.Ю.** Инженерная геокриология. М., Недра, 1991, 439 с.
- Колунин В.С.** Тепломассоперенос в пористой среде с ледяными включениями // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 4, с. 45–53.
- Комаров И.А.** Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Науч. мир, 2003, 608 с.
- Микростроение мерзлых пород /** Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, 183 с.
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 448 с.
- Ketcham W.M., Hobbs P.V.** An experimental determination on the surface energies of ice // Phil. Mag., 1969, vol. 19, p. 1161–1173.
- Kolunin V.S., Kolunin A.V.** Electrical cross effects in porous media with ice inclusions. Part II: Double electrical layer mechanism // Intern. J. Heat Mass Transfer, 2009, vol. 52, No. 23–24, p. 5577–5584.
- Mader H.M.** Observation of the water-vein system in polycrystalline ice // J. Glaciol., 1992, vol. 38 (130), p. 333–347.
- O'Neill K., Miller R.D.** Exploration of a rigid ice model of frost heave // Water Resour. Res., 1985, vol. 21, No. 3, p. 281–296.
- AD7794 data sheet,** Analog Devices Inc. 2006. (www.analog.com).
- DS39564B data sheet,** Microchip Technology Inc. 2002. (www.microchip.com).

Поступила в редакцию
31 августа 2010 г.