

УДК 624.138
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4692
Шифр специальности ВАК 1.6.6, 1.6.16
Научная статья

Исследование морозного пучения суглинистого грунта в зависимости от степени его засоленности раствором NaCl

К.Е. Москвин^{1✉}, Е.А. Москвин², Б.В. Григорьев¹, Е.И. Елина¹

¹ Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

² ООО НПФ «СтройТехКонтроль», Россия, г. Тюмень

✉stud0000120004@study.utmn.ru

Аннотация. Актуальность. Рассматривается проблема морозного пучения в зонах вечномёрзлых и сезонно-талых грунтов. Изучаемая проблема является весьма актуальной при проектировании, строительстве и эксплуатации промышленных и жилых объектов, так как пучение грунта приводит к увеличению объема грунтового основания, вследствие чего здания и сооружения подвергаются серьёзным деформациям. Грунтовое основание в области хозяйственной деятельности человека испытывает различные термические и барические воздействия, совмещенные с дополнительным переувлажнением и засолением в результате техногенных разрушений, строительных работ и иной деятельности, в результате чего для таких грунтов риски пучения значительно повышаются, по сравнению с вероятностью возникновения пучения грунтов в естественных природных условиях. **Цель.** Изучение процесса морозного пучения и методов его предотвращения на примере искусственного засоления суглинистого грунта раствором NaCl различной концентрации в зависимости от температуры. **Методы.** Лабораторные исследования состояния грунта в природных условиях залегания: определение влажности методом высушивания до постоянной массы, верхнего предела пластичности, нижнего предела пластичности, гранулометрического состава ситовым методом, истинной плотности, плотности скелета (сухого) и пористости грунта и определение фактической степени пучинистости грунтов. **Результаты и выводы.** Отбор глубинных проб грунта, склонного к морозному пучению, осуществлен на объекте: АО «Транснефть-Сибирь», Тобольское УМН, ЛПДС «Демьянское» в период с июня по июль 2022 г. Частные пробы грунта группировались в серии в зависимости от глубины отбора и физико-механических показателей грунта. Основные отобранные для исследования образцы грунта классифицированы как суглинок тугопластичный легкий/тяжелый, пылеватый/песчаный. При проведении лабораторных исследований по определению степени пучинистости грунта были получены зависимости параллельных экспериментов при разной засоленности и температуре промерзания грунта. Установлено, что искусственное засоление образцов грунта значительно уменьшает степень морозного пучения породы.

Ключевые слова: морозное пучение, степень пучинистости, грунт, суглинок, засоленность, деформация, промерзание

Для цитирования: Исследование морозного пучения суглинистого грунта в зависимости от степени его засоленности раствором NaCl / К.Е. Москвин, Е.А. Москвин, Б.В. Григорьев, Е.И. Елина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 234–242. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4692

UDC 624.138
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4692
Scientific paper

Frost heaving of sandy clay soil depending on degree of its salinity with NaCl solution

K.E. Moskvin^{1✉}, E.A. Moskvin², B.V. Grigoriev¹, E.I. Elina¹

¹ Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

² NPF StroyTechControl, Tyumen, Russian Federation

✉stud0000120004@study.utmn.ru

Abstract. Relevance. The paper considers the problem of frost heaving in zones of permafrost and seasonally thawed soils. This problem is very actual at designing, construction and operation of industrial and residential objects, as ground frost heave leads to increase of volume of soil base, in consequence of which buildings and constructions are exposed to serious deformations. In the area of human activity, the soil base is subjected to various thermal and baric influences combined with additional overwatering and salinisation due to anthropogenic destruction, construction works and other activities, as a result of which the risks of heaving are significantly increased for such soils. **Aim.** To study frost heaving and methods of its prevention on the example of artificial salinization of loamy soil by NaCl solution of different concentration depending on temperature. **Methods.** Laboratory studies of soil state in natural conditions of occurrence: determination of moisture content by drying to constant mass, upper plasticity limit, lower plasticity limit, granulometric composition by sieve method, true density, skeleton density (dry) and porosity of soil and determination of actual degree of soil looseness. **Results.** Deep sampling of soil prone to frost swelling was carried out at the object: JSC Transneft-Siberia, Tobolskoe UMN, Demyanskoe LPDS, during the period from June to July 2022. Individual soil samples were grouped into series depending on the depth of sampling and physical and mechanical properties of the soil. The main soil samples were classified as tight loam light/heavy, dusty/sandy. During laboratory studies the authors have obtained the dependences of parallel experiments at different salinity and frost temperatures of the soil to determine the degree of soil heaving. It was found that artificial salinization of soil samples, significantly reduces the degree of frost heaving of rock.

Keywords: frost heaving, degree of heaving, soil, loam, salinity, deformation, freezing

For citation: Moskvin K.E., Moskvin E.A., Grigoriev B.V., Elina E.I. Frost heaving of sandy clay soil depending on degree of its salinity with NaCl solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 234–242. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4692

Введение

В настоящее время широко известно, что выше-лежащая часть грунта в области многолетней мерзлоты предрасположена к морозному пучению из-за постоянного изменения климатических условий. Определение относительной деформации морозного пучения и физико-механических свойств грунтового основания является одной из главных задач в области строительства в зонах многолетнемерзлых грунтов с большим содержанием глинистой и пылеватой фракции, а также грунтов с высокой обводненностью. Комплексное изучение природы этого явления поможет решить множество прикладных задач, связанных с обеспечением надежной и длительной эксплуатации промышленных и гражданских зданий и сооружений, дорог, тротуаров, фундаментов и свай.

На данный момент существует большое количество методов борьбы с морозным пучением. Их классифицируют на две основные категории: адаптацию конструкции здания к морозному пучению и уменьшение пучинистых свойств грунтов посредством воздействия на промороженную зону. К первой категории относится: применение различных термоизолирующих покрытий свай, определенных конструкций свай и увеличение их в размере по глубине залегания кровли. Ко второй категории методов борьбы с морозным пучением необходимо отнести уменьшение влажности, утепление и замену грунтов, а также устранение пучинистых свойств грунта за счет введения противоположных добавок [1–3]. Простым и действенным методом применения противоположных добавок является введение в грунтовую воду высокоминерализованного раствора, за счет чего происходит сни-

жение точки начала фазового перехода на границе вода–лед. Несмотря на то, что метод засоления грунтов является недолгосрочным, он остается одним из самых результативных методов борьбы с морозным пучением. Однако не существует единого стандартного решения по искусственному засолению в силу огромного разнообразия типов грунтов, их свойств и особенностей залегания. Поэтому для каждого конкретного случая необходимо проводить серию исследований по определению эффективности засоления данного типа грунта и определению степени морозного пучения. Однако в таких исследованиях обычно проверяется несколько устоявшихся значений концентраций и не исследуется более широкая зависимость концентрации раствора от температуры, а также деградация приобретенных свойств в результате естественной миграции флюидов.

Физические свойства морозного пучения

Морозное пучение грунта – это увеличение объема промерзающей породы вследствие образования линзовидных масс почти чистого льда и отделения воды от грунта по мере его промерзания. Линзы льда образуются благодаря перераспределению влаги в породе, из-за чего морозное пучение весьма ограничено и чаще всего не превышает 3 % своей толщины. Однако присутствие грунтовой воды в районе промерзания и движение ее в деятельный слой предполагает увеличение линзовидных масс к еще большему росту и может достигать 9 % толщины слоя. При наличии определенных условий линзы льда могут быть настолько массивными, что будут образовывать целый слой, по размерам больше слоя промерзшего грунта [4–10].

При рассмотрении структуры линзы было выявлено, что она состоит из огромного количества тонких кристаллов [6]. В пористой среде кристаллы развиваются параллельно направлению теплового потока, то есть снизу вверх, и продолжают свой рост, подпитываясь от грунтовой воды (от более теплой зоны). В промерзающих грунтах вода течет снизу вверх под действием криогенного всасывания по направлению к фронту промерзания, то есть движется противоположно тепловому градиенту [9]. Криогенное всасывание представляет собой один из главных факторов образования и роста ледяных линз за счет миграции влаги к фронту промерзания из нижележащих пропластков и вызывает формирование линз льда в результате вымерзания некоторого количества слоя влаги на поверхности минеральных частиц и действия молекулярных сил, повышающихся на 1,3 МПа на каждый градус °C ниже 0 °C [4, 8, 11–13].

Ледяные линзы – это линзовидные массы почти чистого льда, которые образуются в мерзлом грунте или горной породе (рис. 1). Образование ледяных линз носит название льдовыделения. Оно делится на два типа: нормальное и избыточное. При нормальном льдовыделении происходит перераспределение влаги в грунте. Избыточное льдовыделение – это подток воды из нижележащих слоев, в результате чего происходит образование ледяных линз [6].

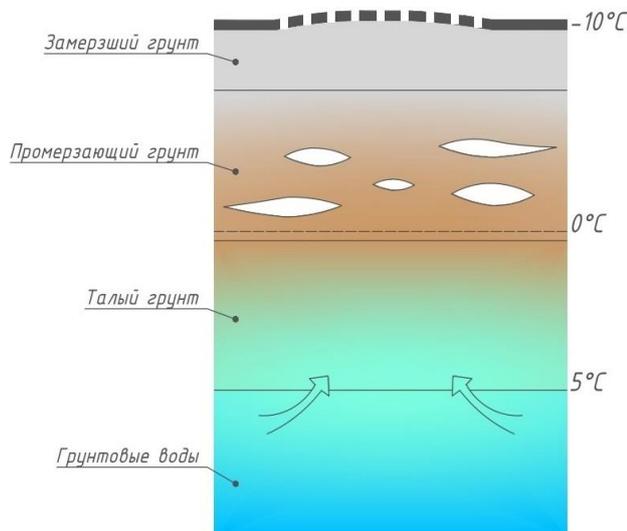


Рис. 1. Процесс морозного пучения и образования линз льда

Fig. 1. Frost heaving and ice lens formation

На интенсивность роста ледяных линз, помимо миграции влаги, влияют множество иных факторов: минеральный и гранулометрический состав грунта, влажность, плотность, температура грунта,

а также условия протекания процесса – закрытая или открытая система [5, 11, 14].

В частности, при одинаковой влажности грунта линзы будут быстрее образовываться в более мелкодисперсных грунтах. Связано это с тем, что при содержании в породе более мелких фракций грунта их активная удельная поверхность выше, по сравнению с грунтами крупной фракции того же объема, вследствие чего увеличивается доля рыхлосвязанной воды и уменьшается температурный порог кристаллизации воды, что интенсифицирует вертикальный массоперенос [10, 12].

Стоит отметить, что степень пучинистости нелинейно зависит от начального уплотнения грунта. При высокой плотности грунта миграция влаги в нем минимизирована по причине низкой пористости, поэтому пучение минимально. При низкой плотности породы фильтрационная способность повышается, однако при фазовом переходе происходит заполнение имеющихся в породе пустот, а грунт не подвергается значительной деформации. Наибольшая деформация будет происходить в грунтах со средней плотностью, так как при полном заполнении всех пор водой и последующем криогенном всасывании грунты будут значительно увеличиваться [5, 13].

В результате содержание соли в породе может значительно снижать момент кристаллизации воды за счет попадания частиц ионов между ее молекулами, что препятствует их выстраиванию для образования твердого тела. Также при фильтрации воды засоленные грунты имеют возможность подвергаться суффозии. Суффозия – это вынос частиц потоком грунтовых вод. Суффозия бывает химическая и механическая. Процесс суффозии можно описать так: вода, которая движется по порам грунта, растворяет солевые кристаллические связи между частицами, вследствие чего мелкие частицы грунта поддаются механической суффозии, которая, в свою очередь, и ведет к разрыхлению грунта или к заполнению пустот в грунтах. При попадании соли в грунтовую воду она становится агрессивной к бетонным и металлическим конструкциям. При изменении влажности засоленных грунтов сильно меняются их свойства. Когда температура грунтовой воды становится отрицательной, вода переходит в твердое состояние. В грунтах начинают образовываться ледяные линзы и прослойки. При промерзании кристаллы льда, содержащиеся в грунте, цементируют его, поэтому мерзлые грунты обладают достаточной прочностью. В результате влияния воды на засоленные грунты происходит изменение их прочностных характеристик, то есть происходит: снижение устойчивости грунтов, снижение устойчивости зданий и сооружений на этих грунтах. Поэтому принято проводить нормирова-

ние предельно допустимого содержания солей, выбор мероприятий по улучшению состава или по защите засоленных грунтов от воды для определения его пригодности в строительных целях [15, 16].

При кристаллизации воды свойства грунтов значительно изменяются. При замерзании частицы любого грунта цементируются между собой. Однако в случае, если при фазовом переходе воды из жидкого состояния в твердое происходит неравномерное увеличение объема грунта, а при оттаивании такого грунта его прочностные характеристики значительно снижаются, и порода не принимает свое первоначальное положение, такой грунт относят к группе структурно-неустойчивых.

К группе структурно-неустойчивых грунтов, подверженных морозному пучению, относят следующие породы: влажные глинистые грунты, пылеватые и мелкие пески. Пучение порождает неравномерное повышение промерзающих толщ, что объясняется различными условиями промерзания, составами пород, влажностями и другими факторами. Перечисленные породы в большей степени подвержены морозному пучению из-за миграционной влаги, которая поступает в промерзающий грунт из смежных не мерзлых зон.

Есть грунты, которые менее всего подвержены морозному пучению: пески средней крупности, крупные и гравелистые; щебенистые и крупнообломочные грунты с глинистым и мелкопесчаным заполнителем менее 10 % содержания; скальные грунты, так как вода не проникает в них в достаточном количестве и они имеют высокую плотность и прочность [17].

Методика и результаты экспериментальных исследований

Для проведения испытаний из двух скважин, находящихся на расстоянии 3 м друг от друга, № 1 и 2, было отобрано три пары образцов грунта ненарушенного сложения, наиболее близких по составу и свойствам между собой (табл. 1–3). С целью минимизации возможных отклонений физико-механических показателей частных проб грунта, применяемых в серийных (параллельных) испытаниях, отбор проб осуществлен с учетом глубины залегания грунта, в результате чего три пары образцов их двух скважин обладают минимальными различиями в полученных характеристиках. Эксперимент по определению степени пучинистости проводился при замораживании образцов каждой пары до одной и той же температуры из ряда –4, –6 и –8 °С, при этом первый образец в паре был естественной засоленности, а второй искусственно насыщался раствором NaCl.

Первым этапом исследований было определение физических свойств грунта по ГОСТ 5180-2015. При

определении физических свойств были проведены следующие испытания: определение влажности грунта, верхнего и нижнего предела пластичности, числа пластичности, показателя текучести, гранулометрического состава, истинной плотности, плотности скелета грунта и коэффициента пористости.

Таблица 1. Определение физических свойств грунта

Table 1. Determination of soil physical properties

№ пробы/Sample no.	Глубина отбора пробы, м Sampling depth, m	Влажность грунта Soil moisture	Число пластичности Plasticity index	Показатель текучести Liquidity index	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 Ground name according to SS 25100-2020
	h	W	Ip	IL	
1-1	1,5...1,7	21,13	11,98	0,44	Суглинок тугопластичный легкий пылеватый незасоленный Tight plastic light dusty non-saline
1-2	1,8...2,0	18,59	12,24	0,30	Суглинок тугопластичный тяжелый пылеватый незасоленный Tight plastic heavy dusty non-saline
1-3	2,1...2,3	19,10	11,10	0,31	Суглинок тугопластичный легкий пылеватый незасоленный Tight plastic light dusty non-saline
2-1	1,5...1,7	20,17	11,70	0,33	Суглинок тугопластичный легкий песчаный слабозасоленный Tight plastic light sandy loam slightly saline
2-2	1,8...2,0	18,44	12,36	0,27	Суглинок тугопластичный тяжелый песчаный слабозасоленный Tight plastic heavy sandy slightly saline
2-3	2,1...2,3	20,98	12,28	0,34	Суглинок тугопластичный тяжелый песчаный слабозасоленный Tight plastic heavy sandy slightly saline

Таблица 2. Определение плотности и коэффициента пористости грунта

Table 2. Determination of soil density and porosity coefficient

№ пробы Sample no.	Глубина отбора пробы, м Sampling depth, m	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³			Пористость грунта Soil porosity, %	Коэффициент пористости Void ratio
		частиц грунта soil particle	грунта soil	сухого грунта dry soil		
	h	ρ _s	ρ	ρ _d	n	e
1-1	1,5...1,7	2,70	1,84	1,52	0,44	0,78
1-2	1,8...2,0	2,70	1,83	1,54	0,43	0,75
1-3	2,1...2,3	2,71	1,86	1,56	0,42	0,74
2-1	1,5...1,7	2,70	1,85	1,54	0,43	0,75
2-2	1,8...2,0	2,71	1,86	1,57	0,42	0,73
2-3	2,1...2,3	2,72	1,87	1,55	0,43	0,75

По проведенным исследованиям был выполнен анализ состава грунта, представленный в табл. 1.

Определение степени засоленности грунта

Для определения степени засоленности грунта необходимо высушить грунт до постоянной массы, далее смешать грунт с дистиллированной водой в массовом соотношении 1:5 и отфильтровать полученный раствор в отдельную колбу. С помощью погружения водонепроницаемого тестера измерить солёность полученного раствора и провести обратный расчет солёности для исходной, природной, влажности образца грунта (табл. 2).

Для искусственного засоления образца грунта образец сначала высушивался до постоянной массы. После чего готовился раствор дистиллированной воды с солью NaCl в соотношении 10/100, 15/100, 20/100 граммов NaCl к общей высушенной массе. Полученный раствор приливался к высушенному грунту до достижения значений исходной влажности. После чего с выделенной частью грунта проводилось определение степени засоленности аналогично методике выше. Итоговые значения представлены в табл. 3.

Определение степени пучинистости [18–20]

Степень пучинистости грунта определяется по значению относительной деформации морозного пучения (1), данное значение было получено по результатам испытаний образцов грунта в специально предназначенных для этого установках, которые способны обеспечивать вертикальное промораживание образца изучаемого грунта в выбранных температурных и влажностных режимах и измерять перемещение его поверхности [18, 21]. Для определения относительной деформации морозного пучения необходимо последовательно выполнить ряд действий: установить в холодильной камере температуру +1 °C и выдержать установку в таком положении не менее 3 часов. Установить каменный фильтр и подачу воды. Далее поместить образец породы в холодильную камеру и надеть теплоизоляционный кожух. Задать через программное обеспечение температуру нижней и верхней плиты охлаждающей камеры и вертикальную нагрузку. Данные указаны в табл. 3.

Цикл испытания одной пары образцов длится 24 часа. Испытанный образец грунта извлекается из обоймы и помещается в приспособление для распиливания, где разрезается вдоль вертикальной оси, после чего измеряется толщина промерзшего слоя.

Относительная деформация морозного пучения грунта определяется по формуле

$$\epsilon_{fn} = \frac{h_f}{d_i},$$

где h_f – вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм; d_i – фактическая толщина промерзшего слоя образца грунта, мм.

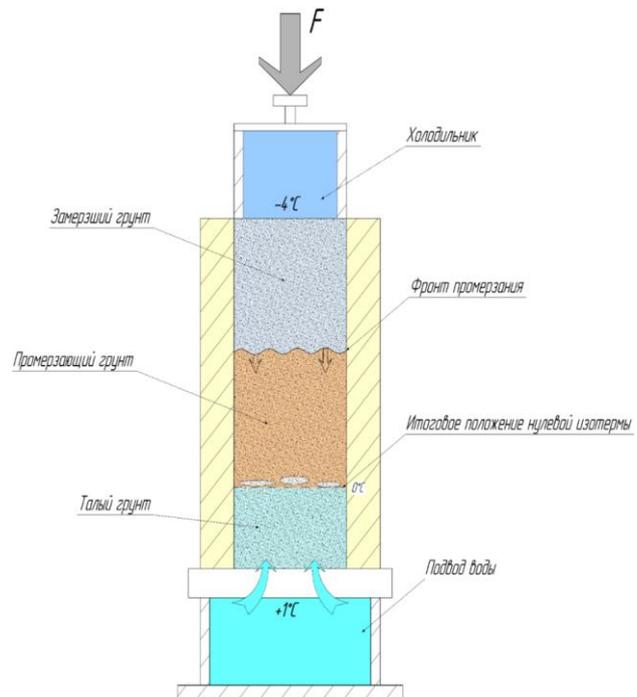


Рис. 2. Установка для определения относительной деформации морозного пучения

Fig. 2. Installation for determining frost heave relative deformation

В ходе проведенного испытания по определению степени пучинистости грунта были получены следующие данные и определена характеристика породы [22]. Полученные данные приведены в табл. 3.

По результатам проведенного эксперимента была построена диаграмма зависимости относительной деформации пучения от засоленности (рис. 3).

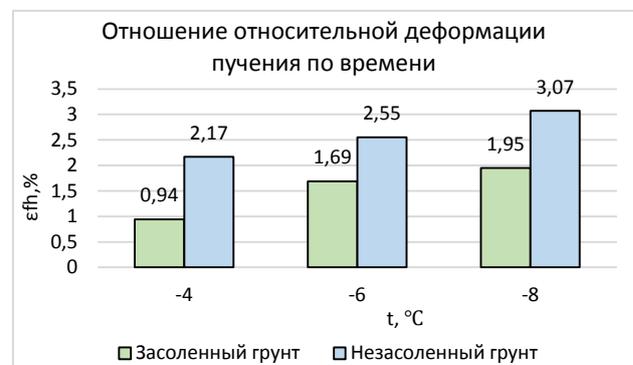


Рис. 3. Зависимость относительной деформации пучения от засоленности по времени

Fig. 3. Dependence of relative frost heave on salinity over time

Таблица 3. Определение относительной деформации пучения

Table 3. Determination of the relative frost heave

Испытания грунта на определение степени пучинистости/Soil samples for determining the degree of heaviness									
№ пробы/ Sample no.	Глубина отбора пробы, м Sampling depth, m	Температура на нижней плите, °С Temperature on the bottom plate, °C	Температура на верхней плите, °С Temperature on the top plate, °C	Засоленность/Salinity, %	Вертикальная деформация пучения, мм Vertical swelling deformation, mm	Толщина промерзания слоя, мм Layer freezing thickness, mm	Относительная деформация пучения/Relative frost heave, %	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 Ground name according to SS 25100-2020	Степень пучинистости по ГОСТ 25100-2020 Rockiness degree according to SS 25100-2020
Образцы природной влажности и засоленности/Natural moisture and salinity samples									
1-1	1,5...1,7	1,0	-4,0	0,04	2,11	97,1	2,17	Суглинок тугопластичный легкий пылеватый незасоленный Loam tight plastic light dusty non-saline unsalted	Слабопучинистый Slightly heaving
1-2	1,8...2,0	1,0	-6,0	0,04	2,53	99,2	2,55	Суглинок тугопластичный тяжелый пылеватый незасоленный Loam tight-plastic heavy dusty unsalted unsalted	
1-3	2,1...2,3	1,0	-8,0	0,04	3,08	100,4	3,07	Суглинок тугопластичный легкий пылеватый незасоленный Loam tight plastic light dusty non-saline unsalted	
Образцы искусственной засоленности и восстановленной влажности/Samples of artificial salinity and reduced moisture content									
2-1	1,5...1,7	1,0	-4,0	0,78	0,78	83,2	0,94	Суглинок тугопластичный легкий песчанистый слабозасоленный Loam tight-plastic light sandy slightly saline	Непучинистый Non-heaving
2-2	1,8...2,0	1,0	-6,0	0,84	1,53	90,3	1,69	Суглинок тугопластичный тяжелый песчанистый слабозасоленный Loam tight-plastic heavy sandy slightly saline	Слабопучинистый Slightly heaving
2-3	2,1...2,3	1,0	-8,0	0,96	1,84	94,2	1,95	Суглинок тугопластичный тяжелый песчанистый слабозасоленный Loam tight-plastic heavy sandy slightly saline	

По построенной зависимости видно, что при температуре $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная деформация морозного пучения засоленного NaCl суглинка в соотношении 10/100 г ниже в 2,3 раза аналогичной характеристики незасоленного образца. При температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная деформация засоленного NaCl суглинка в соотношении 15/100 г ниже в 1,51 раза. При температуре $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ различия относительной деформации пучения между засоленным NaCl суглинком в соотношении 20/100 г и незасоленным образцами достигли 1,57 раза. Полученное снижение деформации засоленных суглинков напрямую связано с концентрацией соли, при которой точка фазового перехода воды сместилась в сторону более низких температур [23–25].

Анализ полученных результатов

При проведении эксперимента с парой одинаковых образцов со степенью засоленности 0,04 и 0,78 и при температуре на верхней термостатированной плите –

$4\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная деформация морозного пучения составила 2,17 % для незасоленного и 0,94 % для слабозасоленного суглинка, снизившись в 2,3 раза.

Во втором эксперименте при значениях степени засоленности 0,04 и 0,84 и температуре верхней термостатированной плиты $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная деформация незасоленного суглинка равна 2,55 % и слабозасоленного суглинка 1,69 %. Уменьшение относительной деформации морозного пучения слабозасоленного суглинка составило 1,51 раз.

При проведении двух параллельных испытаний при температуре $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная деформация незасоленного суглинка равна 3,07 % и слабозасоленного 1,95 % соответственно. Уменьшение относительной деформации слабозасоленного суглинка составило 1,57 раз.

Показанное снижение степени пучинистости для каждого из искусственно засоленных образцов суглинка связано с тем, что для водного порового раствора соли точка фазового перехода смещается

в сторону более низких температур. Значит, для инициирования кристаллообразования, а следовательно, образования микролинз льда, требуется достижение более низких температур порового раствора. При этом после замерзания части воды в окружающем растворе повышается концентрация ионов соли за счет их частичного оттеснения при образовании кристаллов льда, что еще более снижает темп замерзания. Данный вывод вполне очевиден и согласуется с литературными данными. Также с литературой вполне согласуется зависимость между отрицательной температурой и степенью пучинистости, которая вытекает из выше озвученного вывода для искусственно засоленных грунтов. Для образцов природной засоленности характер зависимости объясняется разной интенсивностью криогенного всасывания.

Интереснее порассуждать над причиной снижения разницы между относительной деформацией морозного пучения засоленного и незасоленного грунта при понижении температуры. Видно, что для $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ отличие в 2,3 раза, в то время как для $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1,57 раза.

Заключение

1. При равновесных условиях замораживания фронт движения нулевой изотермы и фронт фазового перехода в общем случае не совпадают для засоленных образцов, для незасоленных они в большей степени совпадают.
2. При достижении фронтом промораживания своего равновесного положения нулевая изотерма находится на несколько сантиметров ниже (в масштабах размеров образца в установке), перекрывая собой часть грунта со сниженной концентрацией раствора соли, благодаря чему в отдельных крупных порах происходит частичная кристаллизация свободной воды, образуется переходная зона, в которой снижается эффективная площадь сечения миграции флюида к установившейся границе фазового перехода вода-лед в порах грунта, расположенной выше. При этом вода по пути миграции от нижней пластины к фронту промерзания, попадая в область отрицательных температур, также частично кристаллизуется. Но все это справедливо для равновесного замораживания.
3. При этом заметно, что со снижением температуры влияние засоления на пучинистость снижается, несмотря на рост концентрации раствора, что на первый взгляд кажется противоречивым, но, вероятно, здесь играет роль неравновесность протекания процесса кристаллизации. В частности, при градиенте между пластинами $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ фронт замерзания движется медленнее, чем при градиенте 6 или $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. В случае малого градиента нулевая изотерма движется впереди фронта замерзания и за это же время поровой раствор частично разбавляется подтянувшейся водой с нижней пластины. Поэтому продвижение фронта замерзания проходит по уже частично замерзшему грунту, а итоговое смещение нулевой изотермы ниже равновесного положения границы фазового перехода приводит к закупориванию части пор и снижению криогенного всасывания. А при высоком градиенте нулевая изотерма движется рядом с границей фазового перехода и не происходит частичной кристаллизации воды перед фронтом замерзания до его остановки. Однако и потом область между нулевой изотермой и границей фронта замерзания охватывает раствор, концентрация которого мало отличается от первоначальной и происходит лишь частичная кристаллизация воды, подтягивающейся от нижней пластины. Поэтому процесс пучения засоленного суглинка при низкой отрицательной температуре выражен более отчетливо, чем при высокой отрицательной температуре.
4. При рассмотрении равновесного и неравновесного замерзания не минерализованного суглинка можно предположить, что при медленном промерзании его пучение будет больше, чем при быстром промерзании грунта. Так как при малой скорости промерзания грунта вода успевает подтягиваться к медленно движущемуся фронту промерзания и по мере опускания фронта промерзания весь оставшийся позади грунт будет иметь большую влажность (а следовательно, объем), чем изначально, и в месте остановки фронта промерзания за счет подтягивающейся воды возможно образование микролинз чистого льда. При этом в случае с быстрым неравновесным замерзанием при высоком градиенте температур грунт, через который прошел фронт промерзания, застыл при изначально влажности, т. к. вода с нижней пластины не успела подтянуться к быстро перемещающемуся фронту промерзания. И фактически пучение будет наблюдаться только в области остановки фронта фазового перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усатый Д.Д. Испытание глинистого грунта в приборе для определения степени морозного пучения // Наука и просвещение. Форум молодых исследователей. – Пенза, 12 мая 2022. – С. 47–50.
2. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils / I. Inzhutov, V. Zhadanov, M. Semenov, S. Amelchugov, A. Klimov, P. Melnikov, N. Klinduh // E3S Web of Conferences 110,01019. – 2019. – Vol. 10. – P. 3–7. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001019.

3. Dobudko O.V., Aminova L.I. Method of protection of foundations in rammed foundation pits against aggressive groundwater and frost heaving // *Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 753. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022034.
4. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: дата введения 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.
5. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. – Л.: Стройиздат, 1948. – 315 с.
6. Характеристики и использование вечной мерзлоты: в 2 т. Геокриология / А. Стюарт, А. Харрис, А. Брушков, Г. Чэн. – М., Б.: Директ-Медиа, 2020. – Т. 1. – 437 с.
7. Голдыштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. – 367 с.
8. Rempel A.W. Frost heave // *Journal of Glaciology*. – 2011. – Vol. 56. – Iss. 200. – P. 1122–1128. DOI: 10.3189/002214311796406149. 08.09.2011.
9. Sheng D., Axelsson K., Knutsson S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils // *Nordic Hydrology*. – 1995. – Vol. 26. – P. 125–146. DOI: 10.2166/nh.1995.0008. 05.04.1995.
10. Heidmann L.J. Predicting frost heaving susceptibility of Arizona soils. – USA: Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1975. – P. 1–6.
11. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями N 1,2). – М.: Стандартинформ, 2018. – 28 с.
12. Обзор методов стабилизации пучинистых грунтов Кировской области / Р.А. Бехтерев, Ю.В. Юркин, В.В. Авдокин, А.А. Басалаев // *Инженерный вестник Дона*. – 2022. – № 6. – С. 1–18.
13. Analysis of elastoplastic mechanical properties of non-uniform frozen wall considering frost heave / W. Bing, L. Shenwei, G. Yi, R. Chuanxin. – Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, 2023. – Vol. 13. – 1038 p. DOI: 10.3390/app13021038. 18.01.2023.
14. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: дат. – М.: Стандартинформ, 2019. – 22 с.
15. Николаев Г.Б., Слабиков В.С. Исследование влияния процесса морозного пучения многолетнемерзлых грунтов при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на территории европейского севера // МЦИИ Омега Сайнс. Концепции, теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований. – Ижевск, 12 сентября 2022. – С. 46–50.
16. Chamberlain E.J. Frost heave of saline soils // *Permafrost: Fourth International Conference, Proceedings*. – Washington: National Academy Press Washington, D.C., 1983. – P. 121–126.
17. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 437 с.
18. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости 2012-12-18. – М.: Стандартинформ, 2013. – 9 с.
19. Оценка пучинистости крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем / О.Г. Баландин, Н.В. Пешков, О.В. Соколова, В.С. Соколова // *Вестник Северо-Восточного научного центра*. – 2022. – С. 56–62.
20. Study on the frost heave behavior of the freezing unsaturated silty clay / B. Ruiqiang, L. Yanming, P. Wanshed, Z. Mingyi // *Cold Regions Science and Technology*. – 2022. – Vol. 234. – P. 121236. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103525. 05.11.2022.
21. Volokhov E.M., Mukminova Z.D. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation // *Journal of mining institute*. – 2021. – Vol. 252. – P. 826–839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5. 15.12.2021.
22. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация (с Поправками): дата введения 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 38 с.
23. Каюмов Д.А. Изменение прочности связей между структурными элементами засоленных грунтов в земляном полотне. – Ташкент: Ташкентский государственный технический университет, 2022. – Т. 3. – С. 957–966. DOI: 10.24412/2181-1385-2022-1-957-966.
24. Chalmers B., Kenneth A.J. Experimental and theoretical studies of the mechanism of frost heaving. – USA: Corps of Engineers, U.S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1970. – P. 1–10. DOI: 10.1155/2015/198986
25. Исаков А.Л., Бухов С.И. К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания // *Строительство и архитектура. Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2021. – С. 92–98.

Информация об авторах

Константин Евгеньевич Москвин, аспирант кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. stud0000120004@study.utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8000-4971>

Евгений Александрович Москвин, директор ООО НПФ «СтройТехКонтроль», Россия, 625007, г. Тюмень, Ялutorовский тракт 11-й км, стр. 7. stroytehkонтроль@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-1954-4725>

Борис Владимирович Григорьев, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. b.v.grigorev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2757-1386>

Елена Игоревна Елина, ассистент кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. e.i.elina@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2659-9130>

Поступила в редакцию: 26.02.2024

Поступила после рецензирования: 07.10.2024

Принята к публикации: 30.06.2025

REFERENCES

1. Usatiy D.D. Testing of clayey soil in the apparatus for determining the degree of frost swelling. *Science and Education. Forum of young researchers*. Penza, May 12, 2022. pp. 47–50. (In Russ.)
2. Inzhutov I., Zhadanov V., Semenov M., Amelchugov S., Klimov A., Melnikov P., Klinduh N. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences 110,01019*, 2019, vol. 10, pp. 3–7. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001019.
3. Dobudko O.V., Aminova L.I. Method of protection of foundations in rammed foundation pits against aggressive groundwater and frost. *Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 753, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022034.
4. *SS 5180-2015. Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics: date of introduction 2016-04-01*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 19 p. (In Russ.)
5. Gersevanov N.M., Polshin D.E. *Theoretical foundations of soil mechanics and their practical applications*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1948. 315 p. (In Russ.)
6. Stewart A., Harris A., Brushkov A., Cheng G. *Geocryology. Characteristics and use of permafrost*. Moscow, Berlin, Direct-Media Publ., 2020. Vol. 1, 437 p. (In Russ.)
7. Goldstein M.N. *Mechanical properties of soils*. Moscow, Literature of Civil Engineering Publ. House, 1971. 367 p. (In Russ.)
8. Rempel A.W. Frost heave. *Journal of Glaciology*, 2011, vol. 56, Iss. 200, pp. 1122–1128. DOI: 10.3189/002214311796406149. 08.09.2011.
9. Sheng D., Axelsson K., Knutsson S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils. *Nordic Hydrology*, 1995, vol. 26, pp. 125–146. DOI: 10.2166/nh.1995.0008. 05.04.1995.
10. Heidmann L.J. *Predicting frost heaving susceptibility of Arizona soils*. USA, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1975. pp. 1–6. 10.08.1975.
11. *SS 8735-88. Sand for construction works. Test methods (with amendments N 1,2): date of introduction 1989-07-01*. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 28 p. (In Russ.)
12. Bekhterev R.A., Avdokin Y., Basalae A.A. Review of methods of stabilization of frothy soils of Kirov Region. *Engineering Vestnik Don. R.*, 2022, no. 6. pp. 1–18. (In Russ.)
13. Bing W., Shenwei L., Yi G., Chuanxin R. *Analysis of elastoplastic mechanical properties of non-uniform frozen wall considering frost heave*. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, 2023. Vol. 13, 1038 p. DOI: 10.3390/app13021038. 18.01.2023.
14. *SS 12536-2014. Soils. Methods of laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition: date of introduction 2015-07-01*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 22 p. (In Russ.)
15. Nikolaev G.B., Slabikov V.S. Study of impact of frost swelling of permafrost grounds during construction and operation of buildings and structures in the European North. *Omega Sainz ISTS. Concepts, Theory and Methodology of Fundamental and Applied Scientific Research*. Izhevsk, September 12, 2022. pp. 46–50. (In Russ.)
16. Chamberlain E.J. Frost heave of saline soils. *Permafrost: Fourth International Conference, Proceedings*. Washington, National Academy Press Washington, D.C., 1983. pp. 121–126.
17. Tsytoich N.A. *Mechanics of soils*. Moscow, Literature on Construction, Architecture and Construction Materials Publ., 1963. 437 p. (In Russ.)
18. *SS 28622-2012. Soils. The method of laboratory determination of the degree of heaviness 2012-12-18*. Moscow, Standardinform Publ., 2013. 9 p. (In Russ.)
19. Balandin O.A., Peshkov N.V., Sokolova O.V., Sokolova V.S. Evaluation of heaving of coarse-clastic soils with a loamy aggregate. *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2022, pp. 56–62. (In Russ.) DOI: 10.34078/1814-0998-2022-3-56-62
20. Ruiqiang B., Yanming L., Wanshed P., Mingyi Z. Study on the frost heave behavior of the freezing unsaturated silty clay. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 234, pp. 121236. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103525. 05.11.2022.
21. Volokhov E.M., Mukminova Z.D. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation. *Journal of mining institute*, 2021, vol. 252, pp. 826–839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.
22. *SS 25100-2020. Soils. Classification (with amendments)*. Date of introduction 2021-01-01. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 38 p. (In Russ.)
23. Kayumov D.A. *Changes in the strength of the bonds between the structural elements of saline soils in the earth bed*. Tashkent, Tashkent State Technical University Publ., 2022. Vol. 3, pp. 957–966. (In Russ.) DOI: 10.24412/2181-1385-2022-1-957-966.
24. Chalmers B., Kenneth A.J. *Experimental and theoretical studies of the mechanism of frost heaving*. USA, Corps of Engineers, U.S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1970. pp. 1–10. DOI: 10.1155/2015/198986.
25. Isakov A.L., Bukhov S.I. Estimation of frost swelling coefficient of clayey soils of the earthbed in a closed system of frost penetration. *Building and Architecture. Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering*, 2021, pp. 92–98. (In Russ.) DOI: 10.52170/2712-9195_2022_4_80

Information about the authors

Konstantin E. Moskvin, Postgraduate Student, Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. stud000120004@study.utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8000-4971>

Evgeniy A. Moskvin, Director, OOO NPF StroyTechControl, 7, Yalutorovskiy Trakt 11, Tyumen, 625007, Russian Federation. stroytekhkontrol@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-1954-4725>

Boris V. Grigoriev, Cand. Sc., Associate Professor, Head of Applied and Technical Physics Department, Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. b.v.grigorev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2757-1386>

Elena I. Elina, Assistant, Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. e.i.elina@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2659-9130>

Received: 26.02.2024

Revised: 07.10.2024

Accepted: 30.06.2025