

ВСЕРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. Веденеева

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ
И ОЦЕНКА МЕРЗЛЫХ, ПРОМЕРЗАЮЩИХ
И ПРОТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ (ИГК-92)

МАТЕРИАЛЫ III НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СЕМИНАРА

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
1993

модель мерзлого слоя грунта. В частном случае упругих деформаций этого слоя последний можно рассматривать как плиту, деформации и напряжения в которой связаны известным соотношением

$$\sigma(y) = E l \Delta z''''(y), \quad (26)$$

которое следует дополнить граничными условиями на контакте со стенкой.

Когда напряжения на контакте не превосходят значения предельно длительной прочности смерзания грунта со стенкой, можно положить

$$\Delta z(0) = 0. \quad (27)$$

Считая контакт грунта со стенкой шарнирным соединением, получаем второе условие в следующем виде:

$$\Delta z''(0) = 0. \quad (28)$$

Рис. 12. Деформации поверхности грунта в зависимости от удаления от стенки. 1 — жесткое сцепление со стенкой; 2 — скользящее сцепление со стенкой.

Кроме этих условий, следует наложить требование нежности функции $\Delta z(y)$. В этом случае решение задачи записывается следующим образом:

$$\Delta z(y) = \zeta_1^2 (1 - e^{-\zeta_1 y} \cos \delta y); \quad (29)$$

$$\zeta_1^2 = \varepsilon_0 \alpha \left(\frac{\Delta p w l}{\rho l} + c_h \left(\frac{\rho w}{\rho l} \right)^2 \frac{A_1^2}{\xi'} \right); \quad (30)$$

$$\delta = \left(4 \gamma_2^2 \varepsilon_0 \alpha c_h \left(\frac{\rho w}{\rho l} \right)^2 E J \right)^{-1/4}. \quad (31)$$

Кривая локального поднятия показана на рис. 12 (кривая 1).

С течением времени по мере нарастания глубины промерзания напряжения в зоне контакта грунта со стенкой, определяемые с помощью (26) при $y = 0$, монотонно растут и в определенный момент достигают значения предельно длительной прочности смерзания. Начиная с этого момента происходит скольжение грунта по стенке при постоянном напряжении в зоне контакта, поэтому вместо (27) следует положить

$$\Delta z''(0) = \text{const}. \quad (32)$$

Соответствующая кривая $\Delta z(y)$ показана на рис. 12 (кривая 2). В обоих случаях асимптотические значения поднятия $\Delta z(y)$ при $y \rightarrow \infty$ соответствуют отсутствию напряжения. Отметим

тим, что аналогичные рассуждения могут быть использованы для оценки введенных В. О. Орловым [12] величин нормальных сил пучения, действующих на подошву малозаглубленного фундамента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фельдман Г. М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. — Новосибирск: Наука, 1968.
2. Жесткова Т. Н., Шур Ю. Л. Промерзание грунтов в условиях открытой системы // Мерзлотные исследования. — 1980. Вып. XIX. — С. 164—177.
3. Vietmans M. B. G. M., Dijkema K. M., de Vries D. A. Water movement in porous media towards an ice front // J. Hydrol. — 1978. — V. 37. — P. 137—148.
4. Гречинцев С. Е. Межфазовое взаимодействие в поровой влаге и тереологическая модель мерзлых грунтов // Инженерная геология. — 1979. — № 4. — С. 72—85.
5. Дерягин В. В., Чураев Н. В. Течение незамерзающих прослоек воды и морозное разрушение пористых тел // Коллоидный журнал. — Т. XII, № 5. — С. 842—852.
6. Горелик Я. Б., Колунин В. С. О миграции влаги при промерзании пористых сред // Геокриологические исследования в арктических районах. — Ямбург, 1989. — Вып. IV. — С. 79—96.
7. Gilpin R. R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils // Water Resour. Res. — 1980. — V. 16, N 5. — P. 918—930.
8. O'Neill R., Miller R. D. Exploitation of a rigid ice model of frost heave // Water Resour. Res. — 1985. — V. 21, N 3. — P. 218—296.
9. Ozawa M., Kinoshita S. Segregated ice growth on a micro porous filter // J. of Colloid and Interface Science. — 1989. — V. 132, N 1. — P. 113—124.
10. Дерягин В. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. — М.: Наука, 1985.
11. Баренблатт Б. И. О некоторых приближенных методах в теории размерной фильтрации жидкости при упругом режиме // Изв. АН СССР. — 1954. — № 9. — С. 35—49.
12. Орлов В. О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.

УДК 551.345

Э. Д. Ершов, Ши Ше Цу, Ю. П. Лебедево,
Е. М. Чувакин, К. Ю. Кройков

МГУ

ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА И ДЕФОРМИРОВАНИЯ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ СОЛЕЙ

Проблема взаимодействия мерзлых пород с солевыми растворами привлекает внимание многих исследователей как у нас в стране, так и за рубежом [1, 6, 7, 9—12]. В практическом плане знание физико-химических, термомассообменных, механических и структурообразовательных процессов, развивающихся во взаимодействующих средах, необходимо для решения инженерных задач в области геокриологии, агрофизики, криобиологии и др. Применительно к геокриологии особенно важ-

нами являются вопросы взаимодействия криопатов с толщами мерзлых пород, влияния соленых вод на подстиляющие породы в шельфовых зонах северных морей. В научном плане эта проблема важна при рассмотрении сложного комплекса физико-химических процессов, возникающих при взаимодействии мерзлых пород с солевыми растворами, что вносит вклад в теорию формирования состава, строения и свойств мерзлых толщ.

В целом на сегодняшний день уже имеются некоторые физические модели развития физико-химических и массообменных процессов в мерзлых породах при взаимодействии их с водными растворами солей, выполнены методические исследования, со-

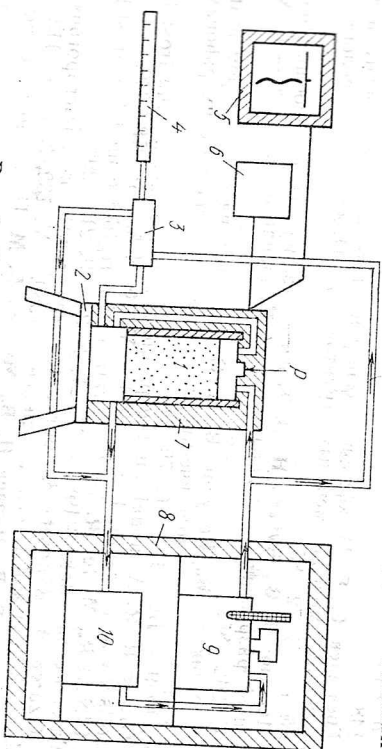


Рис. 1. Схема лабораторной установки.

зданы различные установки и способы проведения экспериментов. В [2, 4, 5] в основном рассматривались отдельные экспериментальные системы мерзлой породы — солевой раствор. Что касается данной работы, то она нацелена на изучение комплекса параметров, включающих массоперенос и деформацию вышеуказанной системы, на выявление их взаимосвязи с физико-химическими процессами, проходящими в системе пористая вода — раствор. Кроме того, в работе была сделана попытка экспериментально оценить тепловые эффекты, возникающие при взаимодействии мерзлой породы и раствора, что не делалось ранее.

Комплекс экспериментальных исследований выполнялся на модельном грунте, в качестве которого использовалась налитая глина. Измельченная до состояния порошка глина смешивалась с дистиллированной водой, а полученная текучедеформируемая масса уплотнялась в перфорированных кассетах под нагрузкой, достигающей 1,2 МПа. Данные образцы служили исходным материалом для опытов.

Все эксперименты проводились на специально собранной установке, включающей комплекс холодильного оборудования, различные устройства и приборы (рис. 1). Основу установки

составляет кассета (рис. 2), состоящая из пластикового цилиндра 7 высотой 12 см, диаметром 4 см, который с помощью защелок 2 крепится на основании 10. Сверху на цилиндре установлена поршень 6 для передачи давления на образец. Вся кассета покрывается изоляционным кожухом 8. В кассете имеются датчики измерения теплового потока 3, 4. Два датчика

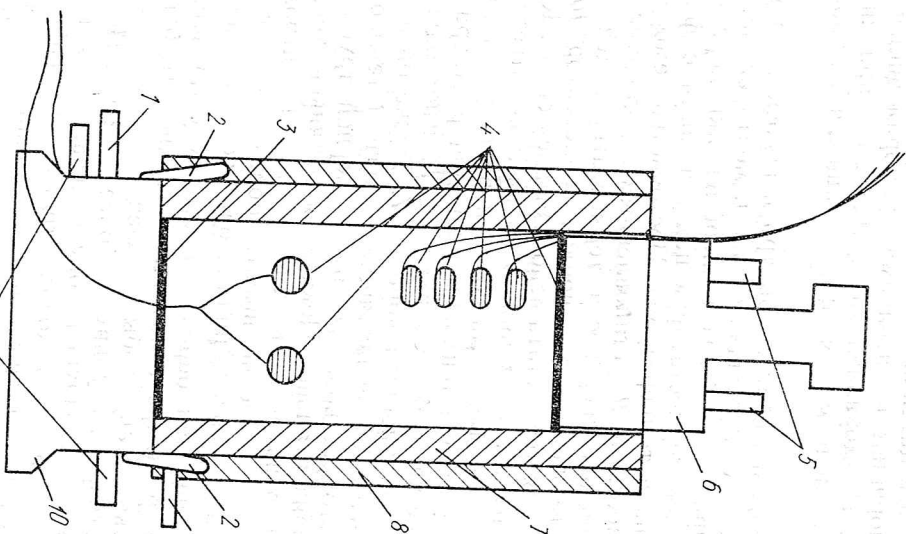


Рис. 2. Схема устройства экспериментальной кассеты.

вмонтированы в стенку цилиндра 7, один датчик расположен у поршня 6, один — перфорированный датчик 3 — на основании 10 и четыре датчика — непосредственно в испытуемом образце. С датчиками измерения теплового потока совмещены термопары, предназначенные для измерения температуры. На поршне

и основанин имеются штуцеры 5 для подвода термостатирующей жидкости. На основании расположен штуцер 1 для подачи солевого раствора.

Подготовка к эксперименту включала ряд операций.

В исходный уплотненный образец высотой 4—6 см, диаметром 4 см врезались датчики теплового потока, после чего образец вместе с поршнем и датчиками промораживался в специальной обойме. Промораживание происходило при низкой температуре под давлением для предотвращения шширообразования в образце.

После проморозки образец быстро переносился в установку (рис. 1). Кассета, содержащая образец, монтировалась на компрессионный прибор 2. Через теплообменники поршня и основания подавалась термостатирующая жидкость с фиксированной отрицательной температурой. Постоянство температуры достигалось термостатом 9, установленным в холодильном шкафу 8. Для уменьшения инертности термостатирующей системы в холодильнике также был установлен конденсатор 10. В качестве жидкости для термостата использовался спирт. Кроме того, из системы термостатирования было сделано ответвление, которое охлаждало подаваемый солевой раствор с помощью теплообменника 3; второй теплообменник для раствора монтирован в основание кассеты 1. Сверху кассета и подводящие трубки накрывались изоляционным коробом 7. Также были тщательно теплоизолированы все подводящие шланги и теплообменник 3. Расход солевого раствора измерялся мерной трубкой 4, установленной горизонтально. Показания датчиков теплового потока и термометр измерялись самописцем 5 и контролировались польтометром 6. Изменения высоты образца в процессе опыта фиксировалось с помощью индикатора часового типа.

Перед помещением образца в кассету устанавливался уровень солевого раствора с помощью отводной трубки и измерительной трубки 4 так, чтобы образец во время опыта был погружен в раствор на глубину не более 1—2 мм. После установления уровня на отводную трубку надевался зажим, чтобы предотвратить разтора происходило только из мерной трубки 4. Затем образец из камеры вместе с поршнем закладывался в кассету, но в контакт с раствором не приводился. Выкладывалась циркуляция термостатирующей жидкости, сверху надевался изоляционный короб. После установления постоянной температуры опыта проводился контакт образца с двунормальным раствором NaCl и фиксировалось начало эксперимента.

Таким образом, установка позволяла: с помощью термостата и холодильника изменять температуру опыта; с помощью компрессионного прибора — давление на образец; определить температуру, величину и направление тепловых потоков в различных точках по высоте образца, в основании и стенке кассеты.

а также в поршне; расход солевого раствора, приводимого в контакт с образцом; деформации образца в ходе опыта.

Кроме того, после опыта определялась плотность образца, посылно брались пробы на влажность и водную вытяжку (на содержание Na^+ и Cl^-), с образца также снималась реплика для изучения криогенного макро- и микростроения, определялась величина оттаившей зоны. По этой схеме был проведен комплекс экспериментов в различных термобарических условиях, в которых каолинистая глина приводилась в контакт с двунормальным раствором NaCl.

Результаты эксперимента показали, что процессы массопереноса подчиняются общим законам миграции влаги и солей в мерзлых породах. Исходя из существующих теоретических представлений, а также из результатов опытов, можно в следующем виде описать ход процесса.

До контакта имеются две системы — раствор и мерзлый грунт, в каждой из которых потенциалы влаги равновесны, но не равны между собой. То же самое следует сказать и о концентрациях. После соприкосновения грунта и раствора начинают взаимодействовать как единая система, в которой нарушено состояние равновесия. При этом возникает градиент потенциала влаги, вызывающий поток влаги в мерзлый грунт, который совпадает по направлению с потоком солей, т. е. имеет место так называемый обратный осмос. Кроме того, ионы соли, передвигаясь внутри грунта, захватывают с собой воду в солевых оболочках, что тоже является причиной влагопереноса. Со временем поток раствора в мерзлый грунт быстро уменьшается, и уже в первые 2—4 ч его величина сокращается в 2 раза (рис. 3). В дальнейшем скорость изменения потока падает, и при длительности проведения опыта в одни сутки за последние 6—8 ч величина потока практически не изменяется. Процесс миграции раствора в мерзлый образец вызывает оттаивание образца и формирование талой части образца. За счет опрессения мигрирующего раствора происходит час-

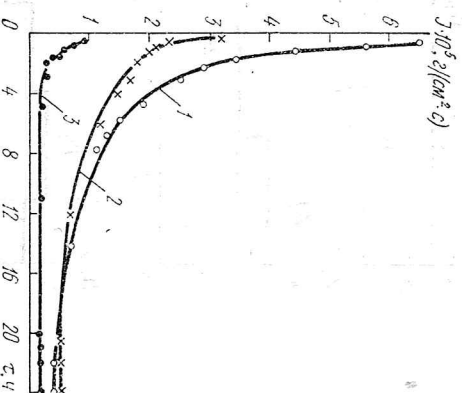


Рис. 3. Изменение плотности миграционного потока I в образце каолинистой глины ($P_{\text{гип}} = 1,2 \text{ МПа}$), взаимодействующем в мерзлом состоянии с солевым раствором NaCl ($C = 2\text{н}$, $\tau = 24 \text{ ч}$) при различных термобарических условиях
1 — $P = 0$, $t = -4,5^\circ\text{C}$; 2 — $P = 0$, $t = -6,1^\circ\text{C}$; 3 — $P = 0,4 \text{ МПа}$, $t = -4,5^\circ\text{C}$.

тичное вымерзание воды и наблюдается увеличение влажности льдистости в мерзлой зоне, непосредственно перед фронтом оттаивания. В нижней мерзлой части образцов, контактирующей с оттаившей засоленной частью, выявлены включения льда в виде горизонтальных линзовидных микрошпильков.

Компрессионное давление на испытуемый образец P подает процесс массопереноса в нем. В ряде работ, например

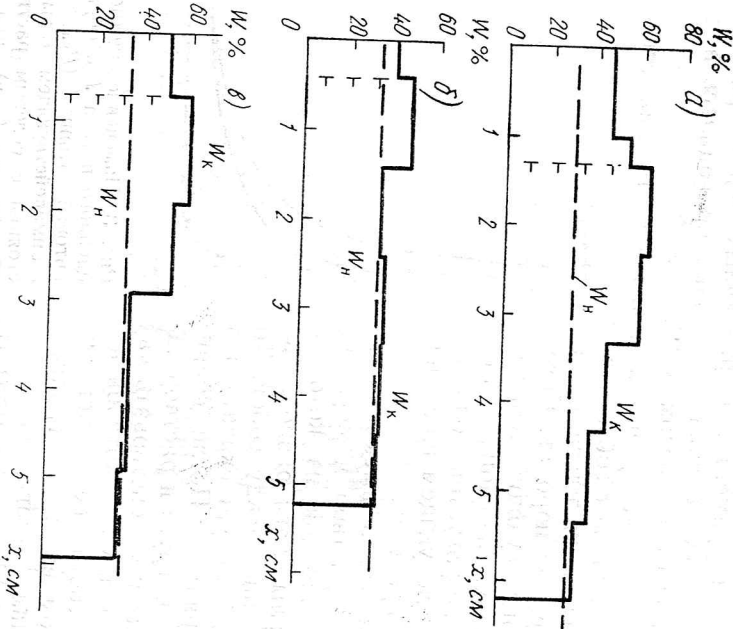


Рис. 4. Распределение весовой влажности W в образце каолиновой глины ($P_{\text{пл}} = 1,2$ МПа), взаимодействующем в мерзлом состоянии с солевым раствором NaCl ($C = 2\text{н}$, $\tau = 24$ ч) при различных термобарических условиях

$a-t = -4,9^\circ\text{C}$, $P = 0$; $б-t = -4,5^\circ\text{C}$, $P = 0,4$ МПа; $в-t = -6,1^\circ\text{C}$, $P = 0$.

[3, 8], указывалось, что миграция влаги прекращается при величинах давления примерно $0,7-0,8$ МПа. В наших опытах значение давления было вполнину меньше критического ($0,4$ МПа). Плотности миграционного потока в начальный момент времени в образце, находящемся под нагрузкой, на порядок меньше, чем в образце без нагрузки. В конце опыта, длившегося 24 ч, плотности потоков различаются лишь в 2 раза (см. рис. 3). Изучение микростроения этих образцов показало, что

в образце, взаимодействующем с солевым раствором под нагрузкой, наблюдаются лишь отдельные микрошпильки. Влияние температуры на влагоперенос в целом менее заметно, чем влияние давления. Так, понижение температуры от

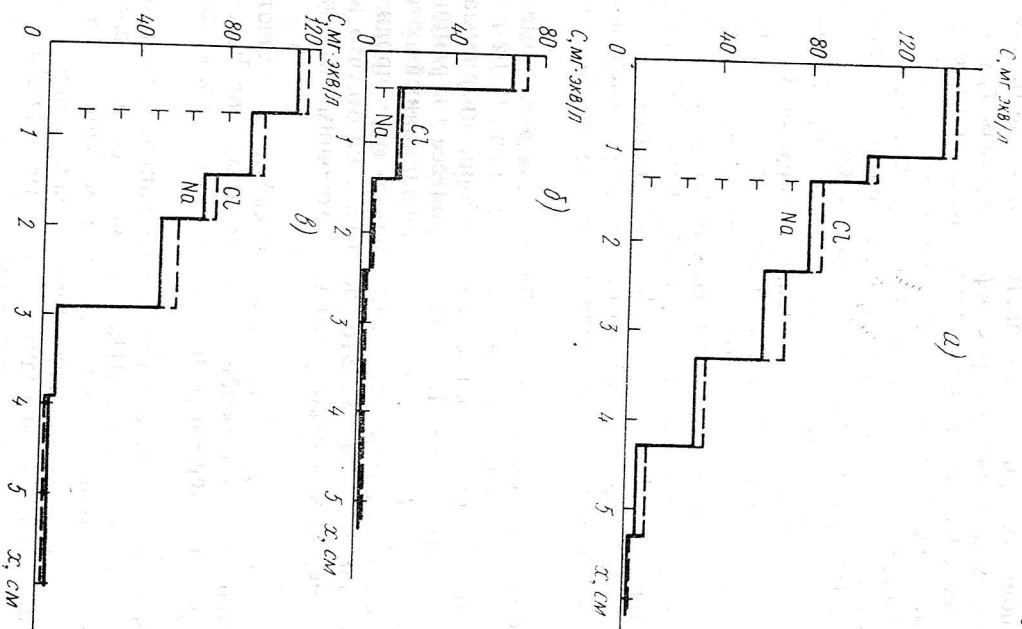


Рис. 5. Распределение ионов Na^+ и Cl^- в образце каолиновой глины ($P_{\text{пл}} = 1,2$ МПа), взаимодействующей в мерзлом состоянии с солевым раствором NaCl ($C = 2\text{н}$, $\tau = 24$ ч) при различных термобарических условиях

$a-t = -4,9^\circ\text{C}$, $P = 0$; $б-t = -4,5^\circ\text{C}$, $P = 0,4$ МПа; $в-t = -6,1^\circ\text{C}$, $P = 0$.

$-4,9$ до $-6,1^\circ\text{C}$ вызывает уменьшение миграционного потока в 2 раза. Однако скорость уменьшения плотности миграционного потока при более низкой температуре ($-6,1^\circ\text{C}$) меньше,

чем при температуре $-4,9^{\circ}\text{C}$. Поэтому общее влагонакопление в образцах, испытываемых при той и другой температуре, различается несильно (рис. 4).

Рассмотрим результаты исследования миграции ионов мерзлых породах при взаимодействии их с растворами солей. Миграция ионов в системе раствор — мерзлый грунт обусловливается несколькими механизмами. Это главным образом три механизма: конвективный, диффузионный и адсорбционный. Они были изучены довольно подробно ранее, в данной работе отметим лишь их соотношение применительно к условиям эксперимента. Так, расчетные данные показывают, что объемы солей, мигрирующих конвективным способом, более чем в 2 раза превышают объемы солей, мигрирующих адсорбционным и диффузионным способами. Это можно проследить и графиках распределения солей после эксперимента. В то же время в опыте с воздействием внешней нагрузки перенос солей осуществлялся в основном за счет адсорбционного и диффузионного механизмов. При этом следует учитывать, что в наших экспериментах конвективный поток не прерывался полностью, так как внешняя нагрузка была вполнину меньше «критической».

Величина соленаккопления в образце для эксперимента, проводимого при $-4,9^{\circ}\text{C}$ без давления, составила 0,162 г (рис. 5). В то же время общее количество раствора, мигрировавшего в трации раствора С не менялась, то миграционный поток концентратов был с собой солей 1,8 г. Однако по мере продвижения в прунт раствор опреснялся. Это указывает на то, что в данных условиях мерзлая порода обладает хорошими селективными свойствами.

Также можно отметить, что ионы Na^+ и Cl^- имеют разную миграционную способность в мерзлых породах. Во всех зонах образца содержание ионов хлора оказалось больше, чем ионов натрия.

Очень сильно сказывается на миграционном потоке солей давление. Нагрузка в 0,4 МПа уменьшает соленаккопление в отпавшей части образца в 2 раза, а в мерзлой части почти на порядок. В верхней половине образца, нагруженного до 0,4 МПа, разом, давление существенно влияет на переход солей через границу раздела фаз.

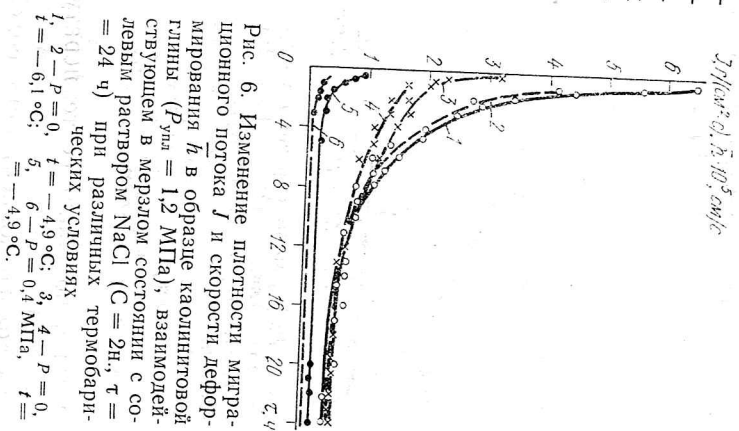
Изменение температуры от $-4,9$ до $-6,1^{\circ}\text{C}$ слабо сказывается на соленаккоплении. При этом в тающей части наблюдается небольшое уменьшение содержания солей, а непосредственно перед фронтом оттаивания в образце с более низкой температурой отмечается некоторое увеличение соленаккопления.

Поступление раствора в грунт вызывает в нем процессы деформирования, приводящие к изменению размеров образца.

В целом происходит пучение грунта, которое наблюдается даже при оказании давления на образец в 0,4 МПа. К процессам, вызывающим увеличение объема образца, относятся набухание за счет миграции влаги в образец, распучивание при вымерзании части раствора, хемогенное деформирование за счет взаимодействия ионов солей с грунтовыми частицами. К процессам, уменьшающим размеры грунта, следует отнести оттаивание в области контакта, а также возможное изменение структуры воды, вступающей во взаимодействие с ионами солей и минеральной подложкой. Кроме того, в грунте происходит физико-химические процессы коагуляции, агрегирования, диспергирования частиц в различных зонах взаимодействия с раствором, что также влияет на общий ход деформирования грунта. Но общий характер деформаций положительный, и самый главный вклад вносят процессы набухания и распучивания за счет миграции раствора в мерзлых образцах. На графике (рис. 6) приводится сопоставление плотности миграционного потока и скорости деформирования образца. Учитывая, что 1 г раствора имеет объем около 1 см³, можно проследить, что порядки величин, как показали эксперименты, совпадают. Подобными являются и формы кривых. При этом различия значений на кривых дают возможность оценить вклад других процессов, кроме миграционных, в общий характер деформирования.

Таким образом, развитие деформаций непосредственно связано с изменением плотности миграционного потока. Миграционный поток и деформации образца имеют максимальные значения в первые 4 ч, во время которых и тот и другой процесс разрабатываются. Следующие 6—8 ч деформирования образца происходит медленнее и скорость деформирования постепенно затухает. Последние 10—12 ч скорость деформации практически постоянна и мала по абсолютным значениям.

На деформацию образца сильнее всего влияет давление. Это понятно, так как давление тормозит основной процесс, вызывающий изменение размеров образца: проникновение раствора в



грунт. Пучение образца под давлением составило лишь 0,07 см, тогда как образец без давления увеличился на 0,9 см. При этом вклад в деформирование процессов, не связанных с миграцией влаги, по-видимому, больше в случае опыта с давлением. Этот вывод можно сделать, сравнивая графики скорости деформирования и плотности миграционного потока. В случае опыта без давления кривые этих графиков расположены ближе друг к другу.

Влияние температуры тоже сказывается на деформировании образцов. Так, понижение температуры от $-4,9$ до $-6,1^\circ\text{C}$ вызывает уменьшение деформации на 0,25 см (рис. 7).

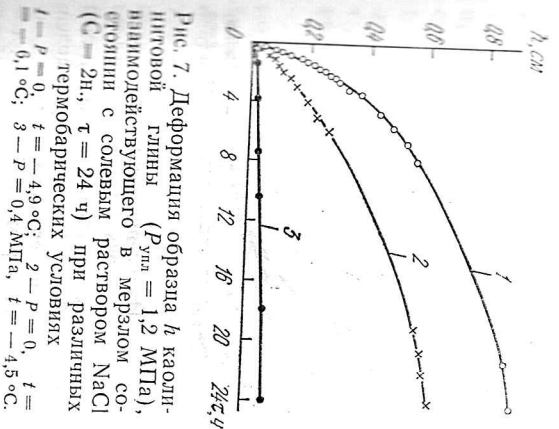


Рис. 7. Деформация образца h каолитинговой глины ($P_{\text{упр}} = 1,2$ МПа), взаимодействующего в мерзлом состоянии с солевым раствором NaCl ($C = 2\%$, $t = 24$ ч) при различных термобарических условиях: 1 — $P = 0$, $t = -4,9^\circ\text{C}$; 2 — $P = 0$, $t = -6,1^\circ\text{C}$; 3 — $P = 0,4$ МПа, $t = -4,5^\circ\text{C}$.

Темно, понижает ее температуру оттаивания. Температура образца и раствора в начальный момент опыта постоянная, но как только концентрация солей повышается, начинаются фазовые переходы, которые, в свою очередь, связаны с тепловыми эффектами. В случае оттаивания идет поглощение тепла. В мерзлой зоне образца вблизи фронта оттаивания происходит шпировывание, которое идет соответственно с выделением тепла. Таким образом, во взаимодействующей системе грунт — раствор возникают фазовые переходы, которые идут в двух областях: в зоне оттаивания и зоне шпировывания. Это вызывает сложную картину теплоточков в образце.

В нижней части исследуемого образца возникают тепловые потоки, направленные к фронту оттаивания. Они достигают значения $20-30$ Вт/м². Но уже через 4—5 ч тепловые потоки в зону оттаивания существенно уменьшаются (примерно в два раза).

В ходе экспериментов про-

водились измерения тепловых потоков, возникающих при взаимодействии мерзлых пород с солевыми растворами. До начала контакта с раствором в образце наблюдалось стационарное температурное поле, т. е. температура в грунте не менялась, а тепловые потоки были постоянны и близки к нулю. После сокращения температуры грунта и раствора, имеющих равные температуры, начались фазовые переходы, связанные с растворением льда в мерзлом образце. Зафиксировано, что входящий миграционный поток влаги и ионов повышает концентрацию солей в мерзлой породе, а следова-

В это время датчики, расположенные в мерзлой зоне над фронтом оттаивания, указывают на увеличение выноса тепла. Тепловые потоки здесь достигают 20 Вт/м². Если посмотреть на графики зависимости миграционного потока от времени, можно увидеть, что через 4—5 ч после начала опыта миграционный поток не заух. Наличие миграционного потока указывает на тепловые эффекты, связанные со шпировыванием, которые фиксировались по датчикам измерения теплового потока.

Таким образом, на созданной экспериментальной установке

проведены комплексные исследования взаимодействия мерзлых пород с солевыми растворами, в процессе которых оценивались и определялись целый ряд параметров и характеристик тепло-

массопереноса, структуро- и текстурообразования и деформирования взаимодействующих систем.

В результате экспериментов впервые получены данные, характеризующие тепловые потоки, возникающие при взаимодействии мерзлых пород с солевыми растворами. Выявлены взаимосвязи параметров и характеристик тепломассопереноса, структуро- и текстурообразования и деформирования засоленных мерзлых пород при различных термобарических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Н. П. Криопирохимические особенности мерзлой зоны. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд.-е, 1981.
2. Деформирование мерзлых пород при взаимодействии с водными растворами солей / Э. Д. Ершов, Ю. П. Лебедево, Е. М. Чувпильн и др. // Геокриологические исследования. — М.: Изд-во МГУ, 1989. — С. 202—210.
3. Экспериментальные исследования криогенного текстурообразования при энт- и сингенетическом способах промерзания пород / Э. Д. Ершов, Ю. П. Лебедево, В. Н. Кондаков и др. // Там же. — 1987. — С. 141—150.
4. Лебедево Ю. П. Криогенная миграция ионов и связанной влаги в льдонасыщенных дисперсных породах // Инженерная геология. — М.: Изд-во АН СССР, 1989. — Вып. 4. — С. 21—30.
5. Микроостроение мерзлых пород. — М.: Изд-во МГУ, 1988.
6. Мурман Р. П. Подвижность ионов в ММП // II Международная конференция по мерзлотоведению (СССР, Якутск, 16—28 июля 1973): Тезисы докладов. — М., 1973.
7. Нересова З. А. Влияние обменных катионов на миграцию влаги и пучение грунтов при промерзании // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — С. 22—52.
8. Радд Д. Ф., Орте Д. Х. Экспериментальные исследования влияния давления на механизм морозного пучения и роста — плавления льда в грунтах и ледниках // II Международная конференция по мерзлотоведению: Доклады и выступления. — Якутск, 1975. — Вып. 8. — С. 232—243.
9. Савельев В. А. Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых горных пород. — М.: Изд-во МГУ, 1971.
10. Тютюнов А. И. Миграция воды в торфо-глиевой почве и периоды замерзания и замерзшего ее состояния в условиях неглубокого залегания вечной мерзлоты. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
11. Chamberlain E. J. Frost heave of saline soils // Proc. 4-th Intern. Conference: Permafrost. — Washington, U. S. A. — 1983. — P. 121—126.
12. Qin Guoging et al. Direction of ion migration during cooling and freezing process // Proc. 5-th Intern. Conference: Permafrost. — Norway. — 1988. — V. 1. — P. 447—452.