

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА И ПУЧЕНИЕ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОРОДАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 1996 г. Г. П. Бровка, И. В. Дедюля

*Институт проблем использования природных ресурсов и экологии Академии наук Беларуси
220114 Минск, Староборисовский тракт, 10*

Поступила в редакцию 25.02.95 г.

С помощью разработанных ранее методов изучено влияние водорастворимых соединений на интенсивность миграции влаги и величину развиваемых при этом давлений в промерзающих влагонасыщенных дисперсных материалах. На примере изучения миграции влаги в торфе, кварцевом песке, каолине и композите, состоящем из кварцевого песка и каолина, показано, что максимальные гидростатические давления имеют место в системах с жестким каркасом и достаточно развитой поверхностью. Наличие в поровой влаге водорастворимых соединений снижает интенсивность миграции и давление пучения в той мере, в какой эти соединения понижают осмотический потенциал влаги, независимо от природы этих соединений.

Несмотря на достаточно большой объем публикаций по вопросам переноса влаги при промерзании грунтов и почв, а настоящее время нет единого мнения по механизму переноса влаги и сил морозного пучения в промерзающих породах. Б.В. Дерягиным и Н.В. Чураевым [1] на основании термодинамики необратимых процессов было показано, что основными движущими силами влагопереноса по незамерзающим прослойкам воды являются градиенты температуры и гидростатического давления согласно уравнению

$$q_v = -\alpha \rho_v \left(\nabla P + \rho_l L \frac{\nabla T}{T} \right), \quad (1)$$

где α – коэффициент гидродинамической проводимости незамерзающих прослоек, ρ_v и ρ_l – плотности воды и льда; ∇P , ∇T – градиенты гидростатического давления и температуры соответственно; L – теплота фазового перехода вода–лед. С помощью этого уравнения можно рассчитать и максимальное гидростатическое давление (давление пучения) в точке с температурой T , при котором прекращается миграция влаги. В экспериментальных работах, выполненных с участием авторов [2, 3], показано, что поток влаги в мерзлой зоне пропорционален градиенту температуры при отсутствии градиента гидростатического давления.

Однако в более общих случаях в промерзающих породах на влагоперенос и давление пучения могут оказывать влияние передвижение включений льда и частиц породы в направлении, противоположном градиенту гидростатического давления, и наличие водорастворимых соединений. Используя положения термодинамики и гидродинамику тонких слоев жидкости с учетом возникновения в этих слоях расклинивающего

давления, получены формулы, позволяющие рассчитать поток влаги в мерзлой зоне с учетом передвижения ледяных включений и наличия водорастворимых соединений, а также поток этих соединений по незамерзающим прослойкам воды.

$$q_v = -\alpha_1 \rho_p (1 - C) \left(\nabla P + \rho_l L \frac{\nabla T}{T} + \rho_l RT \frac{M_v}{M_c} \nabla C \right) - \alpha_2 \rho_l \nabla P + \alpha_3 \rho_v \nabla C, \quad (2)$$

$$q_c = -\alpha_1 \rho_p C \left(\nabla P + \rho_l L \frac{\nabla T}{T} + \rho_l RT \frac{M_v}{M_c} \nabla C \right) - \alpha_3 \rho_c \nabla C, \quad (3)$$

где C – весовая концентрация водорастворимых соединений; M_c и M_v – молекулярные массы водорастворимых соединений и воды соответственно; ρ_p и ρ_c – плотность раствора и плотность водорастворимого соединения; α_2 – коэффициент, характеризующий подвижность ледяных включений; α_3 – коэффициент взаимной диффузии воды и водорастворимого соединения.

Из приведенных формул следует, что наличие водорастворимых соединений в промерзающей породе, а также возможность передвижения ледяных включений может существенно повлиять на поток влаги и на максимальное гидростатическое давление в мерзлой зоне.

Для исследования влияния этих факторов применены две методики, позволяющие исследовать перенос влаги в стационарном неоднородном температурном поле, включающем мерзлую и талую зоны при наличии в поровой влаге водорастворимых соединений. Согласно первой, образец мог свободно вспучиваться в процессе притока

влаги в мерзлую зону. По известной методике [4, 5] на установке для комплексного исследования теплопереноса и структурообразования при промерзании грунтов заморожены образцы переработанного низинного осокового торфа с зольностью 8%, степенью разложения 30% и влагосодержанием 5 кг/кг. В эти образцы внесены добавки KCl, KOH и HCl, концентрация которых должна была понизить температуру начала замерзания поровой влаги на 0.5 и 1°C. Температурный режим выбирался таким образом, чтобы на теплообменнике, с которого начиналось промораживание образца [6], температура была на 2° ниже определенной экспериментально температуры начала замерзания поровой влаги образца. Этим самым задавалась одинаковая во всех опытах скорость промерзания образца. Для оценки интенсивности переноса влаги по результатам исследований рассчитаны коэффициенты термовлагопроводности мерзлой зоны для всех образцов. По определению [4], коэффициент термовлагопроводности K_m численно равен потоку влаги в мерзлой зоне при единичном градиенте температуры. На рис. 1 представлена зависимость K_m от определенной экспериментально температуры начала замерзания поровой влаги. Из приведенной зависимости следует, что коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m уменьшается по мере понижения температуры начала замерзания поровой влаги. Причем это происходит практически независимо от того, каким видом электролита вызвано понижение температуры замерзания: кислотой, щелочью или солью.

Во втором случае создана установка (рис. 2), на которой измерено максимальное гидростатическое давление в зависимости от перепада температур в зоне льдовыделения и на границе зон. Основным элементом установки является цилиндрическая камера 1 высотой 50 мм, торцевые поверхности которой контактируют с термостатируемыми теплообменниками 2. В нижней части камеры через жесткий тонкопористый фильтр 3 в камеру может поступать влага из системы подпитки 4. В верхней части камеры расположена деформируемая металлическая мембрана 5, являющаяся основой манометра. Полость между мембраной и верхней торцевой поверхностью камеры 6 заполнена антифризом и сообщается с отсчетным капилляром 7, по уровню антифриза в котором можно оценить деформацию мембраны. Соответствие между давлением на мембрану и уровнем антифриза в отсчетном капилляре определялось с помощью предварительной тарировки, которая проводилась перед каждым заполнением камеры исследуемым материалом 8. Вся система помещалась в теплоизолирующий корпус 9.

Температурный режим в камере создавался путем термостатирования нижнего теплообменника от термостата при положительной, а верх-

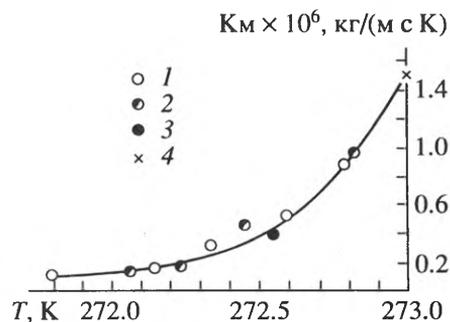


Рис. 1. Зависимость коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны низинного торфа от температуры начала замерзания поровой влаги при наличии в ней растворенных веществ. $W = 5$ кг/кг. 1 – добавка KCl; 2 – добавка HCl; 3 – добавка KOH; 4 – без добавок.

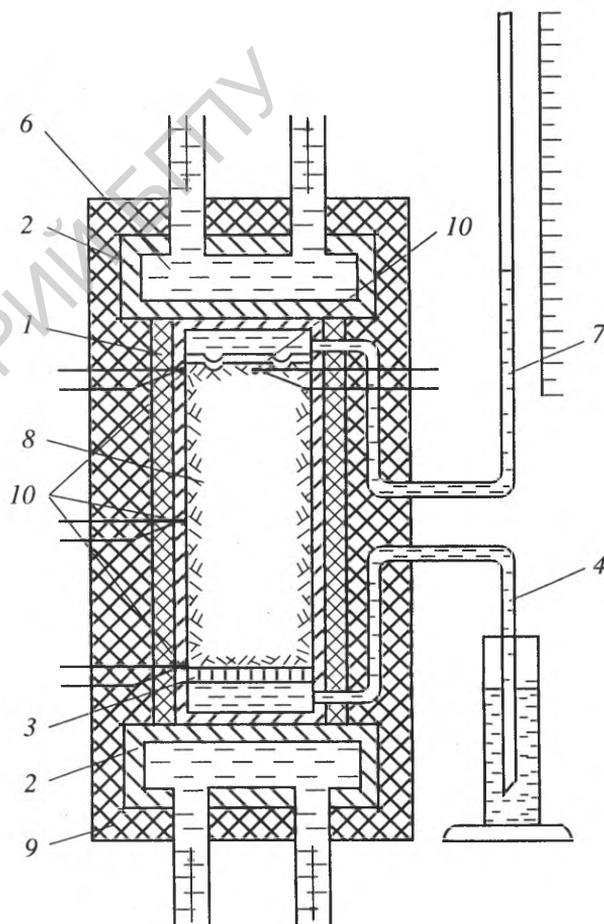


Рис. 2. Схема установки для определения давления пучения.

него – от криостата при отрицательной по Цельсию температурах. Контроль за температурным режимом осуществлялся с помощью 4-х медь-константановых термопар 10, расположенных на мембране, пористом фильтре и в средней части камеры.

Результаты исследований давления пучения

№ п/п	Исследуемый материал или композиция	Наименование добавки и ее концентрация в поровой влаге	Температура начала замерзания жидкости в порах	Температура на мембране	Измеренное давление	$k = \frac{\nabla P}{\nabla T}$
			°К	°К	×10 ⁵ Па	МПа/К
1	Низинный торф	–	273	272.3	0	0
2	Каолин	–	273	272.25	1.2	0.16
3	Каолин	–	273	272.42	1.1	0.19
4	40% каолин + 60% кв. песок	–	273	272.17	4	0.48
5	»	–	273	272.8	2.4	1.2
6	»	NaCl, 1%	272.2	271.3	0.5	0.055
7	»	NaCl, 0.5%	272.58	271.8	1.75	0.22
8	»	NaCl, 0.1%	272.9	271.7	3.1	0.26
9	»	Сахар, 10%	271.96	271.28	0	0
10	»	Сахар, 5%	272.44	271.8	0.75	0.12
11	»	Сахар, 1%	272.83	272.25	2.85	0.49
12	»	Глицерин, 1%	272.16	271.7	0.75	0.16

Опыт начинался при отключенном термостате и работающем криостате. После того как система замерзала, что фиксировалось по показаниям термомпар, включался термостат, задавался необходимый в эксперименте градиент температуры и тем самым устанавливалась граница между талой и мерзлой зонами. Заканчивался опыт после того, как при заданном температурном режиме система приходила в равновесие, т.е. прекращался рост давления и поток подпитывающей влаги.

Были исследованы образцы с деформируемым, частично деформируемым и жестким скелетами. В качестве первого использован низинный осоковый торф, а второго – каолин. В результате смешения двух объемов каолинового порошка с тремя объемами калиброванного кварцевого песка с диаметром фракций 0.25–1 мм получена система с жестким скелетом и достаточно развитой поверхностью. Для увлажнения образцов и подпитки талой зоны использовались растворы различных водорастворимых соединений: хлорида натрия, сахара, глицерина. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что в системе с деформируемым скелетом (образец 1) практически не создается давления пучения. При этом на мембране образуется сплошная линза льда, а твердая фаза скелета материала и избыточная влага отжимаются в талую зону. Достаточно большие давления получены в каолине (образцы 2, 3), но все же они составили не более 20% от максимальных расчетных давлений по формуле (1). Наибольшее давление 4×10^5 Па получено при температуре в зоне льдовыделения 272.17 К для композита, состоящего из смеси каолина и

кварцевого песка, что составляет около 40% от расчетного максимального давления. Для этой же системы при температуре в зоне льдовыделения 272.8 К получено значение гидростатического давления 2.4×10^5 Па, практически соответствующее расчетному. Увеличение расхождения между измеренными и теоретическими значениями гидростатического давления при понижении температуры для системы с жестким каркасом можно объяснить уменьшением толщины незамерзающих прослоек воды и увеличением относительного влияния перемещений включений льда под действием градиента гидростатического давления.

При наличии в поровой влаге водорастворимых соединений, независимо от их природы, происходило снижение максимального гидростатического давления в зоне льдовыделения по мере увеличения мольной доли этих соединений в растворе и понижения температуры начала замерзания поровой влаги.

Полученные результаты можно объяснить с помощью системы уравнений (2) и (3). При наличии градиента температуры в мерзлой зоне за счет вымерзания избыточного количества влаги возникает градиент концентрации водорастворимых соединений, направленный в сторону понижения температуры, что приводит к появлению осмотической составляющей потока влаги. Как видно из уравнения (2), перенос влаги под воздействием осмотической составляющей может осуществляться различными механизмами. С одной стороны, это происходит за счет непосредственного влияния градиента концентрации водорастворимых соединений на градиент расклинивающего давления и течение в пленках незамерзающей вла-

ги, а с другой – происходит чисто диффузионный перенос влаги. В установившемся стационарном режиме суммарные потоки влаги и водорастворимых соединений будут равны нулю, а градиент гидростатического давления при этом будет максимальным. Анализ приведенной системы уравнений показал, что даже при небольшой подвижности ледяных включений в стационарном состоянии в мерзлой зоне будет поддерживаться градиент концентрации водорастворимых соединений, направленный в сторону отрицательных температур, и за счет этого будет существенно снижен градиент гидростатического давления в мерзлой зоне.

Конкретные значения максимального гидростатического давления в мерзлой зоне будут зависеть от соотношения коэффициентов гидродинамической проводимости незамерзающих прослоек воды, коэффициентов, характеризующих подвижность ледяных включений, коэффициентов молекулярной диффузии водорастворимых соединений и их концентрации.

Таким образом, на основании проведенных исследований показано, что максимальные давления пучения при промерзании развиваются в системах, имеющих жесткую недеформируемую матрицу и

тонкодисперсный наполнитель. Наличие в поровом растворе водорастворимых соединений в промерзающей системе снижает миграцию влаги и развиваемые в мерзлой зоне давления в той мере, в какой эти соединения понижают осмотический потенциал влаги, независимо от природы этих соединений.

Установленные закономерности можно использовать для регулирования процессов переноса и пучения в промерзающих дисперсных системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерягин Б.Н., Чураев Н.В. // Коллоид. журн. 1980. Т. 42. № 5. С. 842.
2. Бровка Г.П., Дедюля И.В., Чураев Н.В. // Коллоид. журн. 1990. Т. 52. № 2. С. 345.
3. Бровка Г.П., Дедюля И.В., Лиштван И.И., Чураев Н.В. // Криология почв: Сборник научных трудов. Пушино, 1991. С. 51.
4. Давидовский П.Н., Бровка Г.П. Тепло- и массоперенос в промерзающих торфяных системах. Минск: Наука и техника, 1985. 160 с.
5. Бровка Г.П., Мурашко А.А. // Криология почв: Сборник научных трудов. Пушино, 1991. С. 67.