

DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.02

УДК 624.139

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕРЗАЮЩЕГО ГРУНТА

А.В. Бояринцев¹, П.А. Подольская²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

²МОРСТРОЙТЕХНОЛОГИЯ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 26 ноября 2024
Одобрена: 28 августа 2025
Принята к публикации:
10 сентября 2025

Ключевые слова:

морозное пучение, скорость
морозного пучения, степень
пучинистости грунта,
относительная деформация
морозного пучения, влажность,
показатель текучести,
гранулометрический состав.

АННОТАЦИЯ

Одним из наиболее часто встречающихся на территории России опасных геологических процессов, происходящих в грунтовом основании и негативно влияющих на безопасность зданий и сооружений, является процесс морозного пучения.

При расчете устойчивости фундамента на действие касательных сил морозного пучения по СП 22.13330 и 24.13330 необходимо сравнить касательные силы пучения с суммой удерживающих от выпучивания сил и нагрузок на фундамент. При этом для получения более точного результата касательные силы морозного пучения рекомендовано определять по ГОСТ Р 56726 путем сдвига образца грунта относительно материала фундамента со скоростью, равной скорости морозного пучения грунта. Под скоростью морозного пучения следует понимать скорость движения грунта относительно материала фундамента при его промерзании. Однако в настоящее время отечественная литература не регламентирует значения скорости пучения грунта.

В настоящем исследовании проведен обзор, анализ и обобщение научных сведений на тему зависимости параметров процесса морозного пучения от различных характеристик грунта и внешних воздействий на него. В ходе работы проведена аккумуляция экспериментальных данных, выполненных другими учеными. В результате анализа массива собранных данных: выявлены общие тенденции к росту скорости морозного пучения с увеличением влажности грунта, к уменьшению скорости морозного пучения с ростом плотности грунта, плотности скелета грунта; определены рекомендуемые граничные значения скорости и относительной деформации морозного пучения для разновидностей грунтов по показателю текучести; предложена методика аналитического определения скорости морозного пучения по содержанию в грунте частиц размером 0,05–0,005 мм.

Предложенные аналитические методики позволяют предварительно оценить величину скорости морозного пучения по известным параметрам грунта, не прибегая к дорогостоящим длительным испытаниям. В свою очередь, знание величины скорости морозного пучения увеличит точность определения касательных сил морозного пучения по ГОСТ Р 56726. Таким образом, результаты исследования позволят более точно спрогнозировать влияние сил пучения грунта на конструкции зданий и сооружений.

© Бояринцев Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, OrcidID: 0000-0001-9384-9297,
e-mail: andrey_boyartintsev@mail.ru

Подольская Полина Анатольевна – инженер, Россия, e-mail: podolskaia.pa@yandex.ru

Andrey A. Boyartintsev – Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, OrcidID: 0000-0001-9384-9297,
e-mail: andrey_boyartintsev@mail.ru

Polina A. Podolskaia – Design Engineer, e-mail: podolskaia.pa@yandex.ru



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE RATE OF FROST HEAVING ON VARIOUS PARAMETERS OF FREEZING SOIL

A.V. Boyarintsev¹, P.A. Podolskaia²

¹Saint-Petersburg State university of architecture and civil engineering,
Saint-Petersburg, Russian Federation

²Morstroytekhnologiya LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 26 November 2024
Approved: 28 August 2024
Accepted for publication:
10 September 2025

Keywords:

frost heave, frost heave rate, degree
of soil heaving, relative deformation
of frost heave, humidity, flow index,
granulometric composition.

ABSTRACT

One of the most common processes occurring in the soil foundation in Russia and negatively affecting the safety of buildings and structures is the process of frost heaving.

When calculating the stability of the foundation under the action of tangential frost heaving forces according to SP 22.13330 and 24.13330, it is necessary to compare the tangential frost heaving forces with the sum of the forces restraining heaving and the loads on the foundation. At the same time, to obtain a more accurate result, it is recommended to determine the tangential frost heaving forces according to GOST R 56726 by shifting a soil sample relative to the foundation material at a speed equal to the rate of frost heaving of the soil. The rate of frost heaving should be understood as the rate of soil movement relative to the foundation material when it freezes. However, at present, domestic literature does not regulate the values of the rate of soil heaving.

This study provides a review, analysis and generalization of scientific information on the dependence of the parameters of the frost heaving process on various soil characteristics and external influences on it. During the work, the experimental data obtained by other scientists were accumulated.

As a result of the analysis of the collected data array: general trends towards an increase in the frost heave rate with increasing soil moisture, towards a decrease in the frost heave rate with increasing soil density and soil skeleton density were identified; recommended boundary values of the frost heave rate and relative deformation for soil types based on the flow index were determined; a method for analytically determining the frost heave rate based on the content of 0.05-0.005 mm particles in the soil was proposed.

The proposed analytical methods will allow a preliminary estimate of the frost heave rate based on known soil parameters, without resorting to expensive, long-term tests. In turn, knowledge of the frost heave rate will increase the accuracy of determining the tangential frost heave forces according to GOST R 56726. Thus, the research results will allow a more accurate prediction of the effect of soil heave forces on the structures of buildings and structures.

Введение

Одним из опасных геологических процессов, циклически происходящих в массиве грунта оснований и негативно влияющих на конструкции зданий и сооружения, является процесс морозного пучения грунта.

Согласно ГОСТ 28622 [1], морозное пучение – это внутриобъемное деформирование промерзающих влажных грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации поровой и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда.

Вследствие увеличения объема грунта возникает повышенное давление со стороны вспученного грунтового массива на строительные конструкции, что может вызвать их деформации вплоть до разрушения. Особенно остро стоит вопрос морозного пучения для легких зданий и сооружений, веса которых недостаточно для компенсации подъемной силы морозного пучения.

Согласно СП 22.13330 [2] и 24.13330 [3], расчет устойчивости фундамента на действие касательных сил морозного пучения производится путем сравнения касательных си-

лы пучения с суммой удерживающих от выпучивания сил и нагрузок на фундамент. При этом силы пучения определяются из таблиц нормативных документов, зависят от типа грунта и глубины промерзания. Данная таблица не может соответствовать широкому разнообразию практических случаев, с которыми сталкиваются специалисты, что влечет к возникновению ошибок и несоответствий.

Б.И. Далматов [6] предполагал, что для более точного установления величины воздействия касательных сил необходимо производить сдвиговые испытания со скоростью, равной скорости морозного пучения этих грунтов. Данная идея нашла отражение в ГОСТ Р 56726 [4], который рекомендует определять силы пучения путем сдвига образца мерзлого грунта по пластине материала со скоростью 10–20 мм/сут, что позволяет повысить точность определения касательных сил морозного пучения и учесть особенности каждого грунта.

Как показывают исследования А.Ю. Шориной, А.В.Бояринцева, Е.С. Родионовой, В.А. Матюшиной [5], диапазон скорости пучения, рекомендованный для определения силы пучения по ГОСТ Р 56726, соответствует чрезмерно пучинистым грунтам. То есть сдвиг мерзлого грунта относительно материала со скоростью 10–20 мм/сут влечет за собой принятие чрезмерного запаса при оценке устойчивости здания на средне- или слабопучинистых грунтах.

При этом следует отметить, что в настоящее время не существует отечественных документов, регламентирующих понятие и тем более значения скорости морозного пучения для различных типов грунтов по их пучинистости. Более того, отсутствуют данные о том, как зависит скорость морозного пучения от таких факторов, как влажность грунта, его плотность, внешняя нагрузка и др.

Таким образом, понимание зависимости скорости морозного пучения от различных свойств грунта позволит рекомендовать более точное значение скорости сдвига мерзлого грунта по образцу материала, в рамках выполнения сдвиговых испытаний по ГОСТ Р 56726 и увеличить точность определения касательных сил морозного пучения, позволив выполнять сдвиговые испытания со скоростью пучения, с которой изучаемый образец грунта будет пучиниться при его промерзании вдоль фундамента сооружения.

Методика эксперимента

В процессе исследования проведены обзор, анализ и обобщение научной литературы по данной теме. Были изучены научные работы авторов: Т.К. Ажгихина [7]; О.Р. Голли [8]; Р.Ш. Абжалимов, Н.Н. Головкин [9]; А.В. Бояринцев, А.Ю. Шорина [10]; П.А. Казанцева, С. Сазонова, А.Б. Пономарев [11]; А.В. Шрамков [12]; С.П.Дорошенко, Г.Г. Болдырев, А.А. Коршунов, М.Б. Заводчикова, А.Л. Невзоров [13]; А.В. Свицерских [14]; А.В. Бояринцев, И.Н. Зуев, А.В. Журко, И.С. Камаев [15]; У.Б. Фаттоев, А.В. Брушков, А.В. Кошурников [16]; И.А. Чернышева, А.В. Машенко [17]; О.В. Соколова, В.С. Соколова [18].

Далее была произведена аккумуляция экспериментальных данных, содержащихся в изученной научной литературе. В исследование также включены данные лабораторных испытаний, проведенных в рамках выполнения компанией ООО «Морское строительство и технологии» (Морстройтехнология) проектно-изыскательских работ по объектам: «Увеличение мощности перевалки АО „Дальтрансуголь“ до 40 млн т угля в год», «Реконструкция нефтепричала в п. Ямбург».

По аппроксимационной функции перехода от величины относительной деформации морозного пучения к значению скорости морозного пучения, выявленной А.В. Бояринце-

вым, А.Ю. Шориной, Е.С. Родионовой, В.А. Матюшиной в исследовании [5], было определено значение скорости пучения грунта для каждого образца:

$$V_{\text{пуч}} = 0,0368\varepsilon_{fh} + 0,005, \quad (1)$$

где $V_{\text{пуч}}$ – скорость морозного пучения, мм/ч; ε_{fh} – относительная деформация морозного пучения, %.

Далее был выполнен анализ собранных экспериментальных данных и поиск закономерных зависимостей величины скорости морозного пучения от различных параметров грунта, известных по результатам инженерных изысканий. Построены графики аппроксимационных функций, выполнен анализ достоверности аппроксимации.

Результаты эксперимента

По результатам анализа научной литературы была сформирована сводная таблица экспериментальных данных, на основе которой проводился поиск зависимостей между исследуемыми величинами.

А.В. Бояринцев и А.Ю. Шорина [10] рекомендовали использовать показатель текучести в качестве характеристики для предварительного определения степени пучинистости грунта, предполагая зависимость пучинистости грунта от его консистенции, поскольку она косвенно учитывает несколько физических характеристик грунта. Однако, ввиду недостаточности экспериментальной выборки авторам установить зависимость не удалось. Дополнили экспериментальную выборку авторов данными, полученными при анализе отмеченных ранее источников: определена принципиальная зависимость скорости морозного пучения от показателя текучести для глин и суглинков (рис. 1).

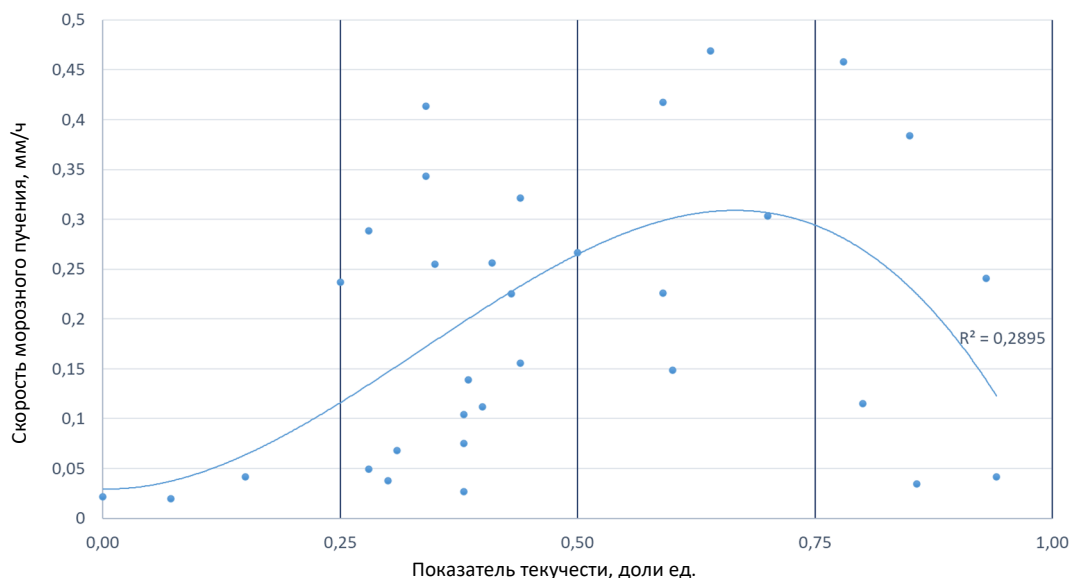


Рис. 1. График зависимости скорости морозного пучения от показателя текучести для глин и суглинков

Fig. 1. Graph of frost heave rate versus flow index for clays and loams

График (см. рис. 1) представляет собой криволинейную зависимость – скорость пучения увеличивается до определенного значения показателя текучести в диапазоне $0,50 < I_L \leq 0,75$, после которого происходит перегиб, и значение скорости пучения уменьшается с ростом показателя текучести.

Нелинейное поведение графика, выражающееся уменьшением значений скорости пучения в диапазоне $I_L > 0,75$, может быть обусловлено следующими факторами:

- плотность и прочность грунтов текучей консистенции весьма низкие, по этой причине текучепластичный грунт, подстилающий промерзающий и пучинящийся слой, может уплотняться при объемном морозном пучении промерзающего слоя, т.е. вертикальная деформация от пучения будет компенсироваться усадкой от уплотнения грунта [19];
- при полной влагоемкости перенос влаги значительно уменьшается либо не происходит, что приводит к уменьшению процесса морозного пучения.

Рассматривая рис. 1, можно заметить существенные отклонения фактических значений результатов лабораторных испытаний от функции аппроксимации в диапазоне значений показателя текучести $0,25 < I_L \leq 1$. Возможной причиной отклонений является взаимное влияние нескольких факторов одновременно. Ввиду вышесказанного, становится актуальным проанализировать зависимость скорости морозного пучения от различных характеристик грунта внутри каждой разновидности грунта по показателю текучести.

В результате анализа собранных данных построены графики зависимости скорости морозного пучения от влажности (рис. 2), плотности (рис. 3), плотности скелета грунта для полутвердых, туго-, мягко- и текучепластичных глин и суглинков (рис. 4).

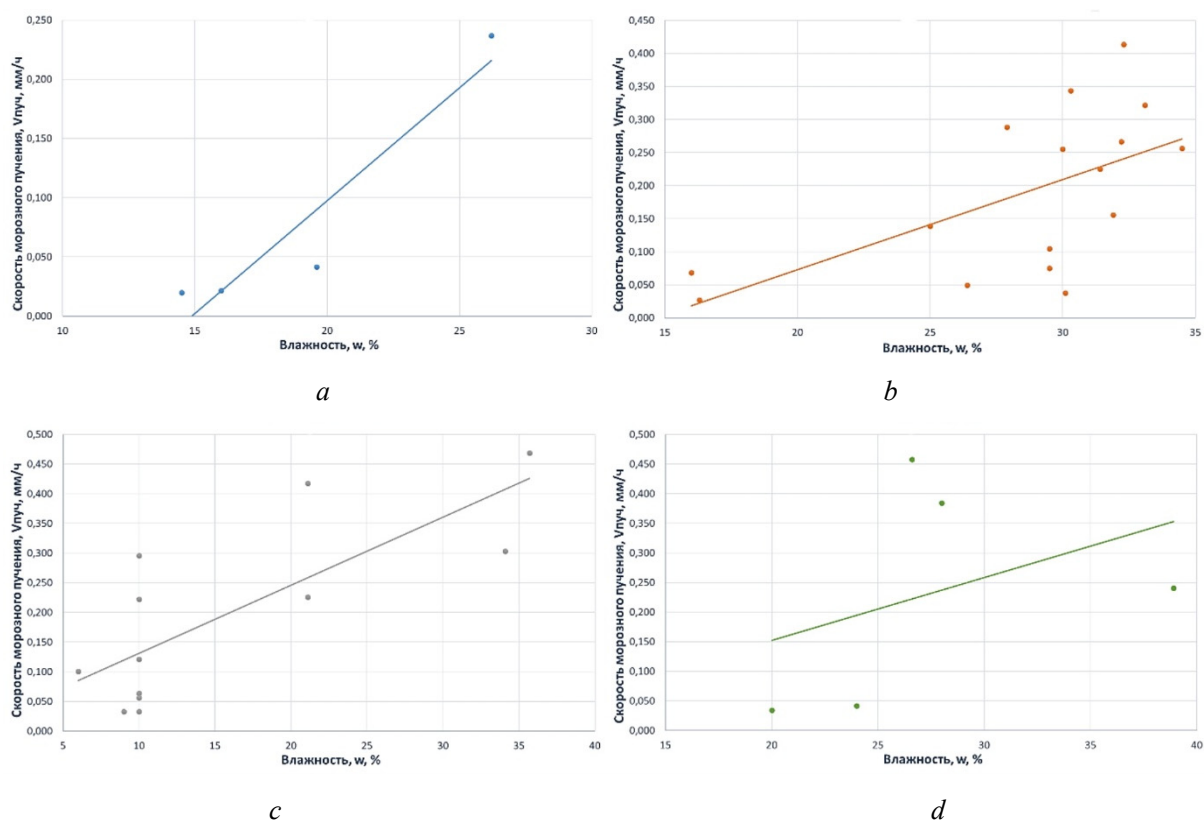


Рис. 2. График зависимости скорости морозного пучения от влажности для глин и суглинков при показателе текучести: а) $0 < I_L \leq 0,25$; б) $0,25 < I_L \leq 0,5$; в) $0,5 < I_L \leq 0,75$; г) $0,75 < I_L \leq 1,00$

Fig. 2. Graph of the dependence of the frost heaving rate on the moisture content for clays and loams with a flow index: а) $0 < I_L \leq 0,25$; б) $0,25 < I_L \leq 0,5$; в) $0,5 < I_L \leq 0,75$; г) $0,75 < I_L \leq 1,00$

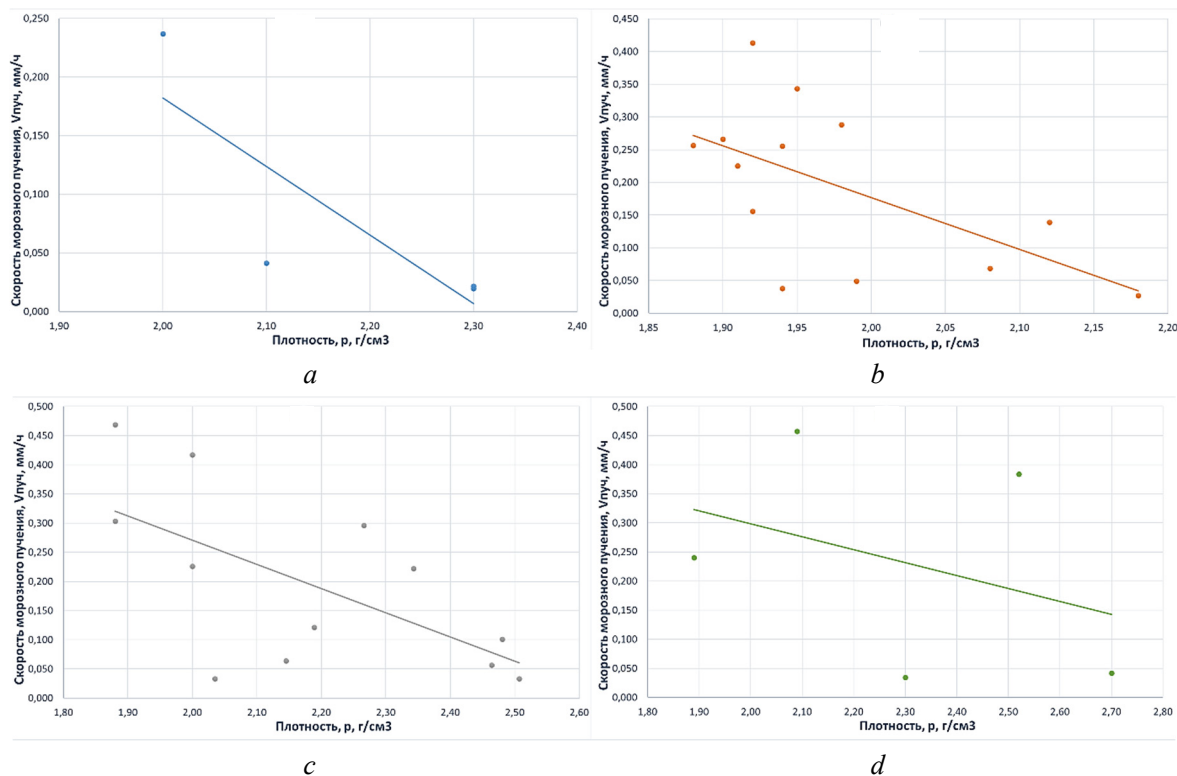


Рис. 3. График зависимости скорости морозного пучения от плотности для глин и суглинков при показателе текучести: а) $0 < I_L \leq 0,25$; б) $0,25 < I_L \leq 0,5$; в) $0,5 < I_L \leq 0,75$; д) $0,75 < I_L \leq 1,00$

Fig. 3. Graph of frost heaving rate versus soil density for clays and loams with a flow index:
а) $0 < I_L \leq 0,25$; б) $0,25 < I_L \leq 0,5$; в) $0,5 < I_L \leq 0,75$; д) $0,75 < I_L \leq 1,00$

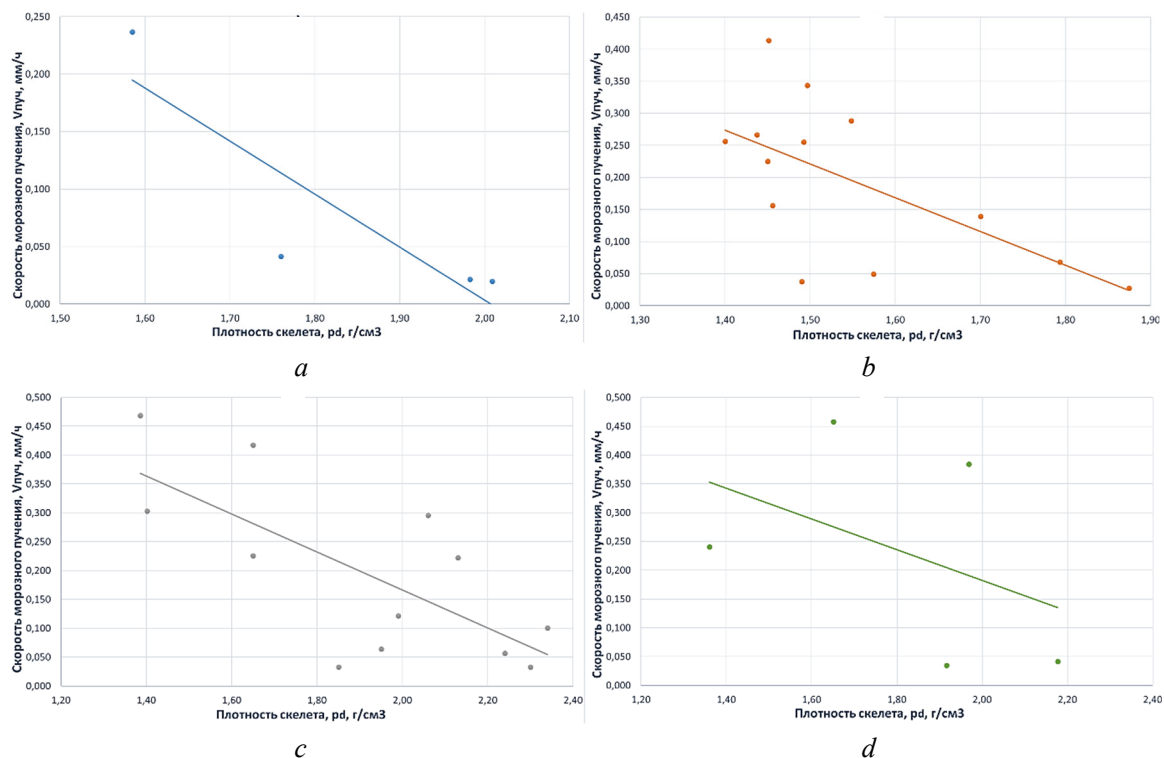


Рис. 4. График зависимости скорости морозного пучения от плотности скелета грунта для глин и суглинков при показателе текучести: а) $0 < I_L \leq 0,25$; б) $0,25 < I_L \leq 0,5$; в) $0,5 < I_L \leq 0,75$; д) $0,75 < I_L \leq 1,00$

Fig. 4. Graph of the dependence of the frost heaving rate on the dry density for clays and loams with a flow index: а) $0 < I_L \leq 0,25$; б) $0,25 < I_L \leq 0,5$; в) $0,5 < I_L \leq 0,75$; д) $0,75 < I_L \leq 1,00$

Рассматривая построенные графики, можно заметить значительные отклонения точек от аппроксимационной прямой. Коэффициент детерминации аппроксимационной функции в большинстве случаев не превышает 0,4. Также следует отметить, что для принятия достоверными аппроксимации, коэффициент детерминации которых более 0,7, необходимо большее количество экспериментальных данных.

Сводная таблица коэффициентов детерминации аппроксимационных функций представлена ниже (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты детерминации аппроксимационных функций

Table 1

Determination coefficients of approximation functions

Параметр	Коэффициент детерминации R^2 , при			
	$0 < I_L \leq 0,25$	$0,25 < I_L \leq 0,5$	$0,5 < I_L \leq 0,75$	$0,75 < I_L \leq 1,00$
Влажность грунта, w	0,8936	0,3629	0,5938	0,1505
Плотность грунта, ρ	0,6939	0,3424	0,3972	0,1392
Плотность скелета грунта, ρ_d	0,772	0,3878	0,5168	0,1907

Несмотря на значительные отклонения, можно проследить общий тренд влияния отдельно взятых величин на скорость морозного пучения и отметить следующие принципиальные закономерности:

- с увеличением значения влажности грунта – возрастает значение скорости морозного пучения;
- с увеличением значения плотности грунта – уменьшается значение скорости морозного пучения;
- с увеличением значения плотности сухого грунта (скелета грунта) – уменьшается значение скорости морозного пучения.

Далее в результате анализа экспериментальных данных было замечена общая тенденция к увеличению скорости морозного пучения при возрастании процентного содержания в образцах частиц пылевой фракции размером 0,05–0,005 мм. Принципиальная закономерность отражена на рис. 5.

Анализируя график, следует отметить, что:

1. Коэффициент детерминации аппроксимационной функции зависимости для пластичных супесей составил 0,9597 при анализе 5 образцов.
2. Коэффициент детерминации аппроксимационной функции зависимости для полутвердых суглинков составил 0,7293 при анализе 5 образцов.
3. Для анализа данных грунтов других разновидностей по показателю текучести недостаточно данных лабораторных испытаний.

При проведении большего числа опытов, возможно, будет выявлена четкая зависимость скорости морозного пучения грунта и относительной деформации пучения от содержания в грунте частиц пылевой фракции размером 0,05–0,005 мм для каждой разновидности глинистых грунтов по показателю текучести.

Т.К. Ажгихина в исследовании [7] разделяла образцы на грунты, влажность которых близка к границе текучести, и грунты, влажность которых близка к границе раскатывания. Разделив собранные данные по тому же принципу, был построен график зависимости ско-

рости морозного пучения от содержания пылеватой фракции размером 0,05–0,005 мм (рис. 6). На графике прослеживается четкая зависимость скорости морозного пучения от содержания фракций размером 0,05–0,005 мм при разделении грунтов по влажности. Коэффициент детерминации аппроксимационной функции составляет 0,9819 при приближении влажности к границе текучести и 0,9722 – при приближении к границе раскатывания.

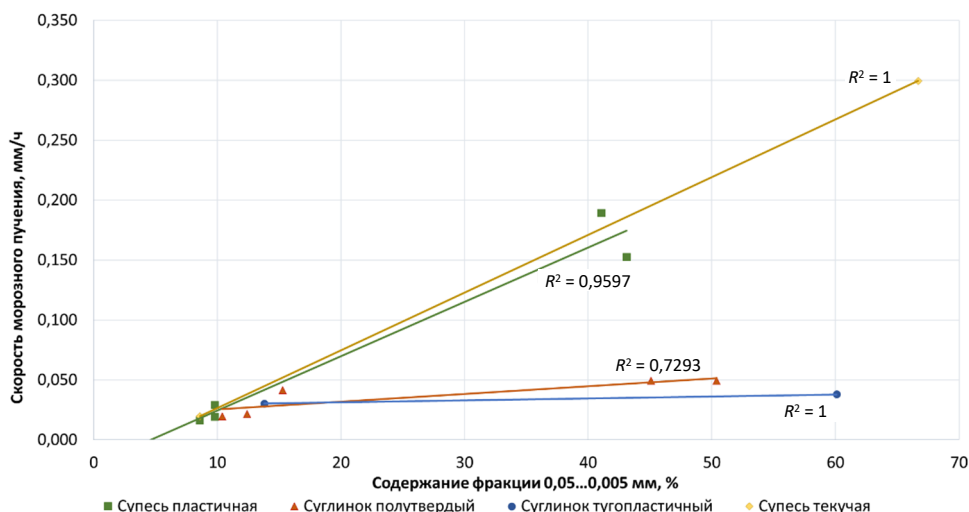


Рис. 5. График зависимости скорости морозного пучения от содержания частиц размером 0,05–0,005 мм для глинистых грунтов разной консистенции

Fig. 5. Graph of the dependence of the frost heaving rate on the content of particles of 0.05–0.005 mm in size for clay soils of different consistencies

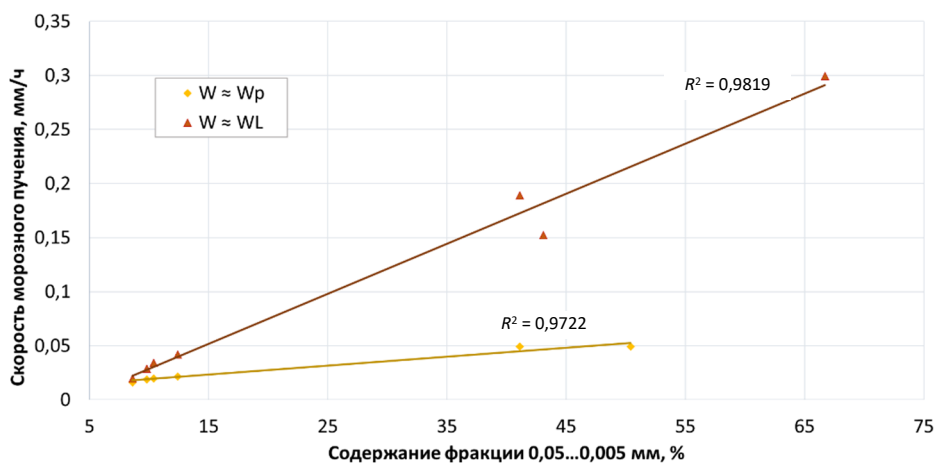


Рис. 6. График зависимости скорости морозного пучения от содержания частиц размером 0,05–0,005 мм

Fig. 6. Graph of the dependence of the frost heaving rate on the content of particles of 0.05–0.005 mm in size

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что одними из влияющих факторов при установлении взаимосвязи между параметрами процесса морозного пучения являются значения гранулометрического состава и влажности образца грунта относительно границ текучести и раскатывания. В соответствии с данной гипотезой был введен коэффициент k , определяемый по формуле:

$$k = \frac{w}{w_L}, \quad (2)$$

где w – влажность грунта, %; w_L – влажность на границе текучести, %.

Для каждого образца грунта был вычислен коэффициент k по формуле (2). При разделении данных по принципу принадлежности коэффициента интервалам (0,5; 0,7), [0,7; 0,9) и [0,9; 1,1) был построен графики зависимости скорости морозного пучения от содержания в грунте частиц размером 0,05–0,005 мм (рис. 7).

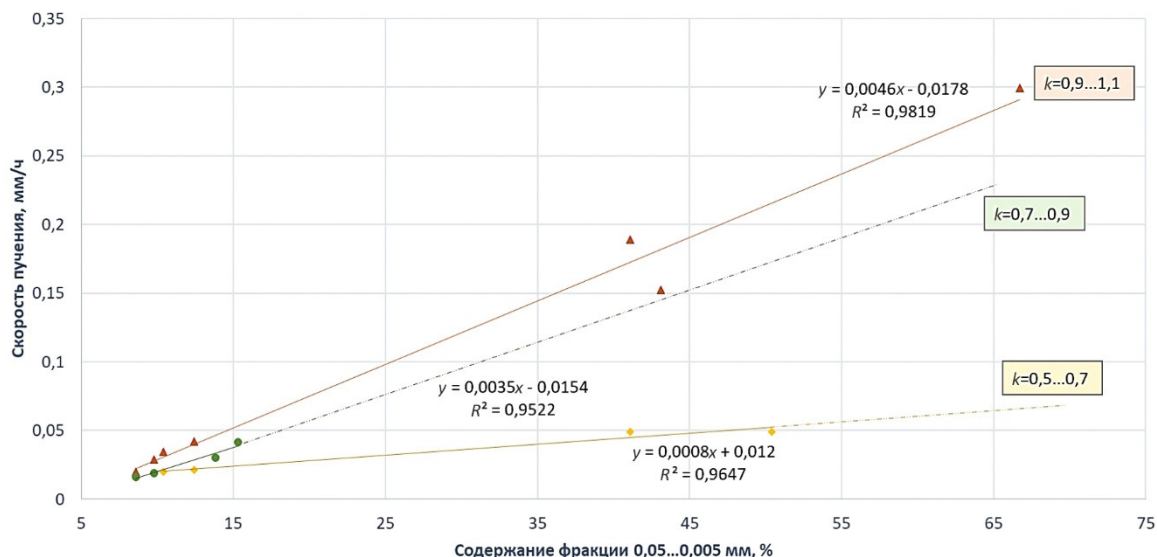


Рис. 7. График зависимости скорости морозного пучения от содержания частиц размером 0,05–0,005 мм при разделении по введенному коэффициенту

Fig. 7. Graph of the dependence of the frost heaving rate on the content of particles sized 0.05–0.005 mm when divided by the introduced coefficient

Анализируя построенный график, можно заметить явную взаимосвязь между представленными величинами. Коэффициенты достоверности аппроксимации составляют от 0,9522 до 0,9819, что свидетельствует о подтверждении выдвинутой ранее гипотезы.

Обсуждение результатов

Согласно представленным ранее закономерностям, выявленным в результате анализа собранных экспериментальных данных, могут быть предложены две методики предварительной оценки значения скорости морозного пучения глинистого грунта по его характеристикам физического состояния, консистенции и гранулометрического состава.

1. Методика аналитического определения скорости морозного пучения грунта по значению показателя текучести грунта. На графике, представленном на рис. 1, отмечается большое количество случаев превышения результатов частных испытаний над аппроксимационной функцией, что недопустимо при проектировании. Поэтому для определения рекомендуемых предварительных граничных значений скорости морозного пучения для разновидностей глинистых грунтов необходимо учитывать максимальные значения величин пучения. В результате аппроксимации максимальных значений получен график функций скорости пучения от показателя текучести с коэффициентом достоверности аппроксимации 0,84 (рис. 8).

По аппроксимационной функции, а также с помощью формулы (1) получены значения относительной деформации и скорости пучения пучения на границах между разновидностями глинистых грунтов по показателю текучести по ГОСТ 25100. Предлагаемые граничные значения представлены в табл. 2.

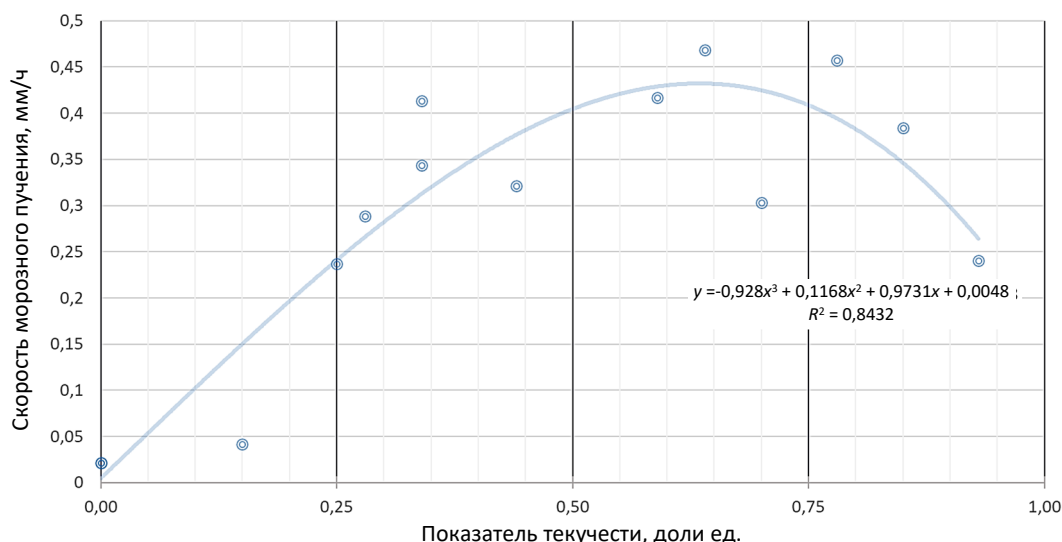


Рис. 8. График зависимости скорости морозного пучения от показателя текучести для глин и суглинков

Fig. 8. Graph of frost heave rate versus flow index for clays and loams

Таблица 2

Рекомендуемые граничные значения относительной деформации
морозного пучения и скорости пучения для разновидностей грунтов

Table 2

Recommended Limit Values of Relative Frost Heave Deformation
and Heave Rate for Soil Types

Разновидность глинистых грунтов	Показатель текучести, I_L , доли ед.	Относительная деформация пучения, доли ед.	Скорость пучения $V_{\text{пуч}}$, мм/ч
Супесь			
Твердая	$I_L < 0$	Вне области исследования	
Пластичная	$0 \leq I_L \leq 1,00$		
Текучая	$I_L > 1,00$		
Суглинки и глины			
Твердые	$I_L < 0$	Вне области исследования	
Полутвердые	$0 \leq I_L \leq 0,25$	$E_{th} \leq 0,064$	$V_{\text{пуч}} \leq 0,24$
Тугопластичные	$0,25 < I_L \leq 0,50$	$0,064 < E_{th} \leq 0,109$	$0,24 < V_{\text{пуч}} \leq 0,41$
Мягкопластичные	$0,50 < I_L \leq 0,75$	$0,109 < E_{th} \leq 0,116$	$0,41 < V_{\text{пуч}} \leq 0,44$
Текучепластичные	$0,75 < I_L \leq 1,00$	$0,064 < E_{th} \leq 0,110$	$0,24 < V_{\text{пуч}} \leq 0,41$
Текучие	$I_L > 1,00$	Вне области исследования	

Для уточнения рекомендуемых граничных значений в дальнейшем необходимо продолжать исследование зависимости параметров процесса пучения от показателя текучести, увеличивая количество испытаний и дополняя собранные данные новыми результатами.

2. Методика аналитического определения скорости морозного пучения грунта по гранулометрическому составу и влажности грунта. В результате выявленной закономерности влияния содержания частиц пылеватой фракции на параметры процесса морозного пучения с учетом введенного коэффициента k (формула (2)) предложена следующая методика аналитического определения значения скорости морозного пучения:

1. По результатам инженерных изысканий необходимо определить влажность образца грунта, влажность на границе текучести, процентное содержание в грунте частиц размером 0,05–0,005 мм.

2. Вычислить коэффициент влажности грунта относительно границы текучести по формуле

$$k = \frac{w}{w_L}, \quad (2)$$

где w – влажность грунта, %; w_L – влажность на границе текучести, %.

3. Определить, какому интервалу (0,5; 0,7), [0,7; 0,9) и [0,9; 1,1) принадлежит вычисленное значение коэффициента k , и найти на номограмме (рис. 9) соответствующую прямую.

4. Найти на шкале абсцисс величину содержания в грунте частиц размером 0,05–0,005 мм и провести прямую, перпендикулярную оси, до пересечения с прямой, определяющей значение коэффициента k .

5. Из найденной точки провести перпендикуляр к оси ординат, определив значение скорости морозного пучения.

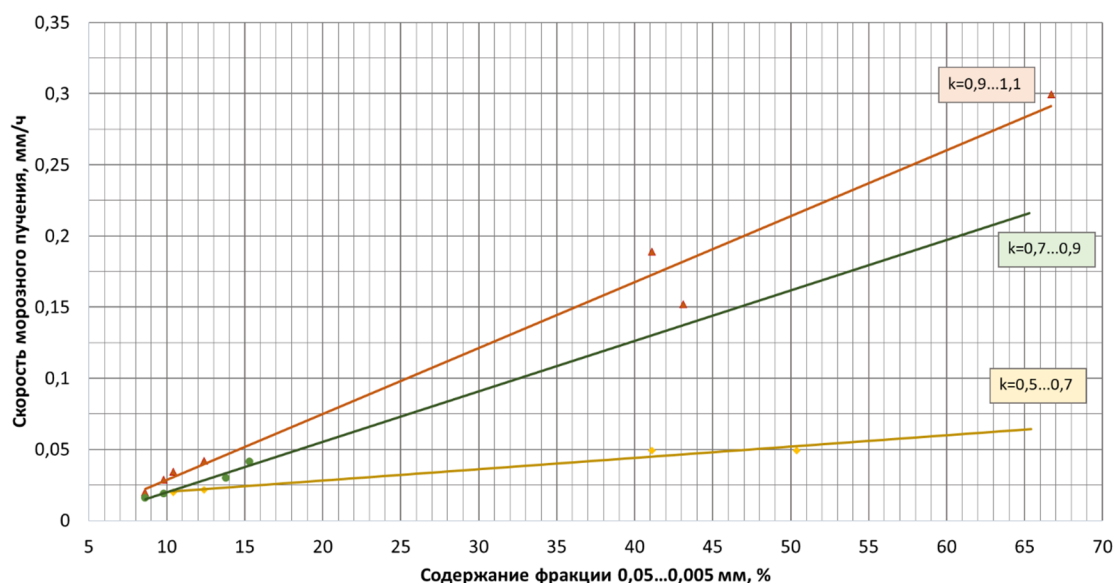


Рис. 9. Номограмма для определения скорости морозного пучения

Fig. 9. Nomogram for determining frost heave rate

При этом следует отметить, что для подтверждения и уточнения методики необходимо проведение большего количества испытаний.

Заключение

Анализируя полученные результаты исследования, можно сделать следующие выводы:

1. В соответствии с построенными графиками прослеживаются общие тенденции: к росту скорости морозного пучения с увеличением влажности грунта, к уменьшению скорости морозного пучения с ростом плотности грунта и плотности скелета грунта. При этом выявлены значительные отклонения точек от аппроксимационной прямой.

2. Предложена гипотеза, что при проведении большего числа опытов будет выявлена закономерность зависимости скорости морозного пучения грунта от содержания в грунте

частиц пылеватой фракции размером 0,05–0,005 мм для каждой разновидности глинистых грунтов по показателю текучести.

3. Получены рекомендуемые значения скорости морозного пучения и относительной деформации морозного пучения на границах разновидностей грунтов по показателю текучести (см. табл. 2).

4. Предложена методика аналитического определения скорости морозного пучения по значению влажности грунта, его консистенции и содержанию в грунте частиц пылеватой фракции размером 0,5–0,005 мм.

5. Для подтверждения и уточнения предложенных методик следует продолжать исследование, расширяя базу экспериментальных данных для анализа.

Финансирование Работа выполнена при финансовой поддержке СПбГАСУ (грант № 32С24).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. – Взамен ГОСТ 28622-90; введ. 2013-11-01. – переизд. сентябрь 2019 г. – М., 2019. – 9 с.
2. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 / Разработан НИИОСП им.Н.М.Герсеванова – институт АО "НИЦ «Строительство». – М., 2016.
3. СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 / Разработан НИИОСП им. Н.М.Герсеванова – институтом ОАО "НИЦ «Строительство». – М., 2021.
4. ГОСТ Р 56726-2015. Грунты. Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2015 г. N 1889-ст) Soils. Laboratory method for determine the specific tangential forces of frost heaving. Дата введения – 1 мая 2016 г. – М., 2016.
5. Опытное определение скорости морозного пучения для различных типов грунтов по степени пучинистости / А.В. Бояринцев, А.Ю. Шорина, Е.С. Родионова, В.А. Матюшина // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 2(91). – С. 66–73.
6. Далматов, Б.И. Воздействие морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений / дис. ... д-ра техн. наук / Б.И. Далматов. – 1955.
7. Ажгихина, Т.К. Исследование влияния гранулометрического состава на пучинистость грунта / Т.К. Ажгихина // Геология в развивающемся мире. Материалы VIII науч.-практ. конф., – Пермь, 23-26 апреля 2015 г. – Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2015. – С. 3–5.
8. Голли, О.Р. Закономерности морозного пучения грунтов и их использование при проектировании фундаментов / О.Р. Голли // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2003. – Т. 242. – С. 135–141.
9. Абжалимов, Р.Ш. Лабораторные исследования зависимости морозного пучения грунта от давления в малогабаритной промышленной установке / Р.Ш. Абжалимов, Н.Н. Головкин // Инженерная геология. – 2008. – № 4. – С. 30–35.
10. Казанцева, П.А. Лабораторное исследование влияния плотности грунта на степень морозного пучения / П.А. Казанцева, С.А. Сазонова, А.Б. Пономарев // Геотехника. – 2016. – № 4. – С. 4–9.

11. Шрамок, А.В. Характеристика процессов морозного пучения грунтов на территории Угутского месторождения (Тюменская область) / А.В. Шрамок. – Магистерская диссертация, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2023.
12. Прибор для определения деформаций морозного пучения и водопроницаемости грунтов / С.П. Дорошенко, Г.Г. Болдырев, А.А. Коршунов, А.Л. Невзоров // *Геотехника*. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 18–28.
13. Свицерских, А.В. Исследование различных типов грунта на морозное пучение при оптимальной влажности и его анализ / А.В. Свицерских // *Педагогическое образование на Алтае*. – 2014. – № 2. – С. 239–240.
14. Поведение конструкций раскрепления котлована в зимних условиях / А.В. Бояринцев [и др.] // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 37–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.03.
15. Фаттоев, У.Б. Морозное пучение грунтов Юго-Востока Европейской части России (вдоль проектируемой трассы железной дороги Москва–Казань) / У.Б. Фаттоев, А.В. Брушков, А.В. Кошурников // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. – 2020. – № 4. – С. 48–59.
16. Чернышева, И.А. Сравнение методов защиты от морозного пучения грунта / И.А. Чернышева, А.В. Мащенко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2016. – Т. 7, № 4. – С. 64–72.
17. Соколова, О.В. К вопросу о влиянии условий промерзания на пучение крупнообломочных грунтов с заполнителем / О.В. Соколова, В.С. Соколова // *Инженерная геология*. – 2022. – Т. 17, № 4. – С. 66–77. DOI 10.25296/1993-5056-2022-17-4-66-77.
18. Алексеев, А.Г. Методика исследования давления, действующего на подпорные стены при промерзании-оттаивании грунта / А.Г. Алексеев // *ОФМГ*. – 2007. – №3. – С. 15–18.
19. Алексеев, А.Г. Промерзание грунта в основании фундаментной плиты многоэтажного здания и его последствия/ А.Г. Алексеев // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2018. – №4. – С. 37–43.

References

1. GOST 28622-2012. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya stepeni puchinistosti. 9 s.
2. SP 22.13330.2016 Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.02.01-83 / Razrabotan NIIOSP im.N.M. Gersevanova – institut AO "NIC "Stroitel'stvo"
3. SP 24.13330.2021 Svajnye fundamenty. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.02.03-85 / Razrabotan NIIOSP im. N.M. Gersevanova – institutom OAO "NIC "Stroitel'stvo"
4. GOST R 56726-2015 "Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya udel'noj kasatel'noj sily moroznogo pucheniya" (utv. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 19 noyabrya 2015 g. N 1889-st) Soils. Laboratory method for determine the specific tangential forces of frost heaving.
5. Boyarinsev A.V., Shorina A.YU., Rodionova E.S., Matyushina V.A. Opytnoe opredelenie skorosti moroznogo pucheniya dlya razlichnyh tipov gruntov po stepeni puchinistosti [Experimental determination of the frost heaving rate for various types of soils according to the degree of heaviness]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2022, no. 2(91), pp. 66-73.
6. Dalmatov B. I. Vozdejstvie moroznogo pucheniya gruntov na fundamenty sooruzhenij [The impact of frost heaving of soils on the foundations of structures]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 1955.

7. Azhghina T.K. Issledovanie vliyaniya granulometricheskogo sostava na puchinistost' grunta [Investigation of the effect of the granulometric composition on the depth of the soil]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire. Materialy VIII nauch.-prakt. konf.* Perm, 23-26 April 2015. Perm, Permskij gos. nac. issled. un-t, 2015, pp. 3-5.
8. Golli O.R. Zakonomernosti moroznogo pucheniya gruntov i ih ispol'zovanie pri proektirovanii fundamentov [Patterns of frost heaving of soils and their use in the design of foundations]. *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*, 2003, vol. 242, pp. 135-141.
9. Abzhalimov R.SH., Golovko N.N. Laboratornye issledovaniya zavisimosti moroznogo pucheniya grunta ot davleniya v malogabaritnoj promyshlennoj ustanovke [Laboratory studies of the dependence of frost heaving of soil on pressure in a small-sized industrial installation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2008, no. 4, pp. 30-35.
10. Kazanceva P.A., Sazonova S.A., Ponomarev A.B. Laboratornoe issledovanie vliyaniya plotnosti grunta na stepen' moroznogo pucheniya [Laboratory study of the effect of soil density on the degree of frost heaving]. *Geotekhnika*, 2016, no. 4, pp. 4-9.
11. Shramok A.V. Harakteristika processov moroznogo pucheniya gruntov na territorii Ugut'skogo mestorozhdeniya (Tyumenskaya oblast') [Characteristics of frost heaving processes in the Ugut'skoye field (Tyumen region)]. Master's degree, Tomsk, 2023.
12. Doroshenko S.P., Boldyrev G.G., Korshunov A.A., Nevzorov A.L. Pribor dlya opredeleniya deformacij moroznogo pucheniya i vodopronicaemosti gruntov [A device for determining frost heaving deformations and soil water permeability]. *Geotekhnika*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 18-28.
13. Sviderskih A.V. Issledovanie razlichnyh tipov grunta na moroznoe puchenie pri optimal'noj vlazhnosti i ego analiz [Study of various types of soil for frost heaving at optimal humidity and its analysis]. *Pedagogicheskoe obrazovanie na Altae*, 2014, no. 2, pp. 239–240.
14. Boyarinsev A.V. [et al.]. The low temperature influence on the deep excavation supporting system. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 4, pp. 37-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.03.
15. Fattoev U.B., Brushkov A.V., Koshurnikov A.V. Moroznoe puchenie gruntov Yugo-Vostoka Evropejskoj chasti Rossii (vdol' proektiruemoj trassy zheleznoj dorogi Moskva–Kazan') [Frosty heaving of soils in the South-East of the European part of Russia (along the projected route of the Moscow–Kazan railway)]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, no. 4, pp. 48-59.
16. Chernysheva I.A., Mashchenko A.V. Sravnenie metodov zashchity ot moroznogo pucheniya grunta [Comparison of methods of protection against frost heaving of soil]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2016, vol. 7, iss. 4, pp. 64-72.
17. Sokolova O.V., Sokolova V.S. K voprosu o vliyanii uslovij promerzaniya na puchenie krupnooblomochnyh gruntov s zapolnitelem [On the issue of the influence of freezing conditions on the heaving of coarse-grained soils with aggregate]. *Inzhenernaya geologiya*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 66-77. – DOI 10.25296/1993-5056-2022-17-4-66-77.
18. Alekseev A.G. Metodika issledovaniya davleniya, dejstvuyushchego na podpornye steny pri promerzanii-ottauivani grunta [The method of studying the pressure acting on retaining walls during freezing and thawing of the soil]. *OFMG*, 2007, no. 3, pp.15-18
19. Alekseev A.G. Promerzanie grunta v osnovanii fundamentnoj plity mnogoetazhnogo zdaniya i ego posledstviya [Freezing of the ground at the base of the foundation slab of a multi-storey building and its consequences]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 4, pp. 37-43.