

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 551.328.2

ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА
ЛЬДОНАКОПЛЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ГРУНТОВ

Я.Б. Горелик

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

Для сегрегационного и инъекционного процессов влагопереноса предложена единая система уравнений, позволяющая рассчитывать характеристики льдонакопления и деформаций промерзающего слоя. Система включает балансовые соотношения для тепла, а также масс воды и скелета на фронте промерзания. Потоки влаги для каждого из механизмов определяются с помощью дополнительных соотношений. Для сегрегационного механизма льдонакопления предлагаемая модель позволяет предсказать закономерности деформаций поверхностных фундаментов. Для инъекционного механизма вычисляется доля содержания минерального компонента в формирующихся мерзлых структурах. Показано, что для данного механизма существует критическое значение потока влаги, превышение которого приводит к образованию чистого льда. Расчетные характеристики инъекционного льдонакопления соответствуют натурным наблюдениям состава и строения природных залежей льда, а также результатам специально поставленных лабораторных экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Промерзание грунта, как правило, сопровождается перераспределением влаги ниже фронта промерзания, ее накоплением в мерзлой зоне (в форме льда, тела которого в некоторых случаях достигают весьма значительных размеров), неравномерными деформациями промерзающего слоя и силовым воздействием на элементы инженерных конструкций, первоначально заглубленных в грунтовое основание или опирающихся на него. Потоки влаги в талой части промерзающего грунта, которые являются непосредственной причиной указанных явлений, могут иметь различную природу. Однако наиболее важными из них принято считать потоки, обусловленные сегрегационным либо инъекционным механизмами [Общее мерзлотоведение, 1978]. В основе сегрегационного механизма лежит представление о поверхностных и капиллярных силах, сосредоточенных вблизи контакта мерзлой и талой частей промерзающего массива грунта [Гречищев и др., 1980; Горелик, Колунин, 2002; Beskow, 1947; Miller, 1978]. Эти силы выполняют роль своеобразного насоса, осуществляющего перекачку воды из нижележащих слоев грунта к фронту промерзания. Сегрегационный механизм (и сегрегационное льдонакопление) характерен для тонкодисперсных грунтов (пылеватых супесей, суглинков и глин), промерзающих

в условиях открытой системы (т. е. контактирующих с открытым водоемом). При этом льдонакопление осуществляется в форме слоистых (или иных) текстур, где слои чистого льда (называемые также шлирами) чередуются со слоями грунта [Ершов, 1979]. Сегрегационные потоки и вся картина льдонакопления существенно зависят от температур на границах промерзающего массива, массообменных и теплофизических свойств грунта, а также от внешней нагрузки, передающейся на основание растущего штира в процессе его образования.

Теоретическая модель, наиболее полно учитывающая детали этого процесса, предложена К. О'Нейлом и Р.Д. Миллером [O'Neill, Miller, 1985]. Ее более простой квазистационарный аналог подробно рассмотрен в книге [Горелик, Колунин, 2002]. С помощью этой модели на уровне лабораторного образца вполне удовлетворительно описываются важнейшие характеристики миграционного процесса: потоки влаги, параметры льдонакопления, деформации образца и изменение сил пучения с глубиной промерзания. Однако попытки применить эти сведения для описания воздействий на элементы конструкций в промерзающих грунтах встречают серьезные трудности. Например, фактические данные показывают, что силы

пучения для свай [Орлов, 1962] и поверхностных фундаментов [Сажин и др., 1984] растут с глубиной промерзания, а для образца – падают [Горелик, Колунин, 2002]. Разрешение этого парадокса связано с различиями в характере передаваемых нагрузок на шпировой лед: для образца вся внешняя нагрузка передается на основание растущего шпиря, тогда как в условиях работы реальных конструкций внешняя нагрузка перераспределяется в соответствии с деформационными характеристиками промерзающего слоя и подстилающего его талого основания.

Процесс возникновения потоков инъекционной природы наиболее понятен в случае промерзания сверху замкнутого объема (закрытая система без возможности притока влаги извне), стенки и дно которого являются водоупором (образованы, например, мерзлыми породами или плотными глинами в талом состоянии), а сам объем заполнен водонасыщенным крупносkeletalным материалом (песком или щебнем). Жесткая связь, образующаяся между промерзающим слоем и прочными водоупорными стенками сводит к минимуму (или исключает совсем) возможность вертикальных деформаций промерзающего слоя вблизи этих стенок. Из-за разницы плотностей воды и льда это приводит к возникновению повышенного давления (криогенного напора) в воде вблизи контакта промерзающего слоя с водоупорными стенками и к формированию в этой зоне потока влаги, который направлен от фронта промерзания в глубь массива талых пород. Этот поток влаги (инъекционный поток) концентрируется на фронте промерзания промерзающего слоя в тех точках, которые наиболее удалены от ограничивающих объем стенок и поэтому могут деформироваться вверх под действием криогенного напора. Зоны таких деформаций одновременно являются зонами избыточного льдонакопления при инъекционном механизме их питания. Области грунта промерзающего слоя, прилегающие к местам его жесткой связи со стенками объема, целесообразно назвать зоной питания (жидкой влагой) для зоны деформаций.

Таким образом, для адекватного описания инъекционного процесса также необходимо принимать во внимание деформируемость промерзающего слоя. В принципиальном отношении инъекционное льдонакопление не имеет ограничений по дисперсности промерзающих отложений. Ряд авторов, исследовавших крупные залежи внутри-грунтового льда, пришли к выводу, что основная доля таких залежей имеет следы инъекционного происхождения [Баулин и др., 1967]. До последнего времени теоретические модели (как и описание экспериментальных исследований) процесса инъекционного льдонакопления в литературе отсутствовали.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИ И ЕЕ АНАЛИЗ

В работах [Горелик, 2010; Gorelik, 2008] предложен единый подход к решению проблемы льдонакопления и расчету сопутствующих механических явлений для обоих рассмотренных выше механизмов. В основе этого подхода лежат балансовые уравнения на фронте промерзания и дополнительное соотношение между скоростями движения границ промерзающего слоя:

$$j_h(H) = \kappa \rho_i n_f \dot{H}, \quad (1)$$

$$(n_f - n_u) \dot{z}_f = -(1 - n_f) \dot{z}_s, \quad (2)$$

$$\rho_w j_u(H) = \rho_i n_f \dot{z}_s + (\rho_w n_u - \rho_i n_f) \dot{z}_f, \quad (3)$$

$$\dot{z}_s - \dot{z}_f = \dot{H}. \quad (4)$$

Уравнения (1), (2), (3) – балансы тепла, массы скелета и массы воды соответственно. Функция $j_h(H)$ есть разность потоков тепла со стороны мерзлой и талой частей промерзающего массива, которая, вообще говоря, зависит от толщины промерзшего слоя H . В случае, когда со стороны талой зоны задан градиент температуры $G(H)$, функция $j_h(H)$ записывается в виде

$$j_h(H) = \lambda_f \frac{t_f - t_s}{H} - \lambda_u G(H). \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5) приняты следующие обозначения: $\lambda_f, \lambda_u, \rho_w, \rho_i, \kappa$ – коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунта, плотности воды и льда, теплота фазового перехода лед–вода соответственно; t_s, t_f – температура промерзания (на верхней поверхности массива) и температура фазового перехода (на фронте промерзания); n_f, n_u – пористость грунта на фронте промерзания в мерзлом и талом состояниях; z_s, z_f – положение поверхности грунта и фронта промерзания в текущий момент времени; $j_u(H)$ – поток влаги со стороны талой зоны к фронту промерзания (зависящий, вообще говоря, от H). Точка над буквой здесь и далее обозначает производную по времени. В принятой системе координат ось Oz перпендикулярна фронту промерзания и направлена вверх, талая часть грунта неподвижна в этой системе координат. Скорости движения границ \dot{z}_s, \dot{z}_f положительны, если эти границы смещаются вверх и наоборот.

В отличие от схемы О’Нейлла–Миллера в предлагаемом подходе реализуется однофронтная постановка задачи: зона промерзания отсутствует, а влагонакопление осуществляется на фронте промерзания. Кроме того, здесь впервые введено уравнение баланса скелета (2), что позволяет охарактеризовать льдонакопление в промерзающем слое с помощью пористости n_f , являющейся непрерывной функцией глубины промерза-

ния (в отличие от дискретного представления текстурных показателей, которое применяется в вышеупомянутой схеме и является весьма трудоемким). Главным преимуществом предлагаемого способа описания является возможность постановки и решения ряда задач по расчету совместно протекающих процессов льдонакопления и неравномерного деформирования промерзающего слоя грунта (с учетом действия внешних нагрузок), которые сложно реализовать в иных подходах.

Основной проблемой данного способа является определение функции потока влаги $j_u(H)$ в уравнении (3) как функции глубины промерзания с учетом действующих нагрузок, температурных условий промерзания и свойств конкретного грунта. Если эта функция задана, то система уравнений является замкнутой для определения четырех неизвестных величин H, z_f, z_s, n_f как функций времени. Пористость грунта в мерзлом состоянии n_f (параметрически зависящая от H) характеризует льдонакопление в промерзающем слое, через эту величину могут быть вычислены деформации промерзающего слоя и другие характеристики процесса.

Функция $j_u(H)$ может быть получена из каких-либо эмпирических данных либо выведена теоретическим путем из модельно-теоретических схем явления. Прежде чем продемонстрировать предлагаемый подход на конкретных задачах, остановимся на некоторых общих свойствах системы (1)–(4).

Последовательно исключая из этих уравнений величины $\dot{z}_s, \dot{z}_f, \dot{H}$, получим формулу для пористости грунта в мерзлом состоянии $n_f(H)$ как функцию потоков тепла $j_h(H)$ и влаги $j_u(H)$. Через зависимость потоков от глубины промерзания определяется и зависимость $n_f(H)$:

$$n_f(H) = \frac{n_u \rho_w j_h(H)}{\rho_w n_u + \rho_i (1 - n_u) j_h(H) - \kappa \rho_w \rho_i (1 - n_u) j_u(H)} \quad (6)$$

Если поток влаги отсутствует ($j_u(H) = 0$), то пористость n_f постоянна по глубине и совпадает с пористостью мерзлого грунта, промерзшего в условиях закрытой системы [Горелик, 2007]:

$$n_f(H) = \frac{\rho_w n_u}{\rho_w n_u + \rho_i (1 - n_u)} = \text{const.} \quad (7)$$

Для сегрегационного механизма из модели О'Нейлла–Миллера следует, что поток влаги $j_u(H)$ при любом фиксированном значении H не может превысить максимального значения, которое достигается в стационарном процессе, при этом выполняется соотношение [Gorelik et al., 1998]

$$j_h(H) = \kappa \rho_w j_u(H). \quad (8)$$

В этом случае из (6) следует $n_f = 1$, т. е. образуется чистый лед, что является аналогом образования шпиря в модели О'Нейлла–Миллера. Из уравнения (2) для данного случая также следует $\dot{z}_f = 0$, т. е. фронт промерзания остается неподвижным относительно подстилающего талого грунта, а льдообразование внутри промерзающего слоя целиком трансформируется в вертикальные перемещения (пучение) его верхней поверхности z_s . Поскольку значение $n_f = 1$ является предельным для пористости и достигается при максимуме потока влаги, это означает, что знаменатель выражения (6) всегда положителен и не обращается в нуль ни при каких промежуточных значениях этого потока.

В процессе инъекционного льдонакопления деформации (и скорость перемещения) верхней поверхности промерзающего слоя по контуру его жесткой заделки обращаются в нуль ($\dot{z}_s = 0$). То же самое происходит в сегрегационном процессе, если внешняя нагрузка на промерзающий слой достаточно высока. В этом случае уравнение (2) дает $n_f = n_u$, что означает полное оттеснение избытка возникающего при льдообразовании объема жидкости от фронта промерзания. Из уравнения (3) с учетом (4) определяется поток от фронта промерзания:

$$j_u = -n_u \dot{H} \Delta \rho_{wi} / \rho_w, \quad (9)$$

где $\Delta \rho_{wi} = \rho_w - \rho_i$. Так как $\dot{H} > 0$, этот поток имеет отрицательный знак (направлен в глубь талого массива). Таким образом, в процессе сегрегационного льдонакопления пористость образующегося мерзлого грунта лежит в диапазоне $n_u \leq n_f \leq 1$, причем нижнее значение в этом неравенстве соответствует минимальному значению потока (определяемому по (9)), а верхнее – максимальному его значению (определяемому по (8)).

При инъекционном льдонакоплении верхнее ограничение для потока влаги отсутствует, а нижнее также соответствует значению, определяемому соотношением (9). При этом значение потока, определяемое соотношением (8), является критическим для инъекционного механизма. При изменении потока от минимального до критического значения пористость n_f монотонно изменяется от значения n_u до 1 (согласно выражению (6)), а соответствующее значение скорости движения фронта промерзания \dot{z}_f , оставаясь отрицательным, монотонно уменьшается по модулю от максимальной величины (при $n_f = n_u$) до нуля (при $n_f = 1$). При этом образуется ледогрунт с различным соотношением льда и минеральных частиц. Превышение потоком критического значения приводит к тому, что скорость движения фронта \dot{z}_f становится положительной, т. е. фронт промерзания удаляется от неподвижной талой части грун-

та. При этом промежуток между фронтом промерзания и скелетом талого грунта заполняется водой, и с этого момента на фронте промерзания выполняются соотношения $n_f = n_u = 1$, которые обеспечивают второе предельное решение уравнения (2). Физически это означает, что рост ледяного тела внутри промерзающего слоя при инъекционном механизме льдонакопления при превышении потоком влаги критического значения происходит при наличии ниже него линзы чистой воды, мощность которой непрерывно увеличивается со временем (до полного перемерзания водотоков). Таким образом, величина потока влаги в сравнении с критическим значением при инъекционном механизме льдонакопления должна существенно влиять на состав и строение образующихся льдов.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В работе [Gorelik, 2008] показано, что величина инъекционного потока при промерзании замкнутого объема определяется отношением площадей зоны питания и зоны деформаций (в плане). Для определения деформаций промерзающего слоя и возникающего криогенного напора допол-

нительно записываются механическое уравнение его деформаций и выражение для закона сохранения массы воды в замкнутом объеме. Путем вычислений скорости движения фронта промерзания \dot{z}_f и изменения пористости n_f вдоль горизонтали, в частности, показано, что расчетное строение инъекционных бугров пучения соответствует их натурному описанию [Mackay, 1978]: ледяное ядро окружено (в плане) высокольдистым ледогрунтом. При этом льдистость пород падает с удалением от ядра. Ледяное ядро (и только оно) подстилается линзой чистой воды, которая фонтанирует при вскрытии.

Лабораторное моделирование процесса инъекционного льдонакопления [Gorelik, 2009] подтверждает главные теоретические выводы: 1) при докритическом значении инъекционного потока образуется ледогрунт с высоким содержанием минеральных частиц; 2) превышение потоком критического значения вызывает рост чистого льда. Кроме того, при колебательном режиме температуры на верхней поверхности промерзающего грунта инъекционное льдонакопление приводит к образованию льдов ритмично-слоистого строения, а также льдов с отдельными включениями крупносkeletalного материала (рис. 1).

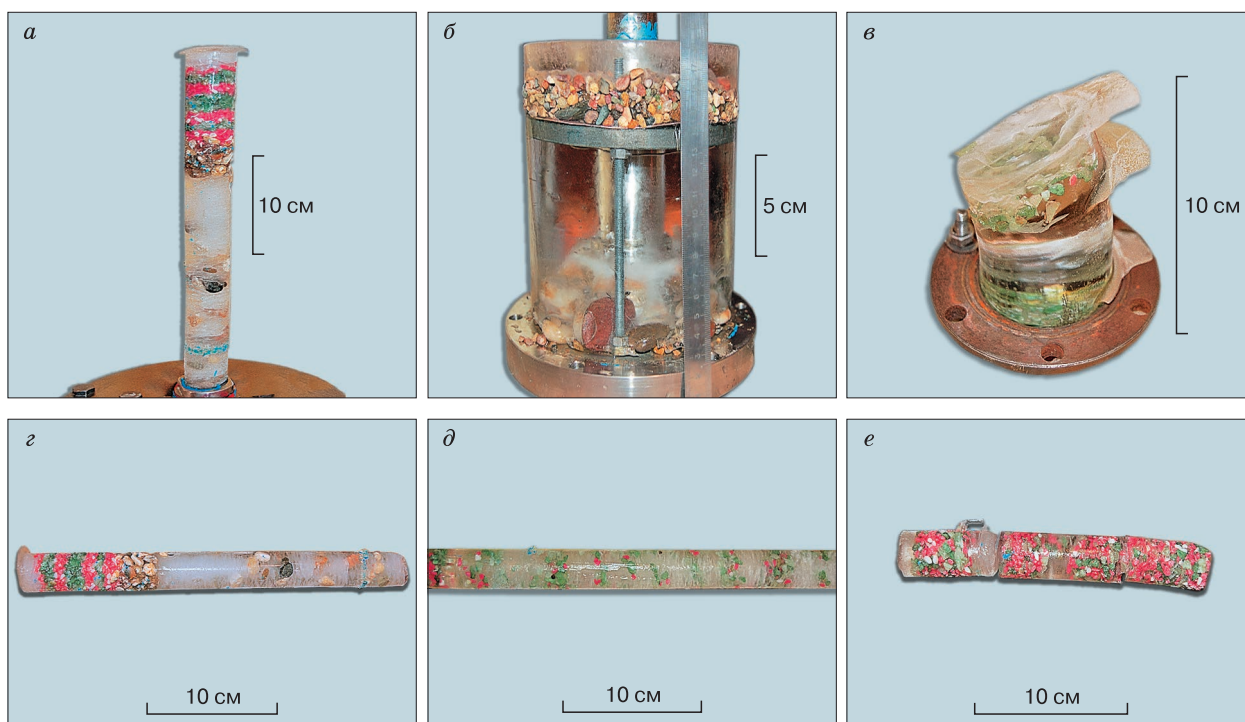


Рис. 1. Фотографии результатов экспериментов:

a – колонка мерзлого грунта при инъекционном питании (зона деформаций располагается внутри зоны питания); *б* – мерзлый грунт в сосуде питания; *в* – колонка мерзлого грунта при инъекционном питании (зона деформаций располагается вне зоны питания); *г* – колонка мерзлого грунта при превышении потоком критического значения; *д* – колонка мерзлого грунта ритмично-слоистого строения при превышении потоком критического значения; *е* – колонка мерзлого грунта (ледогрунт) при докритическом значении инъекционного потока.

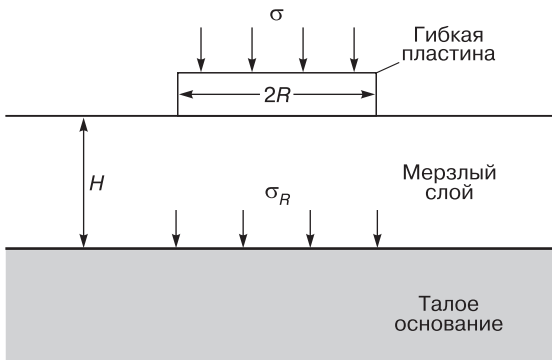


Рис. 2. Схема поверхностного фундамента.

Для сегрегационного механизма процедура расчета параметров льдонакопления и деформирования применительно к инженерным задачам предложена в работе [Горелик, 2010]. Для поверхностного фундамента в виде гибкой круговой пластины радиуса R , равномерно нагруженной нагрузкой σ , в первую очередь определяются деформации промерзающего слоя и действующие на него силы реакции со стороны талого основания при произвольной, но фиксированной толщине слоя H (рис. 2). Промерзающий слой рассматривается как упругая плита, талое основание — как упругое полупространство. (В работе [Gorelik, 2008] показана принципиальная возможность учета реологического поведения мерзлого грунта, если решение упругой задачи известно.) Деформации и силы реакции являются функциями от H , σ и удаления от центра гибкой плиты r . Деформации мерзлого слоя являются осадками. Силы реакции сосредоточены на контакте талого и мерзлого

грунтов и, взятые с обратным знаком, определяют нагрузку σ_R на растущие шпильки льда, расположенные в мерзлом грунте в непосредственной близости от фронта промерзания. Отметим, что для лабораторного образца нагрузка на шпильки σ_R является равномерной и совпадает с величиной σ (влияние веса его мерзлой части пренебрежимо мало), в то время как в рассматриваемой задаче эта нагрузка существенно зависит от деформационных свойств мерзлого слоя. Например, если жесткость этого слоя очень высокая, то нагрузка на шпильковый лед не будет зависеть от σ , а определяется только гравитационным давлением слоя (которое часто намного меньше величины σ). Это различие и приводит к разнице в поведении расчетных характеристик лабораторного образца и натурной конструкции.

После того как нагрузка на шпильки определена, находится функция потока влаги $j_u(H)$, которая параметрически также зависит от σ и r . В работе [Горелик, 2010] предложен способ определения этой функции с помощью специальной вычислительной программы. В основе способа лежит расчетная схема О'Нейлла–Миллера. Дальнейшая процедура сводится к нахождению льдонакопления n_f , деформаций пучения и суммарных деформаций фундамента (с учетом пучения и осадок) на основе уравнений (1)–(4) как функций исходных параметров. Этим определяется зависимость всех расчетных величин от глубины промерзания, радиуса плиты, действующих нагрузок и свойств грунта. Эти зависимости качественно и по порядку величины хорошо согласуются с данными натуральных экспериментов по деформациям поверхностных фундаментов, приведенными в [Сажин и др., 1984; Сажин, Борщев, 1987].

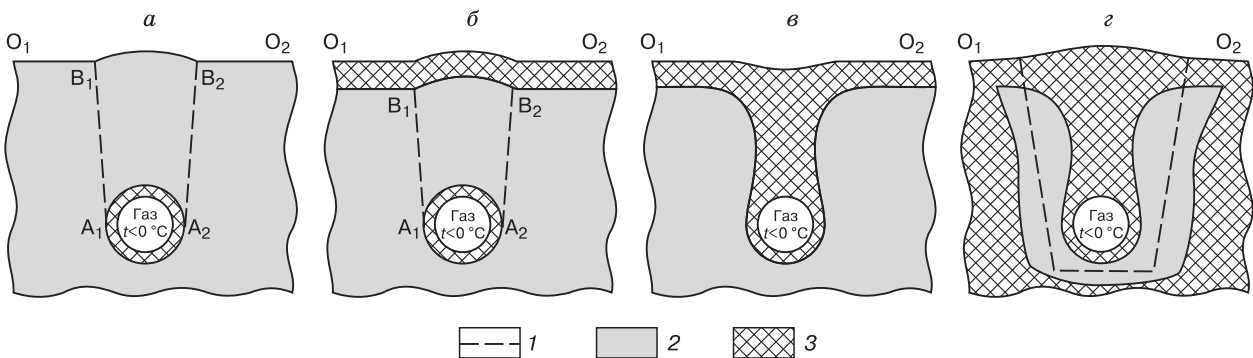


Рис. 3. Схема взаимного расположения холодного трубопровода и сезоннопромерзающего слоя (O_1O_2 – поверхность массива грунта):

а – на талом участке островного распространения многолетнемерзлых пород в теплое время года (A_1B_1, A_2B_2 – поверхности смещения талого грунта); б – то же, в зимнее время года без смыкания мерзлых частей; в – то же, с образованием перемычки из мерзлого грунта между трубой и сезонномерзлым слоем; г – на участке сплошного распространения многолетнемерзлых пород в зимнее время года с формированием мерзлой перемычки: 1 – первоначальный профиль траншеи; 2 – талый грунт; 3 – мерзлый грунт.

Для районов распространения многолетне-мерзлых грунтов охлаждение газа, транспортируемого по трубопроводу, было предложено и частично введено в практику с целью снижения теплового воздействия на мерзлые грунты и повышения устойчивости трубопровода. Однако такое решение оказалось не столь однозначным. Есть достоверные сведения, что даже при отрицательной плавучести трубопровода вдоль трассы имеются “всплывшие” участки трубы. Это явление может быть объяснено действием сил пучения промерзающего грунта на заглубленную конструкцию. Для подземного трубопровода с охлаждаемым ниже 0 °С потоком газа (рис. 3) рассмотрены основные элементы процедуры расчета его деформаций предлагаемым способом. Показано, что в ситуациях, изображенных на рис. 3, а, б, деформации трубопровода носят затухающий характер и его положение стабилизируется внутри грунтовой толщи. В случаях, когда между холодным трубопроводом и слоем сезонного промерзания образуется перемычка из мерзлого грунта (см. рис. 3, в, г), трубопровод может быть вытолкнут на поверхность грунта через несколько сезонных циклов промерзания–оттаивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры показывают, что предлагаемый способ совместного описания процессов льдонакопления и деформаций в промерзающем слое грунта позволяет объяснить их важные особенности как при сегрегационном, так и при инъекционном механизмах переноса влаги к фронту промерзания. Так, при действии сегрегационного механизма способ позволяет осуществить постановку и решение задачи по расчету деформаций элементов конструкций, вызванных пучением промерзающего слоя. Для инъекционного механизма может быть вычислена доля содержания минерального компонента в формирующихся мерзлых структурах вдоль горизонтального простирающегося промерзающего слоя. Для данного механизма существует критическое значение потока влаги, превышение которого приводит к образованию чистого льда (в локальных зонах промерзающего слоя). Если поток влаги не превышает критического значения, то образуется ледогрунт с различным содержанием минерального компонента. Это дает возможность объяснить состав и строение природных залежей льда, а также результаты специально поставленных лабораторных экспериментов.

Предлагаемый способ обладает рядом преимуществ перед существующими методами, осно-

ванными на дискретных способах описания льдонакопления. Дальнейшее его развитие может оказаться полезным для решения задач геотехники и анализа геологических процессов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований 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.
- Горелик Я.Б.** О режимах льдообразования при промерзании грунтов // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 42–49.
- Горелик Я.Б.** Моделирование льдонакопления в промерзающих грунтах при инъекционном поступлении влаги // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 45–53.
- Горелик Я.Б.** Методы расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пучением промерзающего слоя // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 50–62.
- Горелик Я.Б., Колунин В.С.** Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2002, 318 с.
- Гречищев С.Е., Чистотин Л.В., Шур Ю.Л.** Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М., Недра, 1980, 384 с.
- Ершов Э.Д.** Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 214 с.
- Общее мерзлотоведение** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.
- Орлов В.О.** Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1962, 188 с.
- Сажин В.С., Борщев В.В.** Взаимодействие мелкозаглубленных ленточных фундаментов с пучинистыми грунтами // Основания, фундаменты и механика грунтов. М., Госстрой СССР, 1987, с. 5–7.
- Сажин В.С., Борщев В.В., Сажин А.В.** Исследование взаимодействия малозаглубленных фундаментов со слабопучинистым грунтом основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. М., Госстрой СССР, 1984, с. 21–23.
- Beskow G.** Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads. Evanston, Illinois, USA, Technol. Inst., 1947, 145 p.
- 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, USA, 2008, p. 535–540.
- Gorelik J.B., Kolunin V.S., Reshetnikov A.K.** Rigid-ice model and stationary growth of ice // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Permafrost. Yellowknife, Canada, 1998, p. 327–333.
- Mackay J.R.** Sub-pingo water lenses, Tuktoyaktuk Peninsula // Can. J. Earth Sci., 1978, vol. 15, No. 8, p. 1219–1297.
- Miller R.D.** Frost heaving in non-colloidal soils // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Permafrost. Ottawa, Nat. Res. Coun. Canada, 1978, p. 708–713.
- 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.

Поступила в редакцию
12 февраля 2011 г.