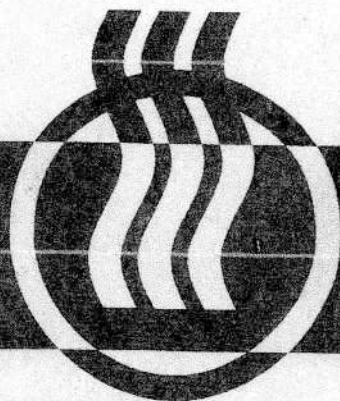


ТЕПЛОМАССООБМЕН  
ММФ-96

ТОМ VII



MIF-96  
HEAT/MASS TRANSFER

Академия наук Беларуси  
АНК "Институт тепло-  
и массообмена им. А. В. Лыкова"

ТЕПЛОМАССООБМЕН-  
ММФ-96

HEAT / MASS TRANSFER-  
MIF-96

III Минский международный форум  
(20-24 мая 1996 г.)

Том VII

ТЕПЛОМАССООБМЕН В КАПИЛЛЯРНО-  
ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

Минск 1996

Э.Д. Ершов, Е.М. Чувиллин, Н.С. Налетова, О.Г. Смирнов

ПОВЕДЕНИЕ ИОНОВ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОДАХ

Развитие процессов тепло-массо-переноса в промерзающих дисперсных породах, содержащих ионы различных химических элементов в естественных условиях (на стадии формирования пород), а также внесенных в результате техногенного воздействия, требует специального рассмотрения. Особую значимость эти исследования приобретают при оценке поведения высокотоксичных химических элементов (в том числе тяжелых металлов и радиоактивных элементов), попавших в дисперсные породы в результате аварий и нарушений режима работы различных производств. В этой связи знание механизма и закономерностей поведения ионов химических элементов в промерзающих дисперсных системах, полученное на основе экспериментальных исследований процессов тепло-массо-переноса, весьма важно. Оно может служить базой для разработки новых прогнозных математических моделей поведения ионов при промерзании дисперсных систем.

В данной работе рассматриваются результаты физического моделирования тепло- влаго- и ионопереноса в грунтах нарушенного сложения при одностороннем промерзании. Спытые были выполнены на влагонасыщенных образцах грунтов, в которых задавалось равномерное начальное распределение влаги и ионов солей /1/. Образцы грунтов подвергались одностороннему промерзанию в условиях "закрытой системы" при различных температурных граничных условиях первого рода. Было выполнено несколько серий экспериментов на грунтах различной дисперсности, минерального и химического состава.

Для проведения экспериментов была использована установка по одностороннему промерзанию /2/. Спытые проводились на образцах размером 4\*4\*12 см и 5\*5\*15 см, содержащих ионы различных солей ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 * 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ). Приготовленные образцы имели полное заполнение пор и равномерное распределение влажности и засоленности по объему образца /3/. Промораживающие

образцов проводилось в специальных кассетах. На их торцах поддерживалась постоянная в ходе опыта температура (-8; -12; -15; -17°C на верхнем и +8; +20°C на нижнем). В опытах проводилась постоянная регистрация изменений температурного поля в образце. Окончание эксперимента фиксировалось по остановке промерзания. Продолжительность экспериментов составляла в среднем 1-2 суток.

Помимо изучения процессов теплопереноса, методам исследований включала в себя рассмотрение массообменных и структурообразовательных процессов, протекающих в грунте при промерзании. Для этого после промерзания образец подвергался последовательному опробованию на изменения влажности и содержания солей и структурно-текстурные исследования.

В качестве модельных грунтовых систем были выбраны минеральные породы (каолин и кварцевый песок), характеристики которых приведены в работе /2/. Отдельные эксперименты были проведены с монтмориллонитом, а также с полиминеральными глинами и суглинком.

Проведенные нами экспериментальные исследования, а также анализ литературных данных показывают, что в результате развития тепло-массообменных процессов в промерзающей засоленной дисперсной системе ионы солей могут как отжиматься фронтом промерзания в немерзлую зону, так и накапливаться в мерзлой зоне, повышая ее засоленность. Можно выделить две грунтовые системы (грубодисперсную и тонкодисперсную), в которых протекание процессов тепло-массообмена существенным образом отличается, что связано с различным влиянием поверхности минеральных частиц на движение воды и ионов солей.

В грубодисперсной системе (гравий, пески, легкие суглики) при промерзании миграция влаги практически не происходит, в результате фазовых переходов образуется в основном лед-цемент. Растущие кристаллы льда при этом отжимают от фронта промерзания соли, которые, концентрируясь, могут создавать области переохлаждения перед фронтом кристаллизации и замедлять фазовые переходы. Этот случай хорошо освещен в работах /3-6/. Исследования показывают, что отжатие соли из промерзающей части увеличивается при уменьшении скорости промерзания. При больших скоростях промерзания массообмен не происходит, влага и соли фиксируются на

месте.

Значительно более сложные теплообменные процессы протекают в промерзающей тонкодисперсной системе, в которой поверхность минеральных частиц играет активную роль в движении воды и ионов солей. Перераспределение влаги и льдонакопление здесь происходят за счет градиентов потенциала влаги, формирующегося под действием  $\sigma_{\text{свд}} t$ . Возникающее при этом направленное движение молекул воды в промерзающую и мерзлую зону способствует захвату ионов солей, содержащихся в поровом растворе. Это приводит к увеличению не только влажности и льдистости мерзлой зоны породы, но и ее засоленности. При этом сама концентрация ионов в поровом растворе тесно связана с переносом влаги [1,7]. При небольших

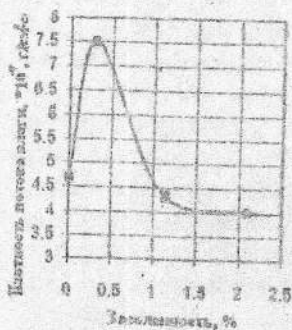


Рис. 1. Зависимость плотности миграционного потока влаги от засоленности

ионов соленпереноса, в сумме дающих максимальный солевой поток [1]. Другие механизмы переноса ионов (диффузионный и термодиффузионный) невелики по сравнению с адсорбционным и конвективным [1,7].

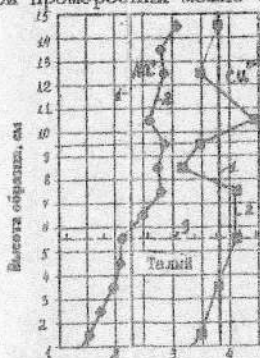
Интенсивность процессов массопереноса тесно связана с сорбционными характеристиками грунтовой системы и видом иона. Модельная каолинистая глина обладает наименьшей обменной способностью (3-15 мг-экв/100г), поскольку в каолините практически отсутствуют изоморфные замещения. У монтмориллонитовой же глины, обладающей наибольшей емкостью обмена (до 150 мг-экв/100г), ионы солей могут проникать в межслоевое пространство набухающей кристаллической структуры и тем самым не включаться в активные мас-

концентрациях ионного раствора в промерзающей засоленной породе наблюдалось увеличение плотности миграционного потока влаги по сравнению с незасоленной, а при дальнейшем увеличении содержания ионов солей — постепенное ее уменьшение (рис. 1). Для каждого промерзающего тонкодисперсного грунта существует оптимальная засоленность, при которой происходит наибольшее перераспределение ионов солей. Это соответствует оптимальному соотношению величин конвективного (миграционного) и адсорбционного механиз-

собоенные процессы при изменении термодинамического состояния грунтовой системы.

Экспериментальные данные показывают, что ионы легких металлов (в частности,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) при промерзании тонкодисперсных пород накапливаются в мерзлой зоне, причем максимальное их содержание отмечается в верхней, наиболее холодной, части образца (рис. 2), что соответствует области максимального влагонакопления и обусловлено преобладанием конвективного переноса ионов с потоком движущейся к фронту промерзания влаги. В тех случаях, когда интенсивный влагоперенос из немерзлой в промерзающую зону отсутствовал (например, при промерзании под нагрузкой 1,0 МПа), солеперенос также не был отмечен.

Исследования, проведенные с ионами тяжелых металлов, показывают, что их поведение в промерзающей грунтовой системе определяется в основном адсорбционными свойствами грунта в отношении конкретного иона и в меньшей степени процессами тепло- и влагопереноса, проходящими в промерзающем грунте. Среди исследованных ионов ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Sr}$ ) тенденция перемещения вместе с потоками влаги при промерзании можно отметить лишь в опытах с солью  $\text{Sr}$ . Пере-



Содержание ионов, мг/100г

Рис. 2. Распределение ионов в промерзающей г. пве. 1-до, 2-после оттаива, 3-фронт промерзания

распределения ионов  $\text{Cu}$  и  $\text{Zn}$  в результате промерзания не фиксируется (рис. 2). Подобное поведение ионов ( $\text{Cu}$  и  $\text{Zn}$ ) можно объяснить их большей сорбируемостью породой по сравнению со  $\text{Sr}$  /9/. По-видимому, при внесении в грунт ионов в количестве, меньшем, чем сорбционная емкость грунта, происходит активное связывание их поверхностью глинистых частиц, что резко снижает возможное воздействие криогенных факторов на их миграционные свойства.

Также следует отметить, что миграция солей к фронту промерзания в тонкодисперсном грунте приводит к расширению зоны фазовых переходов в связи с понижением температуры начала замерзания при повышении концентрации порового раствора. Это в свою очередь вызывает уменьшение скорости движения фронта и сокращение мощности мерзлой зоны. Расчеты показали, что изменение

теплофизических характеристик при засолении грунта (таких, например, как теплопроводность мерзлой и незамерзшей зоны) в меньшей степени влияет на уменьшение мощности слоя промерзания и скорости движения границы раздела фаз, чем понижение температуры начала замерзания за счет увеличения засоленности при массообменных процессах.

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что направление, скорость, интенсивность миграции ионов химических элементов существенно зависят от условий промерзания, вида ионов и их концентрации в поровом растворе, особенностей взаимодействия ионов с поверхностью грунтовых частиц. Бываюто, что высокие значения емкости обмена грунтовой системы, большие скорости промерзания, действие внешней нагрузки приводят к снижению перераспределения ионов в промерзающих грунтовых системах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ериов Э.Д., Лебедеико Ю.П., Чувилин Е.М., Наумова Н.С. Экспериментальные исследования процессов массопереноса в промерзающих засоленных породах//Иж.геол. - 1992. - М4. - С.27-35.
2. Ершов Э.Д. Влагодперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. - М.: Изд-во МГУ, 1979. - 213 с.
3. Анисимова Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. - Новосибирск: Наука, 1981. - 152 с.
4. Hallet B. Solute redistribution in freezing ground// Proc. 3-d Int. conf. Permafrost. - Ottawa. - 1978. - V.1. - P.86-91.
5. Chamberlain E.J. Frost heave of saline soils// Proc. 4-th Intern. conf. Permafrost. - Washington D.C. - 1983. - P.121-126.
6. Dju B., Sheng W. Direction of ion migration during cooling and freezing processes// Proc. 5-th Intern. conf. Permafrost. - Trondheim, Norway. - 1988. - V.1. - P.442-447.
7. Ershov E.D., Lebedenko Yu.P., Chuvilin E.M., Naumova N.S. Mass transfer in freezing saline soils//1-st Intern. conf. Cryopedology. - Pushchino. - 1992. - P.115-122.
8. Титянова Ф.И. Физико-химические процессы в подземных водах. - М.: Наука, 1976.