

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.328.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЬДОНАКОПЛЕНИЯ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ
ПРИ ИНЪЕКЦИОННОМ ПОСТУПЛЕНИИ ВЛАГИ

Я.Б. Горелик

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

Приводится описание лабораторной установки и условия проведения опытов. Основными элементами установки являются внутренние перегородки, которые разбивают промерзающий объем на зоны питания и деформаций. Показано, что при действии инъекционного механизма и деформациях ползучести промерзающего слоя могут быть образованы как чистые льды, так и льдогрунты различного состава и строения. Чистый лед образуется, если отношение радиуса зоны питания к радиусу зоны деформаций промерзающего слоя превышает критическое значение, в противном случае образуется льдогрунт. Если скорость промерзания в зоне деформаций выше, чем в зоне питания, то формируется ритмично-слоистый лед: слои льда чередуются с прослоями минерального компонента.

Промерзающий слой, зона питания, зона деформаций, инъекционный поток, ползучесть, лед, льдогрунт

MODELLING OF ICE ACCUMULATION IN FREEZING GROUND
AT INJECTION MOISTURE ENTRY

J.B. Gorelik

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

The laboratory device and conditions of the experiments are described. The main elements of the device are the internal walls which divide the freezing volume into the water supplying zone and the deformation zone. It is shown that both the clear ice and the icy frozen soil may be formed due to the injection mechanism and the creep of the frizzing layer. The clear ice is formed when the ratio of the water supplying zone radius to the deformation zone radius is more than some critical value. In the opposite case, only frozen soil with different ice content may be formed. If the freezing rate in the deformation zone is higher than that in the water supplying zone, the rhythmic-layered ice is formed: the thick ice layers and the thin soil layers alternate.

Freezing layer, water supplying zone, deformation zone, injection flow, creep, ice, icy soil

ВВЕДЕНИЕ

С инъекционным механизмом льдообразования при промерзании грунтов в ряде работ связывается возникновение бугров пучения [Маскав, 1978] и пластовых льдов [Дубиков, 2002]. В.В. Баулин с соавторами пришли к выводу, что на полуостровах Ямал и Гыданский "...подавляющее большинство крупных ледяных образований в морских и гляциально-морских отложениях имеет четко выраженные признаки инъекционного происхождения" [Баулин и др., 1967, с. 140]. Инъекционная составляющая потока влаги к фронту промерзания может играть существенную роль и при воздействии сил пучения на элементы инженерных сооружений при промерзании грунтов оснований в условиях, близких к условиям закрытой системы.

Наиболее объяснимо возникновение инъекционного напора при промерзании сверху несквозных

подозерных таликов с образованием бугров пучения. Определяющую роль в этом процессе играет чашеобразная форма кровли мерзлых пород, которые являются естественным водупором с нижней и боковых сторон промерзающего объема, образующего (вместе с промерзающим слоем) закрытую систему. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, представления об инъекционном механизме несут, скорее, интуитивный характер. Автору не известны теоретические или экспериментальные исследования, в которых были бы установлены особенности льдообразования, отождествляемые с этим механизмом. В частности, неизвестно, является ли дислоцированность пород неотъемлемым атрибутом инъекционного механизма или при его действии возможен рост достаточно однородных по составу и строению плас-

тов льда. Другой вопрос состоит в том, какой возможный вещественный состав должны иметь инъекционные льды в зависимости от исходных параметров системы и условий промерзания.

В работах [Горелик, 2008; Gorelik, 2008] предложено разграничить промерзающую закрытую систему на зону деформаций и зону питания. Теоретическими методами получены, в частности, следующие выводы.

- При инъекционном механизме возможно образование как однородных по составу и строению пластов льда (при деформациях установившейся ползучести промерзающего слоя), так и пластов в форме ледяного ядра, окруженного по горизонтали льдогрунтом (при затухающих деформациях промерзающего слоя).

- Состав образующихся льдов может варьировать от чистого льда до льда с высокой концентрацией минеральных частиц – льдогрунта. В процессе образования чистого льда он подстилается линзой чистой воды. Чистый лед может быть

образован только в том случае, когда площадь зоны питания в плане (при фиксированной пористости вмещающего грунта) превышает площадь зоны деформаций в определенное (критическое) число раз. Если это условие не выполняется, то образуется только льдогрунт с различным содержанием минеральных частиц.

Целью настоящей работы является проверка этих выводов путем лабораторного моделирования процесса льдонакопления при действии инъекционного механизма питания растущего льда.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Основным элементом установки является устройство, обеспечивающее инъекционное поступление влаги в зону деформаций (которая одновременно является зоной льдонакопления). Принципиальная схема устройства в двух вариантах приведена на рис. 1, а, б. Обе схемы реализуют

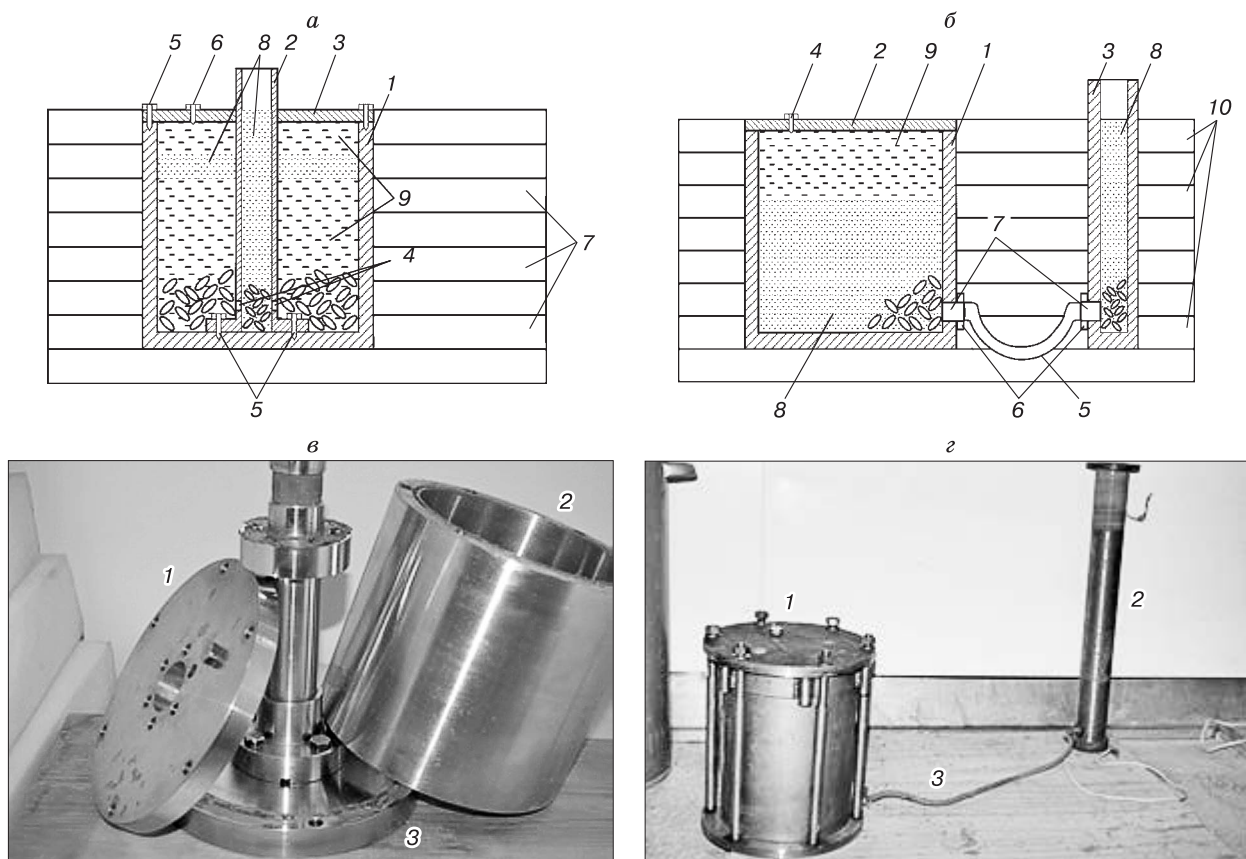


Рис. 1. Принципиальные схемы (а, б) и фотографии устройств (в, з), обеспечивающих инъекционное поступление влаги в зону льдонакопления:

а – первая схема с размещением зоны деформаций внутри зоны питания; б – вторая схема с вынесением зоны деформаций за пределы зоны питания; в – устройство по первой схеме: 1 – кольцевая крышка, 2 – боковая стенка, 3 – дно сосуда с закрепленной на нем внутренней перегородкой; з – устройство по второй схеме: 1 – сосуд питания с закрепленными внешней крышкой и внешним дном, 2 – сосуд зоны деформаций, 3 – соединительная трубка с электроизоляцией нагревательной спирали. Поясн. и обозн. см. в тексте.

деформации промерзающего слоя при установившейся ползучести. Каждая из них моделирует определенную геологическую ситуацию взаимного расположения зон питания и деформаций.

Первое устройство (см. рис. 1, *a*) представляет собой толстостенный цилиндрический сосуд 1 из прочного материала, разделенный на две кольцевые зоны внутренней перегородкой 2 с дренажными отверстиями 4 в нижней части. Перегородка своей нижней частью жестко скреплена с дном сосуда болтами 5. Внутренняя кольцевая зона заполнена водонасыщенным грунтом 8, размер зерен которого в нижней части превышает диаметр дренажных отверстий. Внешняя кольцевая зона сверху закрыта кольцевой крышкой 3 из прочного и жесткого материала, которая жестко соединена с корпусом сосуда болтами и имеет уплотнение в местах стыка с внутренней перегородкой (на рисунке не показано). В крышке имеется отверстие с винтовой заглушкой 6 для введения ледяной заправки с целью инициации процесса льдообразования. Внешняя кольцевая область может быть заполнена слоями грунта и чистой воды специальным способом, который поясняется ниже. Внешняя боковая поверхность и дно сосуда надежно теплоизолируются листами теплоизоляции 7. Устройство размещается в холодильной камере, промораживание осуществляется сверху.

Промерзание описанной системы (см. рис. 1, *a*) должно сопровождаться увеличением ее объема вследствие различия в плотностях воды и льда. В силу высокой жесткости и прочности всех элементов системы и весьма низкой сжимаемости компонентов грунта это изменение объема может происходить только за счет деформаций промерзающего слоя в центральной кольцевой области. Инъекция воды в зону деформаций осуществляется из внешней кольцевой области (где деформации промерзающего слоя отсутствуют) через дренажные отверстия в результате оттеснения избытка воды от фронта промерзания. В рассматриваемой схеме внешняя кольцевая область образует зону питания для внутренней кольцевой области – зоны деформаций промерзающего слоя. Критический диаметр зоны питания зависит от пористости заполняющего ее грунта [Gorelik, 2008]. Это позволяет (при заданном диаметре внутренней перегородки) подобрать внешний диаметр сосуда таким образом, что при заполнении внешней полости чистой водой этот диаметр будет превышать критическое значение, а при заполнении грунтом – будет ниже критического. Соответственно, при чередовании по вертикали во внешней кольцевой области слоев чистой воды и грунта после промерзания всей системы в зоне деформаций должно наблюдаться чередование слоев чистого льда и льдогрунта. На рис. 1, *a* показано чередование слоев воды 9 и грунта 8 в зоне питания, которое при-

мерно соответствует фактически примененному в проведенных экспериментах. Грунт в зоне питания отсыпался на металлическую сетку, которая закреплялась на специальной подставке (на схеме не показана) из тонких металлических стержней, опирающихся на дно сосуда. Отметим также, что характеристики грунта в зонах питания и деформаций могут не совпадать между собой.

В схеме второго устройства (см. рис. 1, *b*) сосуда, ограничивающие зону деформаций и зону питания, пространственно разделены. На этой схеме обозначено: 1 – корпус сосуда, ограничивающего зону питания, 2 – крышка (способ крепления к корпусу поясняется ниже), 3 – корпус сосуда, ограничивающего зону деформаций, 4 – затравочное отверстие с винтовой заглушкой, 8 – грунт, 9 – вода. Сосуды 1 и 3 соединены между собой дренажной трубкой 5, которая с помощью накладных гаек 6 герметично крепится к штуцерам, заделанным в дренажные отверстия 7 корпуса сосудов. Боковые стенки сосудов и их дно теплоизолируются листами теплоизоляции 10. Устройство размещается в холодильной камере, промораживание осуществляется сверху.

Конкретная реализация деталей и элементов устройств, использованных в экспериментах, показана на фотографиях (см. рис. 1, *b, z*). В первой схеме рисунка (см. рис. 1, *b*) дно и боковая стенка сосуда выполнены разборными для удобства изготовления и монтажа внутренних деталей устройства. Детали изготовлены из нержавеющей стали. Внутренний диаметр сосуда 152 мм, внутренний диаметр зоны деформаций 25 мм, высота сосуда (без учета толщины крышек) 160 мм, толщина стенки 20 мм. В собранном состоянии верх трубы, ограничивающей зону деформаций (ее горловина), выступает над кольцевой крышкой на 30 мм. С внешней стороны горловины выполнена проточка для намотки спирали нагревателя и крепления термодатчика. Во второй схеме (см. рис. 1, *z*) крышка и дно питающего сосуда выполнены двойными, внешняя крышка и внешнее дно стянуты между собой металлическими шпильками с помощью гаек. Все детали выполнены из стали. Высота питающего сосуда 230 мм, внутренний диаметр 170 мм, толщина стенки 5 мм, толщина внешней крышки и внешнего дна 12 мм. Высота трубы зоны деформаций 500 мм, внутренний диаметр 54 мм, толщина стенки 4 мм. Ее верхняя часть (горловина) ограничена фланцем, который выступает над слоем теплоизоляции и прижимается к ней своей нижней образующей (см. рис. 2, *u*). Соединительная (дренажная) трубка внутренним диаметром 2 мм снаружи снабжена спиралью, по которой в процессе проведения опыта пропускался ток небольшой силы для предотвращения переморзания трубы. На горловине сосудов, ограничивающих зону деформаций, с их внешней стороны намотаны

спирали нагревателей для обеспечения возможности регулировки скорости промерзания грунта в этой зоне. Для контроля за температурными изменениями в системе каждое устройство оборудовано тремя термопарами: одна размещалась на горловине сосуда зоны деформаций с внешней стороны, две – на внешней стенке сосуда питания в его верхней и нижней части (см. рис. 1, а) и в средней и нижней части сосуда зоны деформаций (см. рис. 1, б).

После заполнения грунтом в устройство заливается дистиллированная вода до полного вытеснения воздуха (в уровень нижней образующей крышки питающего сосуда). Заливка производится через горловину сосуда зоны деформаций при открытом загравочном отверстии крышки сосуда питания. Специальных действий по удалению растворенного в воде воздуха не проводилось. Промораживание во всех экспериментах осуществлялось в холодильной камере при периодических колебаниях температуры в диапазоне от -15 до -18 °С. В качестве теплоизоляции использовались листы поролон. В конструкции обоих типов устройств не предусмотрено специального приспособления, обеспечивающего жесткую заделку промерзающего слоя в стенке трубы, ограничивающей зону деформаций (как это предлагалось ранее при экспериментальном исследовании льдонакопления при затухающей ползучести промерзающего слоя [Горелик, 2008]). При возникновении инъекционного напора промерзающий грунт в зоне деформаций ползет по стенке трубы после преодоления предела прочности на сдвиг на контакте со стенкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью устройства, приведенного на фотографии рис. 1, в, выполнено четыре эксперимента. В первом эксперименте сосуд, ограничивающий зону деформаций, в нижней части был заполнен галькой с характерным размером зерен 10–15 мм в поперечнике. Верхние примерно 7 см сосуда заполнены мелким цветным (аквариумным) гравием с характерным размером зерен 2–3 мм в поперечнике. Сосуд, ограничивающий зону питания, заполнен грунтом так, как показано на рис. 1, а. При этом верхний слой грунта состоит из гальки с размером зерен 10–15 мм, а нижний (на дне сосуда) – из гальки с размером зерен 30–40 мм в поперечнике. В тех горизонтальных уровнях, где размещена галька, критическое значение радиуса больше фактического радиуса сосуда, а в уровнях, заполненных только водой, наоборот, меньше.

После полного промерзания системы в зоне деформаций образовалась колонка мерзлого грун-

та высотой около 30 см (см. рис. 2, а), что почти в два раза превышает высоту сосуда. На рис. 2, б приведена фотография мерзлого грунта, образовавшегося после промерзания в зоне питания (где видны верхний и нижний слои гальки). После завершения эксперимента № 1 колонка мерзлого грунта в зоне деформаций спиливалась у основания и фотографировалась. Фотографии колонки с поворотом на 180° вокруг продольной оси приведены на рис. 2, в, г. Строение мерзлой колонки следующее (сверху вниз): в интервале 0–10 мм – лед молочно-белого цвета с большим количеством мелких пузырьков воздуха (характерный размер – 0,2 мм в поперечнике); 10–105 мм – льдогрунт, в верхней части (до уровня 75 мм) минеральная составляющая представлена цветным гравием, в нижней – галькой (хотя в этой части колонки зерна минерала несколько разуплотнены по сравнению с первоначальной засыпкой в талом состоянии, в целом минеральная часть образует довольно компактную и плотную структуру); 105–300 мм – лед с отдельными слоями минеральных включений из гальки, лед молочно-белого цвета с большим количеством мелких воздушных включений, расположение минеральных слоев во льду создает впечатление некоторой ритмичности (минеральные слои представлены как отдельными зернами гальки, так и их сильно разуплотненными по сравнению с первоначальной засыпкой группами по 3–4 штуки в слое). По всей высоте колонки отсутствуют следы трещин или дислокаций.

Во втором и третьем экспериментах галькой заполнена только самая нижняя часть трубы, ограничивающей зону деформаций (до уровня чуть выше дренажных отверстий). Остальная ее часть (до уровня верха кольцевой крышки) заполнена цветным гравием. Заполнение питающего сосуда грунтом идентично первому эксперименту. Результаты этих двух экспериментов № 2 и 3 оказались весьма близкими, поэтому приведены данные только по одному из них (эксперименту № 3). После промерзания образовалась колонка мерзлого грунта высотой 40 см (см. рис. 2, д). Фотографии колонки с поворотом на 180° вокруг продольной оси после отделения от устройства даны на рис. 2, е, ж. На рис. 2, з приведена фотография колонки в более крупном масштабе. Колонка имеет следующее строение: в интервале 0–10 мм – лед молочно-белого цвета с большим количеством мелких пузырьков воздуха; 10–90 мм – льдогрунт, минеральная составляющая представлена цветным гравием, зерна разуплотнены незначительно; 90–400 мм – лед со слоями минеральных включений из гравия, лед молочно-белого цвета с большим количеством мелких воздушных включений, минеральные слои во льду расположены параллельно фронту промерзания, их толщина изменяется от 5



Рис. 2. Фотографии результатов экспериментов:

а – колонка мерзлого грунта после промерзания по первой схеме (эксперимент № 1); *б* – мерзлый грунт в сосуде питания (эксперименты № 1–3, верхняя крышка и боковая стенка сняты); *в, з* – колонка после отделения от основания с поворотом на 180° вокруг продольной оси (эксперимент № 1); *д* – колонка мерзлого грунта после промерзания (эксперимент № 3); *е, ж* – колонка после отделения от основания с поворотом на 180° вокруг продольной оси (эксперимент № 3); *з* – то же в более крупном масштабе; *и* – лед, образовавшийся после промерзания по второй схеме; *к, л, м* – колонка после отделения от основания с поворотом на 120° вокруг продольной оси (первая схема, эксперимент № 4).

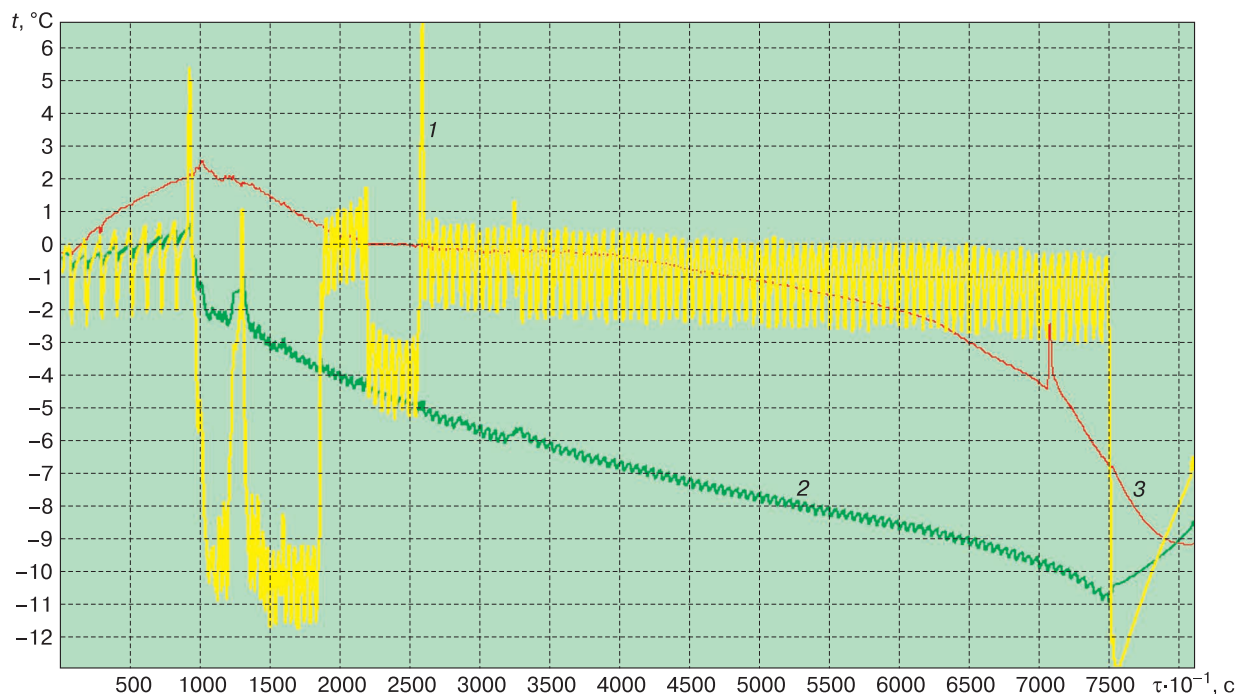


Рис. 3. Запись показаний термодатчиков в эксперименте № 1 по первой схеме:

1 – датчик на горловине зоны деформаций; 2 – на внешней стенке сосуда питания на уровне низа кольцевой крышки; 3 – на внешней стенке сосуда питания на уровне верха дна сосуда; t – температура; τ – время.

до 25 мм, расстояние между слоями 20–30 мм. Минеральные слои представлены сильно разуплотненными группами из зерен гравия. Трещины и дислокации по длине колонки отсутствуют.

В четвертом эксперименте заполнение зоны деформаций грунтом идентично второму и третьему экспериментам. Питающий сосуд заполнен галькой в один слой от дна до уровня, соответствующего положению верхней границы верхнего слоя гальки в экспериментах № 1–3. После промерзания образовалась колонка мерзлого грунта высотой около 20 см. При ее отделении от устройства при случайном ударе она распалась на три фрагмента. Фотографии колонки с поворотом примерно на 120° вокруг продольной оси приведены на рис. 2, *к–м*. Лыдогрунт колонки в верхнем 10-миллиметровом слое представлен льдом молочно-белого цвета с большим количеством мелких воздушных включений. Примерно такие же по толщине прослойки льда расположены в интервалах 50–60, 100–110, 140–150 мм. В составе лыдогрунта колонки преобладает минеральная составляющая, зерна гравия собраны в компактные пачки и слабо разуплотнены.

На рис. 3 представлены результаты автоматической записи температуры в указанных выше точках устройства (см. рис. 1, *а*) в процессе прове-

дения эксперимента № 1. Опрос датчиков производился через 10 с (например, точка 1500 соответствует 15 000 с от начала записи показаний датчиков температуры). Периодические колебания температуры соответствуют циклам автоматического включения и выключения холодильной камеры. Максимальные колебания наблюдаются у датчика на горловине сосуда зоны деформаций, т. е. вне поролоновой изоляции. В точках расположения двух других датчиков эти колебания ощущаются гораздо слабее. Охлаждение в камере включено в точке 1000. Затравка в сосуд питания внесена в точку 1600, примерно в это же время началась самопроизвольная кристаллизация в горловине сосуда деформаций. Рост грунтовой колонки продолжался около 12 ч (до точки 6000). Прекращение ее роста совпадает с довольно значительным изменением наклона в линии поведения температуры у дна сосуда (в сторону более резкого понижения). Это указывает на полное перемерзание жидкости и прекращение фазовых переходов в сосуде питания в этот момент времени. Следует отметить, что понижение температуры ниже 0°C у дна сосуда примерно от точки 2300 до точки 6000 не означает замерзания жидкости у дна. При росте грунтовой колонки в системе развиваются очень высокие давления (в силу

высокого сопротивления движению грунтовой колонки вдоль стенок трубы за счет сил трения) и понижение температуры лишь указывает на смещение точки фазового перехода в сторону снижения вследствие этого повышения давления. Вместе с тем толстые внешние боковые стенки устройства, выполненные из металла, обладающего достаточно высокой теплопроводностью, должны оказывать заметное влияние на характер промерзания в сосуде питания, приводя к искривлению фронта промерзания и его опережающему движению вдоль боковых стенок сосуда. Такое искривление фронта должно приводить к некоторому увеличению инъекционного потока в сравнении с плоским фронтом промерзания, что отражается на количественных характеристиках льдонакопления, но не может принципиально изменить ее общей картины. В идеале боковые стенки устройства должны быть выполнены из теплоизоляционного материала, однако подобрать его, обеспечивая высокую прочность и малую деформируемость стенок, без существенного увеличения затрат на проведение эксперимента не представляется возможным.

В серии опытов по первой схеме (см. рис. 1, а) насыщенность льда пузырьками воздуха, по-видимому, объясняется тем, что при промерзании воды в зоне питания воздух оттеснялся от фронта промерзания и вместе с водой поступал в зону деформаций. При этом основная масса льда в зоне питания оказывается в высокой степени прозрачной и лишь в самой нижней части (где имеется возможность адсорбции воздуха на минеральных частицах, расположенных у дна сосуда) содержит большое количество мелких воздушных включений и имеет молочно-белый цвет (см. рис. 2, б).

Высота слоя льда (10 мм) в самой верхней части колонки для всех опытов серии примерно соответствует избытку объема, оттесняемому при промерзании самого верхнего слоя воды в сосуде питания. Однако высота следующего за слоем льда минерального прослоя значительно (примерно в 2–3 раза) превышает ожидаемое значение, соответствующее промерзанию верхнего минерального слоя в зоне питания. Вероятно, причина этого состоит в том, что в силу непосредственного контакта верхней поверхности грунта в зоне деформаций с воздухом в холодильной камере скорость его промерзания существенно выше, чем в зоне питания (особенно в начальные моменты времени). Об этом можно судить по поведению температуры в соответствующих точках устройства: температура на горловине зоны деформаций значительно ниже, чем в верхней части зоны питания (см. рис. 3). Это означает, что фронт промерзания в зоне деформаций успевает захватить достаточно протяженный интервал минерального компонента в то время,

когда фронт промерзания в зоне питания проходит верхний минеральный слой (когда поток влаги в зону деформаций минимален). Помимо прочего такой захват значительно повышает поровое давление в жидкости, поскольку предельное напряжение сдвига по стенке сосуда (в зоне деформаций) для минерала выше, чем для чистого льда. Чтобы избежать вызванного этим нежелательного нарушения герметичности устройства и выровнять скорости промерзания в зонах деформаций и питания, примерно через 30 мин после начала промерзания был включен нагреватель на горловине зоны деформаций (см. рис. 3, точка 1800). После кратковременного отключения (см. рис. 3, интервал от точки 2200 до 2500) нагреватель оставался включенным до окончания эксперимента. Мощность нагревателя составляла 4,5 Вт. В остальных опытах серии этот нагреватель включался в начале промораживания и не отключался до окончания опытов.

Ритмичность строения льдогрунта ниже определенного уровня в экспериментах № 1–3 также, вероятно, имеет теплофизические и механические причины. При промерзании слоя воды под верхним слоем грунта в зоне питания интенсивность поступающего в зону деформаций потока влаги такова, что фронт промерзания в зоне деформаций почти всегда расположен выше верхней границы минеральной засыпки (в этот период образуется лед без минеральных включений). С продвижением в глубь зоны питания фронт промерзания замедляет движение, и интенсивность поступающего в зону деформаций потока воды падает, в то время как скорость промерзания в последней остается практически постоянной. Это приводит к тому, что фронт промерзания постепенно смещается к поверхности минерала, и в какой-то момент происходит захват зерен приповерхностного слоя. В этот момент сцепление колонки со стенкой трубы возрастает, соответственно увеличивается давление в жидкости. Это происходит до тех пор, пока не будет преодолено предельное напряжение сдвига по стенке трубы, и фазовая граница скачкообразно смещается вверх. Затем начинается новый цикл промерзания до нового захвата зерен поверхности минерала. Таким образом, предполагается, что деформации промерзающей колонки должны носить ступенчатый характер (плавный подъем при образовании чистого льда и скачкообразное изменение при захвате минерала). Однако из-за больших абсолютных значений деформаций колонки не удалось укрепить на ней датчик деформаций, чтобы проверить это предположение непосредственными измерениями. Вместе с тем такие скачки деформаций, вызванные соответствующими изменениями давления, могут быть зафиксированы датчиками акустической эмиссии.

Резкими сбросами давления может быть объяснен и факт высокой насыщенности льда грунтовой колонки пузырьками воздуха. Последние две возможности указаны В.Н. Голубевым (*устное сообщение*).

В четвертом эксперименте после промерзания верхнего слоя воды в зоне питания поток воды в зону деформаций оставался минимальным до окончания процесса, что и отразилось в составе и структуре колонки (см. рис. 2, *к–м*). При этом предположение о максимальном давлении в жидкости при таком режиме промерзания косвенно подтверждается тем, что после окончания эксперимента наблюдалось высачивание небольшого количества воды в местах уплотнения дна и боковой стенки сосуда. В экспериментах № 1–3 признаков нарушения герметичности сосуда не наблюдалось.

По второй схеме, представленной на рис. 1, *б*, был проведен один эксперимент. Сосуд питания заполнен галькой с характерным размером зерен 30–40 мм, а в верхней части – водой (как показано на рис. 1, *б*). Сосуд зоны деформаций заполнен такой же галькой почти полностью, только самый верх его (примерно 10 мм) заполнен цветным гравием. После промерзания образовалась колонка чистого, прозрачного льда высотой около 10 см (см. рис. 2, *и*). Объем выросшего льда примерно соответствует избытку объема, оттесняемому при промерзании верхнего слоя воды в сосуде питания. В верхней части колонки имеются отдельные включения цветного гравия, воздушные включения заметны только в самом верхнем слое льда (толщиной около 10 мм). Лед имеет несколько изогнутых трещин по плоскостям, параллельным фронту промерзания, с характерным размером в плане примерно 1/4 диаметра колонки. При росте льда трижды наблюдался прорыв воды от основания растущего льда по стенке горловины трубы наружу. После замерзания эта вода образовала три ледяных языка, соединенных с телом ледяной колонки (см. рис. 2, *и*). Полное промерзание системы не привело к изменению размера колонки. Осмотр устройства после окончания опыта показал, что на каком-то этапе была нарушена герметичность в месте стыка соединительной трубки с трубой, ограничивающей зону деформаций. Вероятно, это произошло в тот момент, когда фронт промерзания в питающем сосуде достиг уровня поверхности минеральной засыпки. Поток в зону деформаций резко снизился, произошел захват минеральных зерен фронтом промерзания в этой зоне, что привело к росту давления в жидкости и нарушению герметичности системы. Уплотнить нарушенный соединительный стык оказалось невозможно, поэтому эксперименты по второй схеме далее не проводились.

Несколько неожиданным в данном эксперименте (в сравнении с экспериментами по первой схеме) является весьма низкая концентрация воздушных включений в основной массе льда. Возможно, это связано с использованием крупноскелетного материала засыпки с относительно низкой удельной поверхностью, адсорбция растворенного воздуха на которой является минимальной.

Отметим также, что во всех выполненных экспериментах росту льда свойственна высокая устойчивость к внешним тепловым и механическим возмущениям (к высокоамплитудным колебаниям температуры в холодильной камере и давлению в жидкости). Этим инъекционный процесс льдонакопления существенно отличается от сегрегационного, где устойчивость роста отдельного штира может быть нарушена небольшим изменением температуры окружающей среды [Горелик, Колунин, 2002].

ВЫВОДЫ

Лабораторное моделирование инъекционного процесса льдонакопления позволяет сделать следующие выводы.

1. При деформациях установившейся ползучести промерзающего слоя возможно образование однородных по составу и строению слоев чистого льда, если отношение радиуса зоны питания к радиусу зоны деформаций больше критического значения (см. рис. 2, *и*, верхний слой льда на рис. 2, *в, г, е, ж, к–м*).

2. Лыдогрунт с высоким содержанием минеральных частиц (см. рис. 2, *к–м*, верхняя часть колонок на рис. 2, *в, г, е, ж*) образуется, если отношение радиуса зоны питания к радиусу зоны деформаций меньше критического значения.

3. Ритмично-слоистое строение льда с включением слоев минерального компонента (нижняя часть колонки на рис. 2, *в, г, е, ж*) возникает, если отношение радиуса зоны питания к радиусу зоны деформаций превосходит критическое значение и скорость промерзания в зоне деформаций выше, чем в зоне питания.

4. Насыщенность льда пузырьками воздуха может быть связана с периодическими сбросами давления в системе, обусловленными преодолением предельного сдвигового напряжения грунтовой колонкой на стенке трубы. Увеличение газосодержания во льду может быть также связано с увеличением дисперсности грунта, заполняющего обе части системы.

5. Процесс льдонакопления по инъекционному механизму отличается высокой устойчивостью по отношению к колебаниям внешней температуры и инъекционного напора.

6. Количество воды, содержащейся в закрытой системе, достаточно для формирования значитель-

ных по размеру ледяных образований (в сравнении с размерами отдельных элементов системы).

Автор выражает благодарность проф. В.Н. Голубеву за внимательное прочтение рукописи и содержательные замечания, часть которых учтена при подготовке статьи, а другая будет использована в дальнейшей работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОНЗ РАН № 13.

Литература

Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М., Наука, 1967, 214 с.

Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М., ГЕОС, 2002, 246 с.

Горелик Я.Б. Об инъекционном механизме льдонакопления при промерзании грунтов // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов: Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения. Тюмень, 2008, с. 384–386.

Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2002, 318 с.

Gorelik J.B. The mechanism of ice formation in connection with deformation of freezing layer // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 2008, p. 535–540.

Mackay J.R. Sub-pingo water lenses, Tuktoyaktuk Peninsula // Can. J. Earth Sci., 1978, vol. 15, No. 8, p. 1219–1297.

*Поступила в редакцию
27 ноября 2008 г.*