

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 551.328/345

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КРИОГЕННОГО ДАВЛЕНИЯ
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТАХ**

С.Е. Гречищев, А.В. Брушков, Арк.В. Павлов, О.В. Гречищева

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; cryogrek@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований криогенного давления в промерзающих влагонасыщенных засоленных дисперсных грунтах. Получены первые экспериментальные данные для оценки зависимости криогенного давления от степени засоленности промерзающего влагонасыщенного дисперсного грунта. Установлено, что при возрастании криогенного давления и начальной засоленности грунта увеличивается содержание незамерзшей влаги в мерзлой зоне грунта.

Криогенное давление, мерзлые грунты, засоленность, влагонасыщенный дисперсный грунт

**THE EXPERIMENTAL STUDIES OF CRYOGENIC PRESSURE
IN FREEZING WATER-SATURATED SALINE SOILS**

S.E. Grechishchev, A.V. Bruschkov, Ark.V. Pavlov, O.V. Grechishcheva

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; cryogrek@mail.ru

The results of experimental laboratory investigations of cryogenic pressure of freezing water-saturated saline fine-grained soils have been presented. The first experimental data for evaluation of cryogenic pressure dependence on the salinity of freezing fine-grained soils have been obtained. It has been established that the unfrozen water content in frozen saline fine-grained soils increases with the rise of cryogenic pressure and soil salinity.

Cryogenic pressure, frozen ground, salinity, water-saturated fine-grained soil

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени термодинамические условия формирования криогенного давления при замерзании засоленных дисперсных грунтов не изучались. Одна из задач данного исследования – выполнить систематическое экспериментальное лабораторное изучение термодинамических условий формирования криогенного давления в засоленных дисперсных грунтах при промораживании последних по закрытой схеме опытов.

Ранее авторами [Гречищев и др., 2006, 2007, 2008а,б] в экспериментах с незасоленными грунтами было установлено, что значение криогенного давления в дисперсных незасоленных грунтах существенно отличается от теоретически рассчитанного термодинамического значения 13,3 МПа/°С (133 атм/°С) – давления при замерзании дистиллированной воды в закрытом недеформируемом объеме. Термодинамические условия формирова-

ния криогенного давления в незасоленных дисперсных грунтах зависели от условий их замораживания (температурного режима и влагонасыщенности образцов) и от наличия либо отсутствия влагоподпитки (открытая или закрытая схема промерзания).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Лабораторные исследования состояли в изготовлении образцов заданной засоленности и их направленном промораживании (сверху вниз) в холодильной камере в специально разработанном динамометрическом устройстве, установленном в прессе-релаксометре (рис. 1). Устройство обеспечивало герметичность, теплоизоляцию с боков, подогрев дна и измерение криогенного давления. Кроме того, независимо от динамометра измерялась деформация пучения образца индикатором

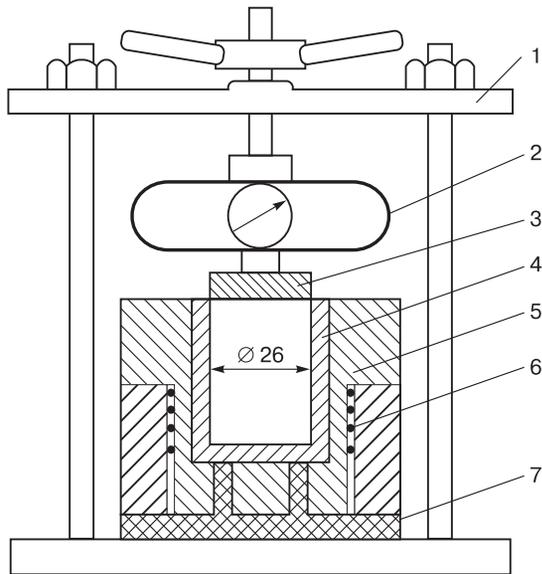


Рис. 1. Схема лабораторного устройства для измерения величины морозного пучения и криогенного давления в закрытой системе:

1 – винтовой пресс; 2 – динамометр; 3 – металлический штамп; 4 – металлический стакан, заполненный испытуемым грунтом; 5 – теплоизоляция; 6 – проволочный нагреватель; 7 – металлическая подставка.

часового типа. Исследования выполнены для двух типов грунтов: суглинка и супеси пылеватых, с начальной засоленностью 0,21 и 0,24 % соответственно. Пробы грунта были отобраны на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО): суглинок (mQ_{III}) – на полигоне Бованенково, супесь (а, м, laQ_{III}) – на Заполярном ГНКМ. Получены характеристики гранулометрического состава, пластичности, засоленности и гигроскопической влажности обоих типов грунтов (см. таблицу). Дополнительная засоленность до заданного значения обеспечивалась добавлением расчетного количества NaCl относительно массы сухого грунта и растворением в необходимом объеме дистиллированной воды для создания заданной влажности образца. Значения засоленности

менее начальной (природной) достигались отмыванием в дистиллированной воде, для ускорения осаждения применялось центрифугирование. Промораживаемая проба использовалась один раз.

В экспериментах получены зависимости вертикальной составляющей криогенного давления от засоленности образцов грунтов. Опыты выполнялись по закрытой схеме, т. е. в замкнутом объеме без подтока (оттока) влаги извне измерительного объема. Давление в ходе промораживания образцов измерялось динамометром ДОСМ-3 на 3 т. Размеры образцов: диаметр 26 мм, высота 70 мм. Исследования проводились для влагонасыщенных грунтов, коэффициент влагонасыщения в образцах, находящихся в обойме, составлял 0,99–1,0, объемная влажность исходных образцов около 0,3 д. е.

Всего выполнено 22 опыта, в том числе 11 для суглинка и 11 для супеси при разной степени засоленности: 0,05; 0,1; 0,21–0,24; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 2,0 и 3,0 %. Продолжительность опытов с грунтом от 2 до 5 сут. После промораживания образца грунта осуществлялась его разделка и изучалось распределение плотности скелета, влажности и влагонасыщения в образцах грунтов. В отдельных опытах анализировалось распределение по вертикали засоленности образца после промораживания. Испытания выполнены при температуре среды (верхней части образца) -7°C и температуре нижней части образца $+2...+4^{\circ}\text{C}$. Образец промерзал не полностью. Нижняя часть образца высотой 20–25 мм оставалась талой, мерзлая часть была высотой 45–50 мм. Для улучшения герметизации верхней части образца между гильзой, грунтом и штампом помещалась разовая полиэтиленовая прокладка толщиной 0,1 мм, штамп с прокладкой заглублялся в гильзу на 1–2 мм. При недостаточной герметизации (прокусывание или разрыв прокладки) в начале промораживания наблюдалось выдавливание жидкости и намораживание ледяного ободка вокруг штампа. Такой опыт прерывался и образец подготавливался повторно. Таким образом, была достигнута повторяемость резуль-

Характеристика гранулометрического состава, пластичности, засоленности и гигроскопической влажности пылеватого суглинка (mQ_{III}) и пылевой супеси (а, м, laQ_{III})

№ пробы	Тип грунта	Гранулометрический состав, %									Гигроскопическая влажность, %	Пределы пластичности, %		Число пластичности, %	Засоленность, %
		Песок					Пыль		Глина			верхний	нижний		
		>1 мм	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001 мм					
1	Суглинок	–	0,2	0,1	0,9	55,1	16,0	7,2	6,4	14,1	0,9	29	20	9	0,21
2	Супесь	0,1	2,4	4,1	11,7	56,3				25,4	1,8	34	29	5	0,24

татов измерения криогенного давления с ошибкой не более 10 % для каждого значения, что было проверено в методических опытах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в результате опытов зависимости величины вертикальной составляющей криогенного давления от засоленности влагонасыщенных грунтов (для супеси и суглинка) приведены на рис. 2.

Криогенное давление в промерзающем суглинке оказалось несколько выше, чем в супеси, что объясняется большей долей пылевато-глинистой фракции в гранулометрическом составе. При увеличении засоленности до 0,4–0,5 % криогенное давление возрастало от 8–12 до 15–25 МПа, дальнейшее увеличение засоленности вызывало резкий спад криогенного давления. При засоленности, равной 1 %, криогенное давление составляло 8 МПа для влагонасыщенного суглинка и 2–3 МПа для супеси. Далее давление монотонно снижалось до 2–3 МПа. Для интерпретации полученных результатов необходимо учитывать жесткость всей системы, состоящей из пресса-релаксометра, динамометра и самого образца с устройством-приспособлением. Введение в расчет напряжений коэффициента жесткости динамометра сделано в работе [Гречищев и др., 2006].

Максимальное значение криогенного давления достигалось через 0,5 суток от начала замораживания. С увеличением продолжительности замораживания засоленного грунта наблюдалось некоторое уменьшение давления, достигнутого средней величины 2–3 %/сут в первые 5 суток, затем процесс снижения давления практически затухал. На границе раздела мерзлой и талой частей образцов засоленного грунта в большинстве опытов образовывался тонкий шпир льда мощностью до 1–2 мм.

При промораживании влагонасыщенного грунта с засоленностью 0,2–0,5 % наблюдалось существенное увеличение объемной влажности в мерзлой части образцов в зоне толщиной 2–3 см над поверхностью раздела мерзлой и талой частей и пропорциональное снижение объемной влажности в талой части, при этом засоленность грунта в этой зоне мерзлого образца оставалась примерно равной исходному значению или незначительно увеличивалась. В талой части снижение объемной влажности могло достигать 30 % от исходной, одновременно уменьшение засоленности не превышало 10 % от исходного значения с соблюдением баланса по влажности и засоленности между талой и мерзлой частями образца.

При промораживании влагонасыщенного грунта с засоленностью 1–2 % увеличение объем-

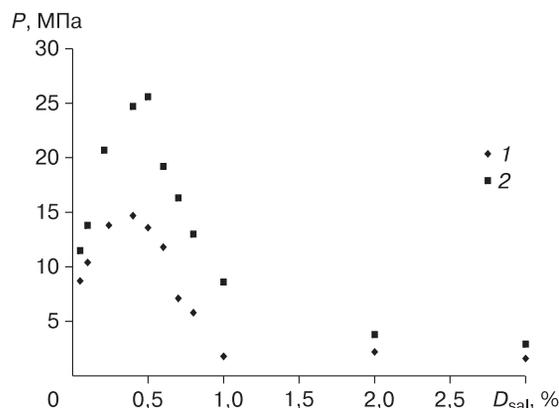


Рис. 2. Зависимости вертикальной составляющей криогенного давления (P) от засоленности влагонасыщенных грунтов (D_{sal}):

1 – пылеватая супесь (mQ_{III}), 2 – пылеватый суглинок (a, m, laQ_{III}).

ной влажности в мерзлой части образцов в зоне толщиной 2–3 см над поверхностью раздела мерзлой и талой частей было небольшим, значения влажности по вертикали распределялись равномерно. Зафиксировано понижение засоленности в мерзлой части образцов, которое достигало 20–30 % от исходного значения в зоне толщиной 1,0–1,5 см над поверхностью раздела талой и мерзлой частей образца. В талой части объемная влажность снижалась незначительно, а засоленность возрастала до 10–20 % от исходной.

В исследованиях, выполненных ранее [Гречищев и др., 2007], было установлено, что формирование криогенных давлений при промерзании влагонасыщенных грунтов вызывает возрастание в них содержания незамерзшей влаги. Расчеты по данным о влажности и плотности скелета, полученным после разделки замороженных образцов с разной степенью засоленности, показали, что увеличение засоленности промораживаемых влагонасыщенных грунтов вызывает дополнительное возрастание содержания незамерзшей влаги.

ВЫВОДЫ

В условиях градиентного температурного поля, влагонасыщенности среды и ее закрытости промерзание дисперсного грунта характеризуется следующими свойствами:

- криогенные давления в засоленных грунтах (при малой степени засоленности – до 0,6 %) достаточно велики и могут быть несколько выше, чем в незасоленных, но не достигают предельных термодинамических показателей для чистой воды;

- при промораживании дисперсного грунта с засоленностью более 0,6 % криогенное давление

резко падает; чем меньше доля пылевато-глинистой фракции в гранулометрическом составе грунта, тем круче спад зависимости криогенного давления от засоленности;

– наличие значительных криогенных давлений (более 2 МПа) и высокая степень засоленности замороженных образцов вызывают резкое возрастание содержания незамерзшей влаги в мерзлой зоне образцов.

Экспериментальные исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект 10-05-00531).

Литература

Гречищев С.Е., Кутвицкая Н.Б., Минкин М.А., Павлов А.В. Криогенное давление в поровой влаге искусственно замораживаемых водонасыщенных грунтовых оснований в градиентном поле температур // Теория и методы замораживания грунтов искусственным холодом (ТМЗГ-2006).

СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та низкотемпературных и пищевых технологий, 2006, с. 32–38.

Гречищев С.Е., Павлов А.В., Гречищева О.В. Поровое давление и незамерзшая влага в мерзлых грунтах в градиентном поле температур // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”. Салехард, Объед. науч.-техн. изд-во Пушинского науч. центра РАН, 2007, т. II, с. 133–135.

Гречищев С.Е., Павлов А.В., Гречищева О.В. Формирование криогенного давления во влагоненасыщенных дисперсных грунтах // Теория и методы замораживания грунтов искусственным холодом (ТМЗГ-2008). СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та низкотемпературных и пищевых технологий, 2008а, с. 10–15.

Гречищев С.Е., Павлов А.В., Гречищева О.В. Экспериментальное изучение криогенного давления в водоненасыщенных дисперсных грунтах // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, Тюм. гос. нефтегаз. ун-т, 2008б, с. 386–389.

*Поступила в редакцию
27 декабря 2010 г.*