

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.328/340/345; 624.131; 624.139

DOI: 10.15372/KZ20210501

АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ КРИОГЕННОЙ МИГРАЦИИ ВОДЫ
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХВ.Г. Чеверев¹, А.В. Брушков¹, С.А. Половков², Е.А. Покровская², Е.В. Сафронов¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геоэкологии, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; cheverev44@mail.ru, brouchkov@geol.msu.ru, evgenii567@yandex.ru²Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО "НИИ Транснефть"), Центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, 117186, Москва, Севастопольский пр., 47а, Россия; PolovkovSA@niitnn.transneft.ru, PokrovskayaEA@niitnn.transneft.ru

Ретроспективный анализ результатов исследований механизма криогенной миграции воды в промерзающих грунтах выполнен на основе изучения опубликованных работ около 160 российских и 100 иностранных авторов: это статьи, монографии, диссертации, патенты, труды конференций, научные отчеты. Основные из них и наиболее актуальные по теме статьи приведены в списке литературы. Особое внимание уделено ключевым аспектам формирования представлений о движущих силах криогенной миграции (влагопереноса) в промерзающих грунтах. Этот анализ необходим для правильной физической постановки математической модели процесса морозного пучения промерзающих грунтов, которая будет представлена в последующих работах авторов.

Ключевые слова: аналитический обзор, механизм криогенной миграции, морозное пучение грунтов.

ANALYSIS OF CONCEPTS ON THE MECHANISM OF CRYOGENIC WATER MIGRATION
IN FREEZING SOILSV.G. Cheverev¹, A.V. Brushkov¹, S.A. Polovkov², E.A. Pokrovskaya², E.V. Safronov¹¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; cheverev44@mail.ru²Scientific Research Institute of Pipeline Transport (Transneft Research Institute, LLC), Center for Monitoring and Geoinformation Systems of Pipeline Transport Facilities, Sevastopolsky pr. 47a, Moscow, 117186, Russia; PolovkovSA@niitnn.transneft.ru, PokrovskayaEA@niitnn.transneft.ru

A retrospective analysis of the results of studies of the mechanism of water migration in freezing soils was carried out on the basis of an analysis of about 160 scientific publications by Russian and 100 foreign authors. For the analysis, articles, monographs, dissertations, patents, conference proceedings and scientific reports were used. The main ones are given in the list of references. Special attention is paid to the key aspects of the formation of understanding of the driving forces of cryogenic migration (moisture transfer) in freezing soils. This analysis is necessary for the correct physical formulation of the mathematical model of the process of frost heaving of freezing soils.

Key words: analytical review, mechanism of cryogenic migration, frost heaving of soils.

ВВЕДЕНИЕ

Морозное пучение грунтов широко распространено в области сезонного и многолетнего промерзания на территории холодных регионов Земли и является опасным геоэкологическим процессом для зданий и сооружений. По этой причине исследование физической природы пучения и разработка математических моделей, адекватных физической сущности процесса, методов его прогноза и управления является актуальной научной и практической проблемой.

В общем виде механизм морозного пучения грунтов представляет собой сложное взаимодействие и взаимозависимость теплопереноса, массо-

переноса, фазовых переходов воды в порах грунта, сегрегации льда и динамики его напряженно-деформационного состояния. Теплоперенос как первопричина обеспечивает отвод из замерзающего грунта теплоты фазовых переходов, емкостного и конвективного тепла. Замораживая грунт, он инициирует массоперенос и сегрегационное льдовыделение в пучинистых грунтах.

Динамика напряженно-деформационного состояния промерзающего грунта зависит от трех факторов. Во-первых, от расширения воды в порах мерзлой зоны грунта при переходе ее в лед на месте с появлением в стесненных условиях значи-

тельных сил кристаллизации при малых деформациях пучения. Во-вторых, от значительного притока воды из талого в промерзающий слой грунта путем криогенной миграции, при замерзании это дает основной вклад в пучение грунта. В-третьих, отток воды из талой в промерзающую зону понижает поровое давление в ней, вызывая усадку, что снижает общую деформацию морозного пучения грунта.

Теплоперенос и криогенная миграция, в свою очередь, сопровождаются сегрегационным льдовыделением в виде особого слоистого криогенного строения, что приводит к анизотропии строительных свойств мерзлых грунтов и существенным осадкам при их оттаивании.

Анализ состояния исследования указанных процессов имеет прямое отношение к физической постановке задачи математического прогноза промерзания и пучения грунтов с учетом процессов тепло- и массообмена, сегрегации льда, деформаций и сил пучения грунтов. Итогом теоретических и экспериментальных результатов, полученных специалистами МГУ им. М.В. Ломоносова и НИИ Транснефть по проблеме морозного пучения грунтов, является тестовая численная математическая модель. Эти результаты распределены на ряд статей. В настоящей статье кратко излагаются лишь первостепенно важные для разработки математической модели представления о механизме криогенной миграции и морозного пучения грунтов.

ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ КРИОГЕННОЙ МИГРАЦИИ

Развитию представлений о природе миграционных процессов в промерзающих дисперсных грунтах и их морозном пучении посвящено весьма значительное количество работ, их уже несколько сотен. В последние 10–20 лет появился еще ряд статей, но они носят в основном прикладной характер. Анализ опубликованных работ имеется в ряде обзорных статей, глав диссертаций и монографий [Сумгин, 1929; Гольдштейн, 1948; Баженова, Бакулин, 1957; Орлов, 1962; Цытович, 1973;

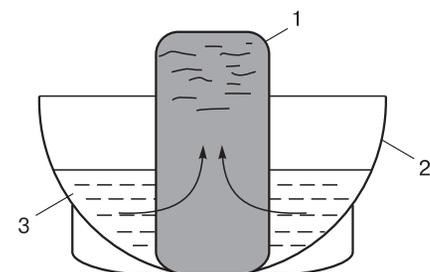


Рис. 1. Схема опыта промораживания образца грунта на морозе [Цвигунов, 2018].

1 – образец грунта; 2 – чаша; 3 – вода.

Бровка, 1991; Чеведев, 2003а, 2004; Beskow, 1935; Edlefsen, Anderson, 1943; Black, 1995; Cheverev et al., 1998].

Тем не менее в связи с появлением новых теоретических и экспериментальных результатов, в том числе у авторов статьи, становятся актуальными и новые обобщения. Это позволяет надеяться на существенное развитие имеющихся представлений о процессе пучения и решение проблемы создания адекватной в плане физической постановки математической модели процесса промерзания тонкодисперсных грунтов с учетом тепло- и массообмена, пучения, усадки и сегрегации льда.

Еще в конце XIX в. необходимость выяснения причины морозного пучения грунтов и на этой основе разработки средств защиты инженерных сооружений от этого опасного процесса остро возникла в связи со строительством дорог в районах Сибири и Дальнего Востока России. Исследователями отмечалось существенное увеличение влажности (льдистости) промерзающего грунта и его вспучивания. Так, Г.Я. Близнин в своей работе привел данные об увеличении влажности в верхних горизонтах почвогрунта в зимнее время. Он предположил возможность переноса поровой воды в промерзающих грунтах *под действием градиента температуры*, что было логично исходя из общих соображений [Близнин, 1890].

В работах наших предшественников для объяснения формирования движущих сил криогенной миграции воды и морозного пучения грунтов предложено несколько основных теорий (гипотез), которые будут рассмотрены ниже: *капиллярных (менисковых) сил, напорного давления, компрессионного уплотнения, кристаллизации воды, сил поверхностной адсорбции, вакуума, потенциала двойного электрического слоя (осмоса), градиента термодинамического потенциала*.

Капиллярные силы. К первым исследованиям физической сущности процесса морозного пучения грунтов следует отнести работы российских инженеров-путейцев В.И. Штукенберга [1894] и С.Г. Войслава [Цвигунов, 2018]. Они заложили основные теоретические предпосылки для изучения физической сущности процессов пучения и миграции влаги в промерзающих грунтах.

На рис. 1 представлена схема простого опыта С.Г. Войслава, из которого следует, что образец талого грунта, поставленный на мороз в чаше с водой, замерзал с увеличением в объеме и формированием ледяных прослоев. При этом количество воды в чаше пропорционально уменьшалось. В результате эксперимента автор пришел к выводу, что деформации морозного пучения грунтов обусловлены впитыванием воды из талого в промерзающий слой грунта и образованием в нем из этой воды прослоев льда.

В.И. Штукенберг выдвинул физическое объяснение причин пучения грунта в земляной насыпи железнодорожного полотна влиянием *миграции влаги в жидкой фазе из нижних в верхние промерзающие слои* земляной насыпи. Он также предложил приближенное математическое описание процесса пучения грунта. *Капиллярная гипотеза* В.И. Штукенберга [1894] является одной из первых гипотез миграции воды при промерзании и пучении грунтов.

В 1929 и 1930 гг. С. Тебер провел серию лабораторных опытов по промораживанию образцов каолининовой глины и получил результаты, ставшие классическими. На эти экспериментальные работы большинство авторов ссылаются вплоть до настоящего времени. На рис. 2 в качестве наглядного примера показан итог формирования криогенной текстуры в промерзающем образце каолининовой глины с подтоком воды извне, со стороны теплого торца образца. Как видно на рис. 2, со стороны холодного торца сначала образовалась мелкошлировая горизонтально-волнистая криогенная текстура, которая постепенно, под влиянием снижения скорости промерзания, становилась крупношлировой и более редкой. С. Тебер также предложил вероятный механизм роста шлиров льда в промерзающем грунте *на основе капиллярного всасывания* [Taber, 1930].

Капиллярная гипотеза в дальнейшем не была подтверждена. Факты возникновения капиллярных менисков при кристаллизации воды в грунте в дальнейшем не были получены. Грунты при полном водонасыщении лишены менисков вследствие отсутствия фазовой границы вода–воздух. При этом известно, что полностью водонасыщенные грунты наиболее пучинистые. Кроме того, определение “капиллярный механизм морозного пучения”, как будет показано ниже, игнорирует неоспоримые поверхностные и осмотические силы, участвующие в формировании пучения.

В то же время это не означает, что капилляры в грунте не играют существенной роли в морозном пучении. Напротив, они являются средой, в которой происходит транзит порового раствора из талой в промерзающую зону грунта под действием градиента порового давления, инициированного градиентом отрицательной температуры промерзающей зоны [Beskow, 1935].

Напорные силы. Предположение о влагопереносе под действием “напорных сил”, возникающих за счет увеличения удельного объема воды при ее переходе в лед, развивалось в работах [Никифоров, 1912; Драницын, 1914; Сумгин, 1929]. Согласно теории напорной миграции, влагоперенос в порах промерзающей породы происходит под действием напора, возникающего при замерзании воды, нисходящей по слабопроницаемому горизонту, или при промерзании слоя, замкнутого

между подстилающей мерзлой толщей и слоем зимнего промерзания. Дальнейшие исследования показали, что теория напорных сил хорошо объясняет формирование инъекционного типа бугров пучения и поэтому является частным случаем несегрегационного распучивания.

Компрессионное уплотнение. В.О. Орлов [1962] предполагал наличие процесса компрессионного уплотнения талого слоя промерзающего грунта за счет давления от веса вышележащего мерзлого слоя, считая это причиной перетекания поровой воды из талого в промерзающий слой. Однако такая гипотеза не подтверждается опытными данными. Талый слой уплотняется от отрицательного порового давления, возникающего при оттоке воды в промерзающий слой.

Давление мерзлого слоя или нагрузка от сооружения на талый слой промерзающего грунта при определенных условиях влияет на его морозное пучение, но это фактор второго уровня, и он не является первопричиной криогенной миграции и пучения. Наоборот, существенная внешняя нагрузка в условиях открытой по массообмену системы, как правило, затрудняет проникновение криогенной миграции в промерзающий слой и при критическом давлении ее полностью останавливает

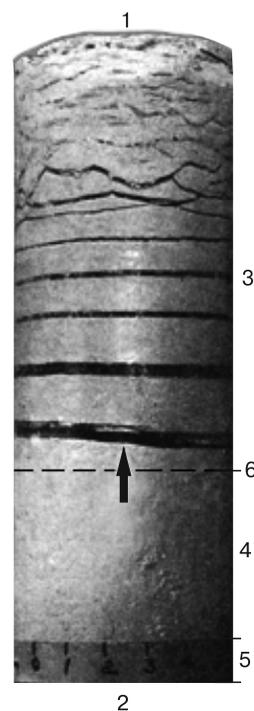


Рис. 2. Фотография промерзающего образца каолининовой глины.

1 – холодный торец; 2 – теплый торец; 3 – мерзлый слой; 4 – талый слой; 5 – слой водонасыщенного песка; 6 – фронт промерзания; *стрелка* – направление криогенной миграции [Taber, 1930].

ет. Без нагрузки на промерзающий грунт в его талой зоне за счет оттока порового раствора в промерзающую зону образуется отрицательное поровое давление ($-P_w$). Давление измеряется по относительной шкале, где атмосферное давление принимается за нуль, а компрессионное давление – за положительное ($+P_w$).

Образование сегрегационных прослоев льда, в общем, не связано с напорными силами порового раствора. Но может иметь место особый случай, когда талый слой при неконсолидированном уплотнении испытывает внешнюю нагрузку. В результате отрицательное поровое давление уменьшается в сторону нейтрального и даже может перейти в положительное, тем самым подгоняя криогенную миграцию и усиливая пучение промерзающего грунта. Такой факт впервые установлен экспериментально и опубликован в работе [Чеве́рев и др., 2013].

Силы кристаллизации воды. Наряду с капиллярной теорией С. Тебер предложил *теорию криогенной миграции за счет сил кристаллизации льда*, которая, так же как и капиллярная гипотеза, оказалась несостоятельной. Под силами кристаллизации он понимал способность кристаллов льда подтягивать к себе воду из нижележащих горизонтов. С. Тебер писал: “Растущий кристалл льда обволакивается тонкой пленкой воды, похожей на адсорбированную воду, образующуюся на многих других твердых телах, входящих в соприкосновение с водой. Когда молекула в пленке перемещается в направлении кристалла льда и присоединяется к нему, ее заменяет другая молекула воды, вследствие чего сохраняется целостность пленки” [Taber, 1930].

Правомерность теории сил кристаллизации льда в ходе дальнейших исследований не подтвердилась. Эксперименты, поставленные авторами работы [Баженова, Бакулин, 1957], показали, что гидрофобизация минерального компонента грунта, устраняющая менисковые силы, прекращает его пучение за счет криогенной миграции: фазовый переход воды в порах грунта в лед происходит, но вода замерзает на месте. При этом обратный процесс – отжатие воды от фронта промерзания – возможен и реализуется при благоприятном сочетании скорости промерзания и сопротивления потоку порового раствора от фронта промерзания в талую зону.

Силы поверхностной адсорбции. Под влиянием работ С. Тебера Дж. Бесков выдвинул *теорию адсорбционных сил минерального компонента грунта* [Beskow, 1935]. В ней впервые высказана мысль о том, что пленочная миграция к фронту промерзания связана с замерзанием внешней части водных пленок, адсорбированных минеральными частицами и агрегатами грунта. По воздействию на пленочную воду процесс кристаллиза-

ции этой части воды Дж. Бесков считал аналогичным процессу испарения.

Здесь уместно напомнить результаты исследования влагопереноса в немерзлых почвах и грунтах из работы [Лебедев, 1919].

Убыль молекул воды в пленке вследствие ее постепенной кристаллизации способствует соответствующему освобождению части поверхностной энергии минерального компонента грунта, что обуславливает и поддерживает миграцию влаги к фронту промерзания. При этом А.Ф. Лебедев справедливо считал, что капиллярная вода в талой зоне является источником убыли пленочной воды в мерзлой зоне, а сами капилляры – это пути миграции.

Теория адсорбционных сил минерального компонента грунта была правильным направлением в развитии представлений о механизме криогенной миграции и пучения грунтов, но не ее завершением. Например, она еще не объясняла, почему песчаные грунты не такие пучинистые, как глинистые и пылеватые, хотя их влагопроводность на порядки выше; также не рассматривалась роль двойного электрического слоя на минеральных частицах в этом процессе.

Таким образом, эта теория нуждалась в дальнейшем развитии в плане учета физико-химической природы адсорбции воды и ионов на твердой минеральной поверхности.

Вакуум. В.Е. Борозинец и Г.М. Фельдман предложили вакуумно-фильтрационный механизм образования мощных шлиров льда. Они считают, что рост мощных шлиров льда возникает при периодическом колебании температуры на поверхности земли, которое инициирует возвратно-поступательное движение фронта промерзания в массиве грунта на определенной глубине. В цикле промерзания льдообразование распучивает грунт, а в цикле оттаивания внутренний объем грунта уменьшается. В результате оттаивания образуются локальные объемы с низким давлением, в которые устремляется вода из нижней зоны грунта. Далее этот дополнительный объем воды замерзает, увеличивая толщину слоя льда, и так растет мощный слой льда [Борозинец, Фельдман, 1981]. По сути, авторы предложили механизм образования движущей силы криогенной миграции при циклическом промерзании–оттаивании на локальном уровне за счет колебаний внутривпорового гидравлического давления.

Существование такого механизма при колебании температуры на поверхности грунта вызывает сомнение, так как возвратно-поступательный процесс, который рассматривают авторы, обратимый (оттаивание сменяется замерзанием), и понижение давления при оттаивании сменяется его повышением при замерзании, поэтому приток сменяется оттоком в том же объеме при прочих равных условиях.

Однако факт формирования повышенной льдистости и толстых шпиров льда установлен в кровле многолетнемерзлых грунтов, и для него есть иное объяснение. Экспериментально установлено, что в ходе постепенного оттаивания мерзлого грунта в его мерзлом слое сохраняются условия для сегрегации льда. Накопленный лед при последующем промерзании консервируется, и его рост возобновляется в следующем цикле оттаивания–замерзания [Ершов и др., 1976].

Потенциал двойного электрического слоя на поверхности минеральных частиц (осмос). Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что ведущую роль в механизме криогенной миграции и пучения промерзающих грунтов играет двойной электрический слой (ДЭС) ионов в водной среде на поверхности минеральных глинистых частиц, а также существование в нем диффузного слоя ионов.

М.Н. Гольдштейн, Л. Касс и Р. Миллер предложили оценить роль в криогенной миграции осмотических свойств ДЭС на поверхности минеральных частиц [Гольдштейн, 1948; Cass, Miller, 1959].

Теория ДЭС разрабатывалась еще с середины XIX в. безотносительно к морозному пучению грунтов. Она позволила объяснить такие интересные физико-химические эффекты и явления, как электроосмос, электрофорез, прямой и обратный осмос, свойства коллоидных систем и др. [Шукин и др., 2004].

Эта теория основана на представлениях немецкого физика Отто Штерна (1924 г.). В ней он объединил теории Гельмгольца–Перрена (1878 г.) и Гуи–Чепмена (1910 г.) (рис. 3). Согласно этим представлениям, на границе соприкасающихся фаз на твердой гидрофильной поверхности расположены атомы кристаллической решетки, имеющие нескомпенсированные заряды, так называемый слой потенциалопределяющих ионов (ПОИ), и электростатически прилегающий к нему слой противоионов (ПИ) из водного раствора. Слой противоионов состоит из двух частей. Одна часть примыкает непосредственно к межфазной поверхности и образует адсорбционный слой (слой Гельмгольца) толщиной, равной диаметру гидратированных ионов, его составляющих. Другая часть ПИ ДЭС находится на некотором расстоянии и называется диффузным слоем противоионов (слой Гуи). С увеличением расстояния притяжение противоионов к слою ПОИ убывает, концентрация противоионов постепенно уменьшается от максимального значения до средней концентрации в нейтральном растворе. При этом соотношение противоионов, находящихся в непосредственной близости к ПОИ, к ионам диффузного слоя составляет в среднем 95 и 5 % от общего количества соответственно.

В пределах ДЭС действует электрическое поле, интенсивность которого характеризуется определенным значением потенциала. На рис. 3 приведено изменение потенциала в ДЭС при увеличении расстояния от поверхности следующих видов.

– Термодинамический потенциал поверхности φ_0 – это полный скачок потенциала между минеральной поверхностью и какой-либо точкой в глубине раствора, где влияние поверхности не сказывается.

– Потенциал диффузного слоя (φ_d) – потенциал, возникающий на границе между адсорбционным и диффузным слоями. В адсорбционном слое ДЭС потенциал снижается линейно.

– Электрокинетический потенциал на поверхности скольжения, или ζ -потенциал. Этот потенциал возникает под действием внешних сил на поверхности скольжения. Он максимален у внешней границы адсорбционного слоя и экспоненциально снижается по мере удаления вглубь диффузного слоя.

Есть основание считать, что ζ -потенциал определяет максимальную величину потенциала криогенной миграции, поэтому рассмотрим его свойства подробнее.

На величину ζ -потенциала влияет толщина диффузного слоя. Чем она меньше, тем ниже ζ -потенциал, вплоть до нулевого значения (криогенная миграция прекращается). В свою очередь на толщину диффузного слоя влияют различные факторы. Так, с изменением концентрации внешнего раствора, который не входит в ДЭС, нарушается его равновесие с диффузным слоем, поскольку они конкурируют за связь с молекулами воды. В случае предельного сжатия диффузный слой

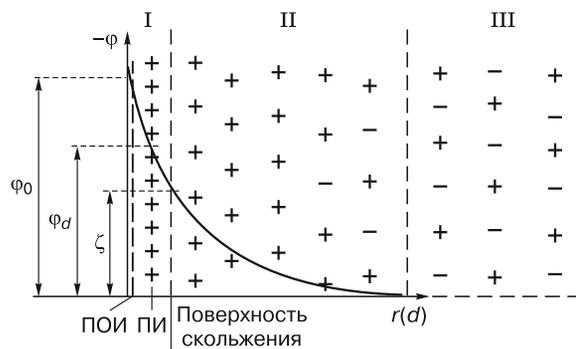


Рис. 3. Двойной электрический слой (по Штерну) и изменение в нем потенциала (φ):

I – адсорбционный слой; II – диффузный слой; III – объемный раствор; ПОИ – слой потенциалопределяющих ионов минеральной поверхности; ПИ – слой противоионов; φ_0 – термодинамический адсорбционный потенциал; φ_d – диффузионный потенциал; ζ – электрокинетический потенциал диффузного слоя ионов на поверхности скольжения; $r(d)$ – радиус (толщина).

вырождается и его ионы переходят в адсорбционный слой. Следовательно, эффект сжатия диффузного слоя при повышении засоленности грунта приводит к прекращению криогенной миграции и пучения. На рис. 4 приведена зависимость потока криогенной миграции от концентрации порового раствора промерзающей пылеватой глины. При ее повышении до 1 N (N – нормальность раствора, обозначает число грамм-эквивалентов данного вещества в одном литре раствора или число миллиграмм-эквивалентов в одном миллилитре раствора) криогенная миграция останавливается, что указывает на предельное сжатие диффузного слоя ионов.

Однако при концентрации раствора 0.01 N миграционный поток максимален, так как максимален ζ -потенциал диффузного слоя ионов при оптимальном их содержании. В то же время в ультрапресной глине (нормальная концентрация C примерно равна 0 N) миграционный поток составляет лишь половину от максимального, что объясняется существенным снижением толщины и ζ -потенциала диффузного слоя из-за его размывания в ультрапресном состоянии. При этом некоторое количество обменных ионов в диффузном слое всегда имеется, поскольку вода – очень хороший растворитель.

Следует учесть, что ζ -потенциал диффузного слоя ионов не постоянная величина и зависит от радиуса, валентности и заряда ионов, а также химической природы поверхности твердой фазы, температуры, состава и концентрации ионов конкурирующего объемного раствора.

Ведущую роль ДЭС в формировании морозного пучения грунта можно определить как существование полупроницаемого слоя грунта, который при промерзании инициирует поток криогенной миграции из теплой зоны в холодную, где вода

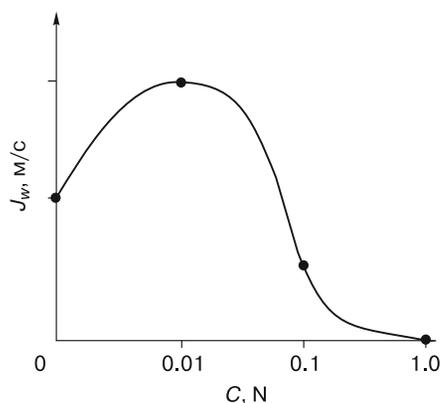


Рис. 4. Характер влияния нормальной концентрации (C) порового раствора натрия хлорида промерзающей пылеватой глины на скорость потока криогенной миграции влаги (J_w) [Чеве́рев, 2004, с. 138].

замерзает в пластично-мерзлой зоне промерзающего грунта как термодинамически избыточная, вызывая деформации и силы пучения. Здесь, очевидно, наблюдается аналогия с методом измерения осмотического давления с полупроницаемой мембраной.

Ионно-молекулярная теория двойного электрического слоя, разработанная в области физической химии, может быть использована для прогноза и управления морозным пучением промерзающих грунтов на качественном уровне. Объектом для этого является ζ -потенциал диффузного слоя ионов. Так как диффузный слой ионов аккумулирует основной объем связанной воды (до 95 % ДЭС), то управлять морозным пучением можно воздействуя на его ζ -потенциал (см. рис. 3). Например, изменение химического состава и концентрации порового раствора изменяет ζ -потенциал и толщину диффузного слоя ионов. Это, в свою очередь, влияет на интенсивность криогенной миграции и морозное пучение промерзающего грунта.

В силу сложности глинистого грунта (полиминеральность, полидисперсность, гетеропористость, многофазность) количественный прогноз морозного пучения на основе теории ДЭС пока не представляется возможным.

В то же время феноменологическая модель, сформулированная на макроскопическом уровне, может быть успешно построена для чувствительных к морозам грунтов и позволит дать достоверный количественный прогноз. Поэтому основные усилия при разработке численного моделирования прогноза промерзания и пучения грунтов в настоящее время направлены на использование основ термодинамики необратимых процессов и феноменологических законов.

Термодинамический потенциал воды в грунте. Известно, что вода в грунте подчиняется общей тенденции и течет от мест с большей потенциальной энергией к местам с меньшей потенциальной энергией, что правомерно и для промерзания пучинистого грунта.

Для оценки энергетического состояния воды в почвах и грунтах применяют метод, основанный на использовании парциальной, или свободной, удельной энергии Дж.В. Гиббса – *химического потенциала воды*. Так как химический потенциал характеризует состояние компонента при отсутствии внешних силовых полей, а вода в грунте все же находится под их действием, то химический потенциал называли в грунте (или почве) получил специальное название *термодинамический потенциал воды* [Термодинамика..., 1966].

Химические потенциалы влаги в системе СИ представляются в размерности работы – кДж/кг (или Дж/моль). Однако для удобства количест-

венного описания процесса влагопереноса в промерзающих, оттаивающих и мерзлых грунтах он может быть представлен в размерности эквивалентного давления – Па (или кг/см², атм, удобнее в метрах водяного столба, 1 м вод. ст. = 10⁴ Па). На основе равенства $-\mu_w$ [кДж/кг] = $-P_w/\rho_w$ [м³·кг/(м²·10³ кг)], где ρ_w – плотность воды, выразив вес через массу ($F = mg$), получим [м³·кг·м/(м²·10³ кг·с²)]. С учетом того, что кДж = м²·кг (масса)/с², приходим опять к размерности [кДж/кг] с коэффициентом 0.981, т. е. 1 МПа = 0.981 кДж/кг [Чеве́рев, 2004].

При этом давление в поровом растворе, сформированное внешним энергетическим воздействием (гидростатический напор, всасывание, компрессия и т. д.), в отличие от эквивалентного давления, считается просто поровым давлением и обозначается $-P_w$. Отрицательное поровое давление в криогенных грунтах не оценивается в единицах вакуума, как это принято в физике атмосферы, от 0 до 1 атм. Оно измеряется в шкале, принятой в агрофизике, когда нормальное атмосферное давление в чистой объемной воде, находящейся вне влияния грунта, приравнивается к нулю как нейтральное.

Гидростатическое и компрессионно-фильтрационное давления в грунте имеют положительные значения ($+P_w$), а всасывающее давление и все составляющие химического потенциала при переводе их в эквивалентное давление – отрицательные значения ($-P_w$).

Таким образом, при исследовании энергетического состояния воды в криогенных грунтах и движущих сил влагопереноса в них следует различать химический потенциал воды (μ_w), напрямую определяемый гидрофильной способностью грунта, и потенциал воды как функцию самого процесса и внешних условий.

При замерзании некоторой части грунтовой влаги количество жидкой фазы уменьшается, а оставшаяся ее часть находится под более низким давлением (или большей энергией связи) по сравнению со свободной водой. Следовательно, $dP_w/dT < 0$. В то же время кристаллы льда, не имея гидравлической связи с водой, свободны от давления, существующего в жидкой фазе. Давление, действующее на кристаллы, уже не зависит от T , и, следовательно, $dP_i/dT = 0$.

Учитывая это, используем термодинамическое уравнение Клапейрона–Клаузиуса для однокомпонентной двухфазной системы лед–вода, которое имеет вид

$$dP/dT = L/(T_0(V_2 - V_1)), \quad (1)$$

где L – удельная теплота фазового перехода из первой фазы во вторую; $(V_2 - V_1)$ – разность удельных объемов фаз; T_0 – температура фазового пере-

хода воды при атмосферном давлении по шкале Кельвина.

Модифицированное уравнение (1) для условий энергетического состояния воды в почвах и грунтах, по Д.М. Эдлефсену и А.Б. Андерсону, принимает вид [Термодинамика..., 1966; Чеве́рев, 2003б]

$$dP_w = LdT/(T_0V_w), \quad (2)$$

где V_w – удельный объем жидкой фазы воды.

Правомерность использования такого подхода к мерзлым и промерзающим грунтам была экспериментально и аналитически подтверждена В.Г. Чеве́ревым с соавторами. После подстановки значений T_0 , а также L и V_w (как для свободной воды, что допустимо) получаем, что увеличение давления на жидкую воду на 0.1 МПа приводит к повышению температуры замерзания на 0.0824 К. При этом справедливо выражение [Чеве́рев, 2003а,б; Cheverev et al., 1998]:

$$dP_w/dT = -1.2 \text{ МПа/К} = 120 \text{ м вод. ст./К}. \quad (3)$$

Отсюда уравнение, по С.Н. Булдовичу и В.Г. Чеве́реву, для расчета плотности потока незамерзшей воды в мерзлом грунте (I_{wm}) под действием градиента температуры (dT/dz) имеет вид [Основы..., 1999]

$$I_{wm} = -\lambda_{wm}(T)kdT/dz, \quad (4)$$

где $\lambda_{wm}(T)$ – коэффициент влагопроводности мерзлой зоны грунта, существенно зависящий от типа грунта и его температуры, м/с; k – коэффициент пропорциональности, м вод. ст., равный 120 м/К; z – высота мерзлой зоны, м.

Градиент температуры в промерзающей зоне грунта, точнее на фронте промерзания, инициирует градиент гидравлического порового давления и влагопоток в талой зоне (I_{wt}), для которого, по С.Н. Булдовичу и В.Г. Чеве́реву, справедливо следующее уравнение [Основы..., 1999]:

$$I_{wt} = -\lambda_{wt}k(T_{bf} - T_\xi)/(l - \xi), \quad (5)$$

где λ_{wt} – коэффициент влагопроводности талой зоны грунта, зависящий от типа грунта, его плотности и степени влажности, м/с; k – коэффициент пропорциональности, м вод. ст., равный 120 м/К; T_{bf} – температура начала замерзания грунта талой зоны (статическая характеристика); T_ξ – температура на фронте промерзания, зависящая от типа грунта и динамики его промерзания (динамическая характеристика): понижается при увеличении скорости промерзания и становится равной T_{tot} при остановке фронта промерзания, прекращении криогенной миграции и пучения.

Уравнения (4) и (5), представленные в потенциальной форме, являются базовыми при разработке математической модели промерзания и пучения грунта в части массопереноса.

ВЫВОДЫ

На основе аналитического обзора большого объема теоретических, модельных и экспериментальных исследований авторы пришли к выводам, важным для развития теории криогенной миграции и морозного пучения грунтов. В дальнейшем можно усовершенствовать физическую постановку математической модели процесса промерзания и пучения грунтов с учетом тепло- и массопереноса.

В общем виде процесс морозного пучения промерзающего грунта можно отнести к новой главе научного направления физико-химической механики материалов и коллоидных систем, основателем которого является академик П.А. Ребиндер. Механизм криогенной миграции и морозного пучения грунтов представляет собой сложное взаимодействие и взаимозависимость теплопереноса, массопереноса, фазовых переходов воды в порах грунта, сегрегации льда и разнонаправленной динамики его напряженно-деформационного состояния. Теплоперенос как первопричина обеспечивает отвод из грунта теплоты фазовых переходов, емкостного и конвективного тепла. Замораживая грунт, он инициирует массоперенос и сегрегационное льдовыделение в пучинистых грунтах.

В статье дан обзор развития представлений о первопричине криогенной миграции воды в промерзающих грунтах и о ее движущих силах, на основе которого сделаны следующие выводы.

1. Возможность переноса поровой воды в промерзающих почвах (грунтах) под действием градиента температуры впервые предложил Г.Я. Близнин [1890]. Попытки найти другое объяснение, не зависящее от градиента температуры, не увенчались успехом.

2. В.И. Штукенберг [1894] и С. Тебер [Taber, 1930] предложили капиллярную гипотезу как первопричину миграции воды при промерзании и пучении грунтов. Однако эта гипотеза не была подтверждена. Движущая сила криогенной миграции возникает в промерзающей зоне грунта, в которой не образуются мениски поровой воды на границе с воздухом, которого практически нет в пучинистых водонасыщенных грунтах. Однако капилляры грунта выполняют важную функцию транзита для криогенной миграции.

3. Теории напорных сил и компрессионного уплотнения грунта также не получили подтверждения, поскольку в результате оттока воды из талой зоны в промерзающую под фронтом промерзания формируется отрицательное поровое давление с усадкой грунта, а не положительное как при компрессионном уплотнении.

4. Теория сил кристаллизации воды при переходе ее в фазу льда также не подтвердилась. Основную роль адсорбционных сил минерального

компонента подтвердили эксперименты А.П. Баженовой и Ф.Г. Бакулина [1957] по гидрофобизации минерального скелета грунта, после которой криогенная миграция и пучение прекращались.

5. Теория основной роли сил поверхностной адсорбции минерального компонента грунта в процессе криогенной миграции, выдвинутая для талых грунтов А.Ф. Лебедевым, а для промерзающих Дж. Бесковым, оказалась существенно ближе к истине, чем рассмотренные выше гипотезы. Убыль молекул воды в пленке вследствие ее постепенной кристаллизации способствует освобождению части поверхностной энергии минерального компонента грунта, что обуславливает и поддерживает миграцию влаги к фронту промерзания. Теория адсорбционных сил – это правильное направление, но далекое от завершения. Она нуждается в развитии в плане учета физико-химии поверхностных явлений, а именно, двойного электрического слоя ионов по Штерну.

6. Существенную роль в криогенной миграции М.Н. Гольдштейн [1948], Л. Касс и Р. Миллер [Cass, Miller, 1959] отвели осмотическим свойствам диффузии двойного электрического слоя, и в более развитом варианте эта теория предложена в настоящей статье.

Ввиду особой сложности состава пучинистых и, как правило, глинистых грунтов микроскопический уровень познания механизма криогенной миграции не предполагает в обозримом будущем разработки на этой основе численной математической модели промерзания пучинистых грунтов. Поэтому в целях реального достижения практического результата необходимо переходить на макроскопический, феноменологический уровень разработки теории морозного пучения грунтов. Для достижения этой цели необходимо воспользоваться понятием термодинамического потенциала влаги.

7. Теория формирования потока криогенной миграции на основе термодинамического потенциала использует модифицированное уравнение Клапейрона–Клаузиуса, термодинамически обоснованное Д.М. Эдлефсеном и А.Б. Андерсоном [Edlefsen, Anderson, 1943] и экспериментально и аналитически подтвержденное и доказанное В.Г. Чеверевым [2003a; Cheverev, 1998].

Благодарности. Материалы для подготовки статьи получены при финансовой поддержке ООО “НИИ Транснефть” (договор № 4220 П/20-511/2015 от 19.11.2015).

Литература

Баженова А.П., Бакулин Ф.Г. Экспериментальные исследования механизмов передвижения влаги в промерзающих грунтах // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд. АН СССР, 1957, № 3, с. 117–123.

- Близнин Г.Я.** Влажность почвы по наблюдениям Елизаветградской метеорологической станции 1887–1889 г. СПб., Тип. В. Демакова, 1890, с. 239–262.
- Борозинец В.Е., Фельдман Г.М.** Вакуумно-фильтрационный механизм образования мощных шлиров льда // Проблемы криолитологии. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, вып. 9, с. 165–178.
- Бровка Г.П.** Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании. Минск, Наука и техника, 1991, 190 с.
- Гольдштейн М.Н.** Деформации земляного полотна и инженерных сооружений при промерзании и оттаивании // Тр. НИИЖТ. М., Трансжелдориздат, 1948, вып. 16, 212 с.
- Драницын Д.А.** О некоторых зональных формах рельефа Крайнего Севера // Почвоведение, 1914, № 4, с. 21–68.
- Ершов Э.Д., Чеверев В.Г., Лебеденко Ю.П.** Экспериментальное исследование миграции влаги и льдовыделения в мерзлой зоне оттаивающих грунтов // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 1976, № 1, с. 111–114.
- Лебедев А.Ф.** Передвижение воды в почвах и грунтах. Ростов-н/Д., Изв. Донского с.-х. ин-та, 1919, 220 с.
- Никифоров К.О.** О некоторых динамических процессах в почвах в области распространения вечной мерзлоты // Почвоведение, 1912, № 2, с. 49–74.
- Орлов В.О.** Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М., Изд. АН СССР, 1962, 187 с.
- Основы геокриологии.** Ч. 5. Инженерная геокриология. Морозное пучение грунтов и его воздействие на сооружения / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, с. 109–133.
- Сумгин М.И.** Физико-механические процессы во влажных и мерзлых грунтах в связи с образованием пучин на дорогах. М., Транспечать, 1929, 196 с.
- Термодинамика почвенной влаги:** Сб. ст. / Пер. с англ. и ред. А.М. Глобуса. Л., Гидрометеиздат, 1966, 437 с.
- Цвигунов Д.Г.** Влияние сезоннопромерзающих грунтов на фундаменты вертикальных стержневых элементов: Дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2018.
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 446 с.
- Чеверев В.Г.** Классификация форм связи воды в мерзлых тонкодисперсных грунтах // Криосфера Земли, 2003а, т. VII, № 3, с. 31–40.
- Чеверев В.Г.** Свойства связанной воды в криогенных грунтах // Криосфера Земли, 2003б, т. VII, № 2, с. 30–41.
- Чеверев В.Г.** Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Чеверев В.Г., Бурнаев Р.С., Гагарин В.Е., Сафронов Е.В.** Влияние внешней нагрузки на степень морозной пучинистости глинистых грунтов // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 57–62.
- Штукенберг В.И.** О борьбе с пучинами на железных дорогах // Журн. Мин-ва путей сообщения, 1894, кн. 2, с. 24–30.
- Щукин Е.Д.** Коллоидная химия: Учебник / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 445 с.
- Beskow G.** Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads // Swed. Geol. Soc., 1935, Ser. C, No. 375, 26 the yearbook No. 3, 145 p.
- Black P.V.** Applications of the Clapeyron Equation to Water and Ice in Porous Media // US Army Corps of Eng., Cold Regions Res. and Eng. Laboratory (CRREL Rep.), 1995, No. 95-6, p. 6–7.
- Cass L., Miller R.D.** Role of the electric double layer in the mechanism of frost heaving // USA Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Res. Rep. 49 (available from CRREL), 1959, 15 p.
- Cheverev V.G., Ershov E.D., Magomedgadzhieva M.A., Vidyapin I.Y.** Results of physical simulation of frost heaving in soils // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Permafrost Yellowknife, Yellowknife, Canada, 1998, p. 145–149.
- Edlefsen N.E., Anderson A.B.C.** Thermodynamics of soil moisture // Hilgardia, 1943, vol. 15, No. 2, p. 31–298.
- Taber S.** The mechanics of frost heaving // J. Geology, 1930, vol. 38, No. 4, p. 303–313.

References

- Bazhenova A.P., Bakulin F.G. Experimental studies of the mechanisms of moisture movement in freezing soils. In: Materials on laboratory research of frozen soils. Moscow, AN SSSR, 1957, No. 3, p. 117–123 (in Russian).
- Bliznin G.Ya. Soil moisture according to observations of the Elizavetgradka meteorological station 1887–1889. St.Petersburg, Printing House of V. Demakov, 1890, p. 239–262 (in Russian).
- Borozinets V.E., Feldman G.M. Vacuum-filtration mechanism of formation of thick layers of ice. In: Problems of Cryolithology. Moscow, MGU, 1981, iss. 9, p. 165–178 (in Russian).
- Brovka G.P. Heat and Mass Transfer in Natural Dispersed Systems During Freezing. Minsk, Nauka i tekhnika, 1991, 190 p. (in Russian).
- Goldstein M.N. Deformations of the subgrade and engineering structures during freezing and thawing. In: Proceedings of NIIZhT, Transzheldorizdat, 1948, vol. 16, 212 p.
- Dranitsyn D.A. On some zonal landforms of the Far North. Pochvovedeniye [Pedology], 1914, No. 4, p. 21–68 (in Russian).
- Ershov E.D., Cheverev V.G., Lebedenko Yu.P. Experimental study of moisture migration and ice formation in the frozen zone of thawing soils. Vestnik MGU [Moscow State University Bulletin. Ser. 4. Geology], 1976, No. 1, p. 111–114.
- Lebedev A.F. Peredvizhenie vody v pochvakh i gruntakh [Water Movement in Soils and Soils]. Rostov n/D., Izvestiya Donского Agricultural Institute, 1919, 220 p. (in Russian).
- Nikiforov K.O. On some dynamic processes in soils in the permafrost distribution area. Pochvovedeniye [Pedology], 1912, No. 2, p. 49–74 (in Russian).
- Orlov V.O. Kriogennoe puchenie tonkodispersnykh gruntov [Cryogenic Heaving of Fine-Dispersed Soils]. Moscow, AN SSSR, 1962, 187 p. (in Russian).
- Fundamentals of Geocryology. Part 5. Engineering geocryology. Frost heaving of soils and its impact on structures / E.D. Ershov (Ed.). Moscow, MGU, 1999, p. 109–133 (in Russian).
- Sumgin M.I. Physical and mechanical processes in wet and frozen soils in connection with the formation of depths on roads. Moscow, Transpechat, 1929, 196 p. (in Russian).
- Thermodynamics of Soil Moisture. Translated from English and edited by A.M. Globus. Leningrad, Gidrometeizdat, 1966, 437 p. (in Russian).
- Cviguinov D.G. Influence of seasonally freezing soils on the foundations of vertical bar elements: Doctoral dissertation. Khabarovsk, 2018.
- Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen Soils]. Moscow, Vyschaya shkola, 1973, 446 p. (in Russian).
- Cheverev V.G. Classification of water bond forms in frozen fine-grained soils. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2003a, vol. VII, No. 3, p. 31–40 (in Russian).

- Cheverev V.G. Properties of bound water in cryogenic grounds. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2003b, vol. VII, No. 2, p. 30–41 (in Russian).
- Cheverev V.G. Priroda kriogennukh svoistv gruntov [Nature of Cryogenic Properties of Soils]. Moscow, Nauch. Mir, 2004, 234 p. (in Russian).
- Cheverev V.G., Burnaev R.S., Gagarin V.E., Safronov E.V. Influence of the external pressure on the degree of frosty heaving of clay soils. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 4, p. 57–62 (in Russian).
- Stukenberg V.I. About the fight against the depths on the Railways. Zhurnal Ministerstva putei soobshcheniya [Journal of the Ministry of Railways], 1894, book 2, p. 24–30 (in Russian).
- Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya khimiya [Colloidal Chemistry: Textbook]. Moscow, Publishing House of Mosc. Un-ta, 2004, 445 p. (in Russian).
- Beskow G. Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads. Swed. Geol. Soc., 1935, Ser. C, No. 375, 26 the yearbook No. 3, 145 p.
- Black P.B. Applications of the Clapeyron Equation to Water and Ice in Porous Media. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL Rep.), 1995, No. 95-6, p. 6–7.
- Cass L., Miller R.D. Role of the electric double layer in the mechanism of frost heaving. USA Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Res. Rep. 49 (available from CRREL), 1959, 15 p.
- Cheverev V.G., Ershov E.D., Magomedgadzhieva M.A., Vidyapin I.Y. Results of physical simulation of frost heaving in soils. In: Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost Yellowknife, Yellowknife, Canada, 1998, p. 145–149.
- Edlefsen N.E., Anderson A.B.C. Thermodynamics of soil moisture. Hilgardia, 1943, vol. 15, No. 2, p. 31–298.
- Taber S. The mechanics of frost heaving. J. Geology, 1930, vol. 38, No. 4, p. 303–313.

*Поступила в редакцию 13 ноября 2020 г.,
после доработки – 4 марта 2021 г.,
принята к публикации 11 марта 2021 г.*