

Экспериментальное определение параметров методики исследования прочности смерзания грунта и материала фундамента

Андрей Владимирович Бояринцев¹, Евгений Константинович Козликин²,
Сергей Александрович Козельских³

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Петромоделинг лаб; г. Москва, Россия;

³ Проектное бюро «Резерв»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Прочность смерзания — прочностная характеристика мерзлых грунтов, описывающая их механическое взаимодействие с подземными конструкциями зданий и сооружений. Данная характеристика используется при определении несущей способности свай, расположенных в зоне распространения вечной мерзлоты, а также оценке выдерживающего воздействия касательных сил морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов. Прочность смерзания устанавливается лабораторными опытами посредством реализации сдвига мерзлого грунта относительно испытываемого материала. Существует несколько различных методов определения прочности смерзания, все они имеют недостатки: одни громоздки и сложны в проведении, в других невозможна реализация моделирования всех типов условий промерзания грунтов.

Материалы и методы. Для исследования прочности смерзания стеклопластика с образцом мерзлого грунта на кафедре геотехники СПбГАСУ предложен новый метод установления прочности смерзания грунта и подземной конструкции, позволяющий сократить трудоемкость испытаний, минимизировать дополнительное воздействие на испытываемые грунты в процессе их подготовки, а также учитывать особенности промерзания грунта вокруг фундамента. Однако, как любой новый метод, он обладает рядом неопределенностей. Экспериментально определены оптимальные параметры методики: соотношение диаметра образца материала к его высоте, конструктивное исполнение опоры, а также способа утепления при промораживании.

Результаты. Форма испытываемого образца имеет существенное влияние на конечное значение прочности смерзания, конструкция опоры и способ утепления образцов оказывают воздействие на получаемый результат в ходе испытания. Наиболее оптимальными решениями служат: применение опоры в виде кольца, препятствующего движению формы и не препятствующего движению грунта, и использование утепления путем погружения образцов в утеплитель, а не оборачивание им.

Выводы. Представлена законченная методика определения прочности смерзания грунта с материалом подземной конструкции, достоверность получаемых результатов по которой превосходит достоверность данных, полученных по методу ГОСТ, что проявилось в более низком значении коэффициента вариации внутри результатов контрольной выборки образцов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многолетнемерзлый грунт, прочность смерзания, методы испытаний грунтов, лабораторные испытания, механические свойства грунтов, новый метод испытаний, статистическая значимость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бояринцев А.В., Козликин Е.К., Козельских С.А. Экспериментальное определение параметров методики исследования прочности смерзания грунта и материала фундамента // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 415–425. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.415-425

Автор, ответственный за переписку: Андрей Владимирович Бояринцев, Andrey_boyarintsev@mail.ru.

Experimental determination of the parameters of the methodology for investigating the frost strength bond of soil and foundation material

Andrey V. Boyarintsev¹, Evgeniy K. Kozlikin², Sergei A. Kozelskikh³

¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint-Petersburg, Russian Federation;

² Petromodeling Lab; Moscow, Russian Federation;

³ Design bureau “Rezerv”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Freezing strength is a strength characteristic of frozen soils that describes their mechanical interaction with underground structures of buildings and structures. This characteristic is used in determining the bearing capacity of piles located in the zone of permafrost, and in assessing the pull-out effect of the tangential forces of frost heaving of seasonally frozen soils. The strength of freezing is determined by laboratory experiments, through the implementation of a shift of frozen soil relative to the material being tested. There are several different methods for determining the freezing strength, but all of them have some disadvantages: some are cumbersome and difficult to carry out; in others it is impossible to simulate all types of soil freezing conditions.

Materials and methods. To study the freezing strength of glass-reinforced plastic with a frozen soil specimen, the Department of Geotechnics of SPbGASU proposed a new method for determining the freezing strength of soil and underground structures, which makes it possible to reduce the labour intensity of testing, minimize the additional impact on the tested soils during their preparation, and also take into account the peculiarities of soil freezing around the foundation. However, like any new method, it has a number of uncertainties. In the framework of this study, the optimal parameters of the method were experimentally established: the ratio of the diameter of the form to its height, the design of the support, as well as the method of insulation during freezing.

Results. The shape of the tested specimen has a significant influence on the final value of the freezing strength, the construction of the support and the method of insulation of the specimens influence the obtained result during the test. The best solutions are: the use of a ring-shaped support that prevents mould movement and does not prevent ground movement, and the use of insulation by immersing the specimens in the insulation rather than wrapping them in it.

Conclusions. A complete method for determining the frost strength bond of soil with underground structure material is presented, the reliability of the results obtained is superior to that of the data obtained by the GOST method, as shown by the lower value of the coefficient of variation within the results of the control sample of specimens.

KEYWORDS: permafrost, frost strength bond, test method, lab tests, mechanical properties, new method of testing

FOR CITATION: Boyarintsev A.V., Kozlikin E.K., Kozelskikh S.A. Experimental determination of the parameters of the methodology for investigating the frost strength bond of soil and foundation material. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):415-425. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.415-425 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Boyarintsev, Andrey_boyarintsev@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Прочность смерзания мерзлых грунтов с различными материалами является основной характеристикой механики мерзлых грунтов, при помощи которой описывается взаимодействие подземных конструкций с многолетнемерзлыми и сезонно-мерзлыми грунтами.

В отечественной нормативной литературе (СП 22.13330, СП 24.13330, СП 25.13330) величина прочности смерзания применяется при определении несущей способности основания (величина R_{af} в составе формулы) и оценке устойчивости фундамента на действие касательных сил морозного пучения (величина расчетной удельной касательной силы пучения τ_{fn}).

Для экономически эффективного и технически безопасного строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов необходимо знать точное значение прочности смерзания грунтов с материалами подземных конструкций. Являясь сложной характеристикой, зависящей от множества факторов, среди которых: тип и влажность грунта [1], его температура [2, 3], материал конструкций фундамента [4], шероховатость его поверхности [5], а также время [6, 7]; наиболее точным методом установления прочности смерзания служат лабораторные методы, учитывающие полный комплекс факторов, которые будут влиять на грунты при их дальнейшей эксплуатации.

Первые исследования прочности смерзания грунта с материалом фундамента выполнены Н.А. Цытовичем [8]. Разработанный им прибор (рис. 1, а) представляет собой цилиндрическую емкость из кольца 1, вставленную в поддон 2, в дни-

ще которого имеется круглое отверстие 3, предназначенное для продавливания цилиндрической стойки из материала фундамента 4, емкость заполняется грунтом, замораживается до температуры испытания, затем проводится испытание путем нагружения стойки ступенчатой или постоянной нагрузкой до разрушения связей на границе «мерзлый грунт – материал» через наголовник 5 (рис. 1, а). К недостаткам данной методики можно отнести то, что для испытаний требуется специально изготавливать модели фундамента, свойства которых могут отличаться от свойств реальных материалов, используемых в проекте строительства. Кроме того, для реализации испытаний необходима дополнительная оснастка в виде емкости, в которой размещаются испытуемые грунт и модель фундамента. Также следует иметь в виду то, что в процессе укладки грунта в пространство между емкостью и моделью фундамента могут меняться его свойства в виду нарушения структуры.

Похожим принципом действия обладает прибор В.Ф. Ермакова (рис. 1, б) [9], который состоит из стального корпуса 1. Фундамент имитируется пластиной из строительного материала 2. В днище имеется прорезь, в которую устанавливается пластина размером $150 \times 120 \times 40$ мм. Для исключения трения пластины о боковые стенки корпуса в них также устраивают прорезы, закрывающиеся съемными накладками. Прибор заполняется грунтом и устанавливается в холодильную камеру для замораживания грунта. После достижения необходимой температуры грунта прибор помещают под пресс и прикладывают нагрузку к верхнему торцу пластины. Данная методика позволяет покрывать поверхность пластины образцом реального мате-

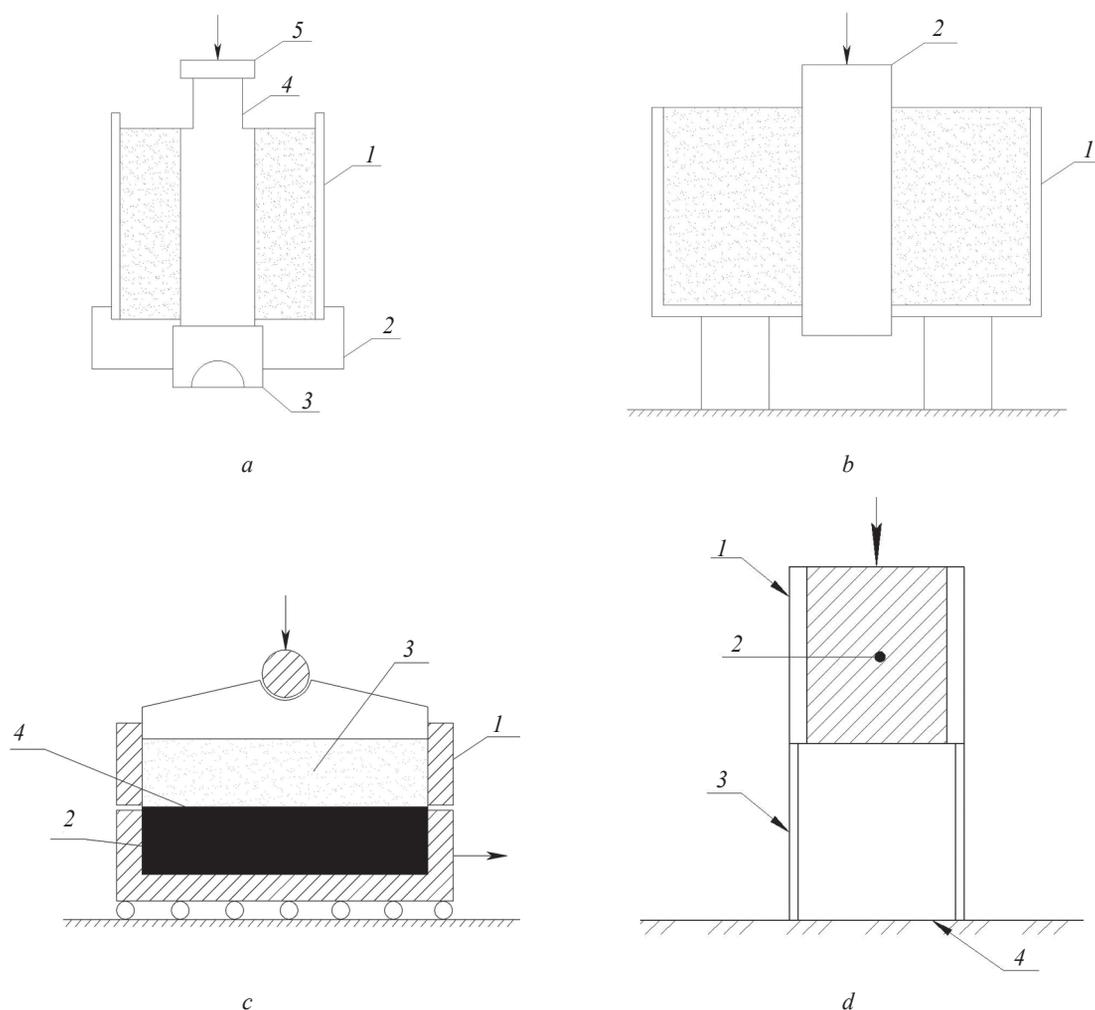


Рис. 1. Способы определения прочности смерзания: *a* — метод Н.А. Цытовича; *b* — метод В.Ф. Ермакова; *c* — метод по ГОСТ 12248.8; *d* — метод по патенту РФ № 2749226

Fig. 1. The methods of determination of frost strength bond: *a* — method of N. Tsitovich; *b* — method of F. Ermakov; *c* — method of GOST 12248.8; *d* — method of patent RU No. 2749226

риала, принимаемого в проекте строительства. Тем не менее этой методике присущи такие недостатки, как: необходимость в дополнительной оснастке, возможность расструктурирования грунта в процессе подготовки эксперимента.

Отечественная нормативная литература рекомендует определять прочность смерзания по ГОСТ 12248.8 (рис. 1, *c*). Методика предполагает проведение опытов на стандартных приборах одноплоскостного среза *I*, где в одной половине размещается образец исследуемого материала фундамента *2*, в другой — образец исследуемого мерзлого грунта *3*, зазор между частями прибора располагается на границе «грунт – материал конструкции» *4*. Применение этой методики позволяет исключить все недостатки приведенных выше методик. Однако следует отметить, что при реализации экспериментов по указанной методике невозможно учесть влияние испытываемого материала на распределение температурных полей в промораживаемом образце грунта, что сказывается на формировании криотекстуры мерзлого грунта на контакте с материалом и, как

следствие, на значении прочности смерзания грунта и материала [10–14].

На кафедре геотехники СПбГАСУ была разработана новая методика определения прочности смерзания грунта и строительных материалов и получен патент РФ № 2749226 [15] (рис. 1, *d*). Форма (корпус) *1*, выполненная из того же материала, что и исследуемый материал фундамента проектируемого здания, имеющая круглое поперечное сечение, заполнена исследуемым мерзлым грунтом *2*, предварительно замороженная вместе с грунтом *2* до требуемой температуры и установленная на пустотелую опору *3*, препятствующую перемещению формы *1* и не препятствующую перемещению грунта *2*, которая стоит на горизонтальной поверхности *4*.

Данный метод испытания позволяет сократить количество используемого в ходе испытания оборудования, отбирать образцы грунта непосредственно на площадке строительства или из выбуренных кернов, что минимизирует риски их расструктурирования. Ввиду того, что образец испытываемого

материала вырезается из проектируемой свайной конструкции, в испытаниях учитываются все особенности свойств материала, из которого будут изготовлены сваи проектируемого здания или сооружения. Процесс промерзания грунта перед испытанием целиком моделирует промерзание грунта в реальных условиях вокруг сваи, учитывая тепло-техническое влияние фундамента на грунт.

Таким образом, предложенная методика является потенциально перспективной для определения мгновенной и длительной прочностей смерзания образцов грунта с материалами подземных конструкций. Кроме того, по ней возможно проведение испытаний с любой заданной скоростью приложения нагрузки, например со скоростью морозного пучения грунта [16–19], что позволит установить удельные касательные силы морозного пучения грунта, воздействующие на конкретный фундамент. Однако, как любая новая методика, она обладает рядом неопределенностей: влияние размеров образцов, способов промораживания образцов, варианты исполнения сопутствующей оснастки могут оказывать влияние на получаемые результаты. Как пример влияния размеров образцов на получаемые результаты испытаний следует отметить результаты экспериментальных исследований, посвященных изучению воздействия кривизны поверхности образца на получаемые значения прочности смерзания [20]. Исследования выполнялись по методике Н.А. Цытовича для

моделей различного диаметра. Результаты показали, что с увеличением диаметра силы смерзания уменьшаются до двух раз, при этом при величине диаметра более 11–15 см значения практически не меняются.

Цель настоящего исследования — экспериментально определить наиболее оптимальные параметры данной методики: размеры формы (корпуса), исполнение опоры, а также влияние утепления образцов при их промораживании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Грунт

Исследования выполнялись на двух типах грунтов: кембрийской текучей глине нарушенного сложения и супеси песчанистой пластичной ненарушенного сложения (рис. 2, а), отобранной в котловане г. Санкт-Петербурга на глубине двух метров (рис. 2, б). Основные характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Размеры формы

Для исследования влияния размеров формы были изготовлены 54 образца из ПВХ труб с разным соотношением диаметра к высоте (диаметр/высота, мм): 50/50, 50/75, 50/100, 75/50, 75/75, 75/100, 100/50, 100/75, 100/100.

Образцы заполнялись грунтом № 1. Перед испытанием образцы утеплялись с трех сторон спосо-

Табл. 1. Физические характеристики испытанных грунтов

Table 1. The physical performances of the tested soils

Номер Number	Влажность / Water content			Число пластично- сти I_p , % Plasticity index I_p , %	Показатель текучести I_L , д. ед. Index of liquid I_L , sub- multiples	Плотность ρ , г/см ³ Soil density ρ , g/cm ³	Плотность твер- дых частиц ρ_s , г/см ³ Density of soil particles ρ_s , g/cm ³
	Естественная W , % Water content of soil W , %	На грани- це текуче- сти W_L , % Liquid limit limit W_L , %	На границе пластичности W_p , % Plastic limit W_p , %				
1	50	48	22	26	1,08	1,81	2,61
2	25,7	28	25	3	0,23	2,00	2,69



а



б



Рис. 2. Создание грунта нарушенной структуры (а); отбор грунта ненарушенной структуры (б)

Fig. 2. The process of soil making with disturbed structure (a); sampling of undisturbed soil (b)

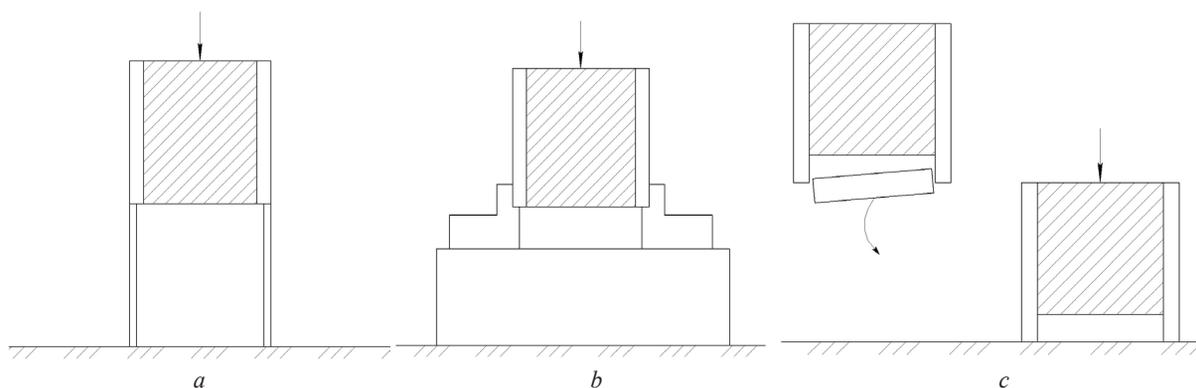


Рис. 3. Схемы конструкций опор, принятых к сравнению: *a* — тип 1: пустотелое кольцо; *b* — тип 2: трехкулачковый зажимной патрон; *c* — тип 3: выполнение полости заглушкой

Fig. 3. The different kind of support: *a* — the hollow ring; *b* — the three jaw chuck; *c* — the cap

бом № 1, промораживались до температуры -6°C , с контролем температуры образцов в процессе их промерзания, и испытывались по указанной ранее методике. В качестве опоры использовался трехкулачковый зажимной патрон.

Тип опоры

Для испытаний были разработаны следующие типы опоры (рис. 3):

- пустотелое кольцо того же диаметра, что и форма;
- трехкулачковый зажимной патрон токарного станка;
- заглушка, формирующая полость определенных размеров внутри формы.

Образцы заполнялись грунтом № 2, утеплялись методом № 3, промораживались до температуры -6°C , с контролем температуры образцов в процессе их промерзания, и испытывались по указанной ранее методике.

В каждой партии было испытано по 6 образцов с соотношением диаметра к высоте (D/H), равным 1,3. Для определения качества утепления оцени-

вался коэффициент вариации полученных значений прочности смерзания внутри каждой партии.

Утепление образцов

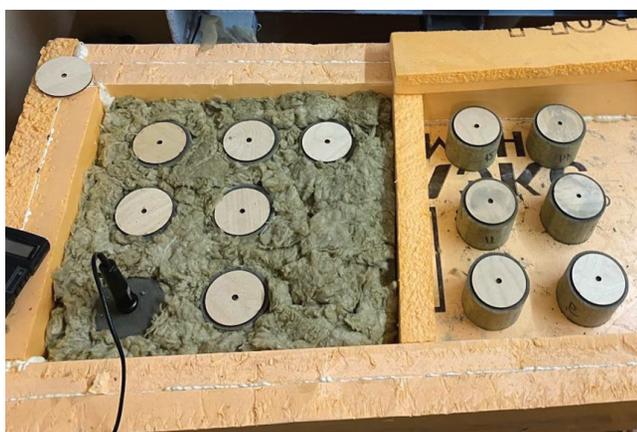
Для исследования влияния утепления и способа его исполнения на получаемый результат испытывались образцы (рис. 4):

- без утепления (рис. 4, *b*);
- способ 1 — обмотка по контуру минеральной ватой и установка на слой экструдированного пенополистирола (рис. 4, *a*);
- способ 2 — погруженные в лоток из экструдированного пенополистирола, заполненного минеральной ватой (рис. 4, *b*).

В каждой партии испытано по шесть образцов с соотношением диаметра к высоте (D/H), равным 1,3. С целью определения качества утепления оценивался коэффициент вариации полученных значений прочности смерзания внутри каждой партии. Для оценки влияния утепления при промерзании сравнивались значения прочности смерзания образцов, замороженных с утеплителем и без него. Испытания проводились по представленной выше методике.



a



b

Рис. 4. Варианты утепления образцов: *a* — способ 1; *b* — способ 2 и без утепления

Fig. 4. The kind of thermal isolation of the specimens: *a* — type 1; *b* — type 2 and without thermal isolation



Рис. 5. Испытание образцов

Fig. 5. The testing process

Испытание образцов

Продавливание образцов производилось на испытательной машине INSTRON W-5196 с максимальным усилием 600 кН и оборудованной криокамерой. Испытания велись также при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. После доставки из морозильной камеры в лабораторию образцы помещались в холодильный шкаф и выстаивались при температуре испытаний, после чего испытывались (рис. 5). В ходе испытаний оборудование позволяет вести автоматическую запись прикладываемых усилий и перемещений образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Размеры формы

В процессе испытания фиксировалась плотность заполнения колец грунтом, а также прочность

смерзания грунта и ПВХ колец. На рис. 6 приведены результаты испытаний в виде зависимостей плотности заполнения колец грунтом и прочности их смерзания от соотношения диаметра кольца образца к его высоте.

Анализ полученных результатов показывает, что на стадии заполнения форм наиболее оптимальными являются формы с соотношением их диаметра к высоте (D/H) в диапазоне от 0,75 до 1,3, что обуславливается низким значением коэффициента вариации, равным 0,56 %, по сравнению со значением коэффициента вариации, достигающим 3,13 %, для образцов с соотношением, равным 2 соответственно. Данный результат может быть объяснен тем, что грунты переминаются в процессе погружения колец и разуплотняются при их выемке. Таким образом,

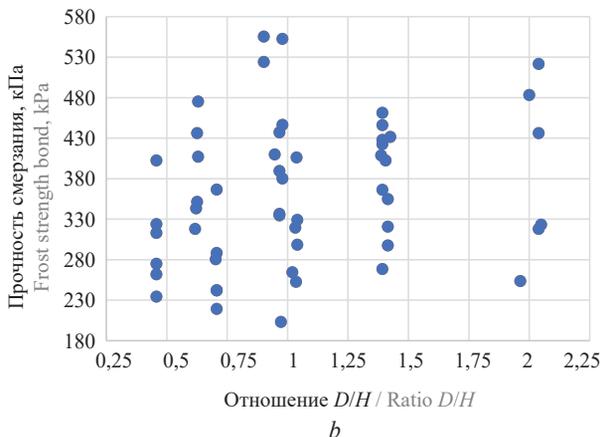
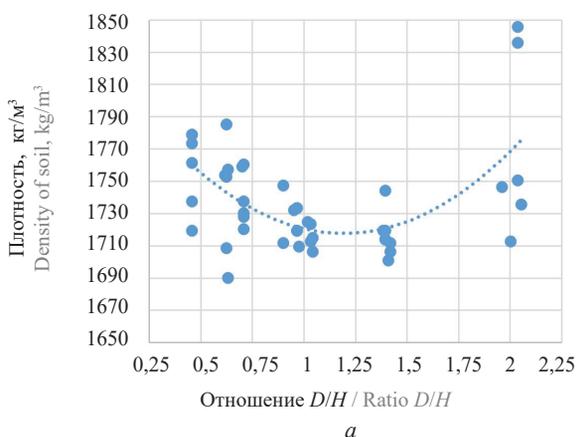


Рис. 6. Зависимости плотности заполнения форм грунтом (a) и прочности смерзания (b) от отношения габаритных размеров формы (D/H)

Fig. 6. Dependences of density of mould filling with soil (a) and frost strength bond (b) on the ratio of mould dimensions (D/H)

применение образцов с соотношением диаметра к высоте 0,75–1,3 способствует сохранению естественной плотности грунта. Принимая во внимание результаты исследований [20], рекомендуется использовать кольца размером не менее 100 мм.

Значения, полученные при определении прочности смерзания, обладают большой погрешностью, коэффициент вариации составляет 14,48–27,32 %. При этом наименьшее значение соответствует образцам с соотношением $D/H = 1,3$.

Сопоставление коэффициентов вариации распределения плотностей образцов и полученных значений прочности смерзания свидетельствует о том, что погрешность в результаты была внесена на последующих этапах испытания: промораживание, продавливание образцов сквозь форму.

Тип опоры

В ходе испытания устанавливались значения прочности смерзания грунта № 2 и формы, выполненной из полимерного композита. Далее сопоставлялись коэффициенты вариации внутри каждой испытанной группы образцов. Результаты сведены в табл. 2.

Результаты испытания показывают, что конструкция исполнения опоры оказывает влияние на получаемый в ходе испытания результат. Среди рассмотренных конструкций опоры наиболее оптимальной является опора, выполненная в виде кольца,

препятствующего движению формы и не препятствующего движению грунта в процессе испытания. Следует отметить, что кольцо опоры перед испытанием торцевалось и выставлялось в горизонтальном положении при помощи уровня.

Утепление образцов

В ходе испытания определялись значения прочности смерзания грунта № 2 и формы, выполненной из полимерного композита. Далее сопоставлялись коэффициенты вариации внутри каждой испытанной группы образцов. Результаты приведены в табл. 3.

Результаты испытания показывают, что способ и качество утепления образцов могут существенно сказаться на получаемых результатах испытания. Так, при утеплении по типу 1 было трудно поддерживать равномерность покрытия образца утеплителем: толщину слоя утепления по периметру образца и его высоте. Кроме того, образовывался зазор между нижней частью, выполненной из экструдированного пенополистирола, и боковой, выполненной из минеральной ваты. Все это способствовало внесению погрешности в испытание.

Наблюдалось и различие между значениями прочности смерзания, полученными для образцов, замороженных с утеплением и без него. Прочность смерзания утепленных образцов выше прочности смерзания образцов, замороженных без утепления на 33,4 %. Данный эффект можно объяснить различием

Табл. 2. Результаты испытания различных типов опор

Table 2. The results of testing of the specimens with different kinds of the support

Тип опоры Type of support	Тип 1. На кольцо Type 1. The hollow ring	Тип 2. На патроне Type 2. The three jaw chuck	Тип 3. С заглушкой Type 3. The cap
Прочность смерзания, кПа Frost strength bond, kPa	516,77	736,34	466,09
	530,15	850,14	450,42
	620,65	404,22	298,36
	613,07	561,16	548,62
	–	–	393,55
Коэффициент вариации, % Variation ratio, %	9,52	30,72	21,51

Табл. 3. Результаты испытания образцов с различными способами утепления

Table 3. The results of testing of the specimens with different types of thermal isolation

Тип утепления Isolation type	Без утепления Without isolation	Способ 1 Type 1	Способ 2 Type 2
Прочность смерзания, кПа Frost strength bond, kPa	490,02	380,04	758,83
	419,04	446,33	697,37
	459,93	555,22	572,44
	591,71	524,00	709,71
	529,7	552,39	709,87
	565,2	–	645,1
Коэффициент вариации, % Variation ratio, %	12,81	15,52	9,51



Рис. 7. Образцы, замороженные без утепления (слева) и с утеплением (справа)

Fig. 7. The specimens which were frozen without thermal isolation (on the left side) and with thermal isolation (on the right side)

ным распространением фронта промерзания внутри образца и, как следствие, в процессах миграции влаги при различных условиях его промерзания [21–23].

На рис. 7 представлены образцы, утепленные и не утепленные при промораживании. На фото можно заметить наличие сухого грунта вдоль кольца, что можно объяснить «поршневым эффектом»: отжатием влаги из грунта при продвижении фронта промерзания [8]. Данный эффект может быть противоположным: миграцией влаги к фронту промерзания при испытаниях грунтов с большим содержанием глинистых частиц и содержанием пор меньшего размера. Это подтверждает, что применение предложенной методики позволяет учесть процессы изменения влажности грунта, его текстуры на контакте с испытуемым материалом.

Таким образом, использование опоры в виде трехручачкового патрона и первого типа утепления при проведении первого опыта объясняет внесение

значительной погрешности в результат испытания, характеризующийся значением коэффициента вариации до 27,32 %.

Сопоставление двух методик

С целью сопоставления результатов разработанной методики [15] и метода по ГОСТ 12248.8 были испытаны две группы по шесть образцов. Для исключения влияния различной шероховатости и гидрофобности материалов поверхность контакта «грунт – материал» была покрыта песком фракции 0,5–1 мм, согласно работе [24]. Результаты сведены в табл. 4.

Результаты эксперимента показывают, что методика, представленная в работе [15], имеет преимущество по сходимости результатов партии, а также по удобству проведения эксперимента. Кроме того, применение ряда мероприятий, таких как: усовершенствование типа опоры, применение размеров образцов определенной формы и способа утепления, способствовали снижению погрешности в испытаниях, что проявилось снижением коэффициента вариации с 30,72 до 6,59 %.

Данный результат свидетельствует об отсутствии влияния кривизны внутренней поверхности образцов в виде колец диаметром 100 мм.

Тем не менее говорить о полном превосходстве представляемой методики над другими преждевременно, поскольку в работе представлены результаты частных испытаний, а не систематических. Для точного определения эффективности методики необходимо ее опытное внедрение в работу инженерно-геологической лаборатории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- форма испытуемого образца имеет существенное влияние на конечное значение прочно-

Табл. 4. Результаты испытания образцов двумя различными методиками

Table 4. The results of testing by two different methods

Метод испытания Test method	ГОСТ 12248.8 GOST 12248.8	Патент РФ № 2749226 Patent RU No. 2749226
Прочность смерзания, кПа Frost strength bond, kPa	1713,07	1912,29
	1909,7	1853,98
	1917,56	1895,80
	1386,66	1940,82
	1909,7	1893,77
Среднее значение*, кПа Average value*, kPa	1862,5	1899,3
Коэффициент вариации, % Variation ratio, %	12,99	6,59

Примечание: * — средние значения представлены после исключения из выборки значений, выявленных как грубые погрешности.

Note: * — average values are presented after exclusion of the gross errors from the tasted specimens.

сти смерзания, поскольку соотношение диаметров образца к его высоте влияет на процесс заполнения формы грунтом, способствуя образованию зон уплотнения или разуплотнения. Оптимальным соотношением габаритных размеров образцов испытуемых материалов являются $D/H = 0,75–1,3$;

- конструкция опоры и способ утепления образцов оказывают влияние на получаемый результат в ходе испытания. Наиболее оптимальными решениями являются: применение опоры в виде кольца, препятствующего движению формы и не препятствующего движению грунта, и использование утепления путем погружения образцов в утеплитель, а не оборачивание им;

- наличие или отсутствие утеплителя оказывает значительное влияние на получаемый результат, что можно объяснить различием распределения температуры и, как следствие, процессами миграции влаги внутри образца при его промерзании. Поэтому для чистоты эксперимента образцы должны промораживаться по схеме, приближенной к условиям промерзания в реальных условиях, что позволяет реализовать предложенная методика;

- разработанный способ определения прочности смерзания грунта с материалами фундамента не уступает существующей методике, представленной в актуальной отечественной нормативной документации, по точности получаемых данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Wen Z., Yu Q., Ma W., Dong S., Wang D., Niu F. et al.* Experimental investigation on the effect of fiber-glass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 131. Pp. 108–115. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.07.009

2. *Волохов С.С., Соловьева Н.В.* Прочность смерзания мерзлых грунтов с материалами трубопроводов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2010. № 5. С. 25–28. EDN SKAOLB.

3. *Волохов С.С.* Влияние шероховатости поверхности материалов фундаментов на прочность смерзания с грунтом в различных условиях // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 1993. № 3. С. 76–81.

4. *Boyarintsev A.V., Lanko S.V.* Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fibre reinforced plastic in frozen soil // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019. Pp. 49–53. DOI: 10.1201/9780429058882-10

5. *Соколов В.М.* Исследование силового воздействия промерзающего грунта на вертикальные элементы трубопроводов : дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1976. 163 с.

6. *Рыжков И.Б., Минкин М.А., Исаев О.Н.* Об определении длительной прочности мерзлых грунтов и несущей способности свай методом статического зондирования // *Жилищное строительство*. 2020. № 9. С. 54–64. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-54-64

7. *Гольдштейн М.Н.* Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании. М. : Трансжелдориздат, 1948. 212 с.

8. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1973. 446 с.

9. *Иоспа А.В., Аксёнов В.И., Шмелёв И.В.* Некоторые результаты испытаний противопучинных и антикоррозионных покрытий для защиты металлических фундаментов на многолетнемерзлых грун-

тах // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015. № 5. С. 27–31. EDN VICRKL.

10. *Johnson J., Buska J.S.* Measurement of frost heave forces on H-piles and pipe piles. State of Alaska department of transportation and public facilities, 1988.

11. *Hou X., Chen J., Yang B., Wang J., Dong T., Rui P. et al.* Monitoring and simulation of the thermal behavior of cast-in-place pile group foundations in permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. P. 103486. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103486

12. *Hou X., Chen J., Jin H., Rui P., Zhao J., Mei Q.* Thermal characteristics of cast-in-place pile foundations in warm permafrost at Beiluhe on interior Qinghai-Tibet Plateau: Field observations and numerical simulations // *Soils and Foundations*. 2020. Vol. 60. Issue 1. Pp. 90–102. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.01.008

13. *Mu Y., Wang G., Yu Q., Li G., Ma W., Zhao S.* Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 121. Pp. 226–236. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.006

14. *Бояринцев А.В., Ланько С.В., Зыбцева А.В.* Теплотехническое влияние фундамента на глубину промерзания и оттаивания грунтов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 5. С. 14–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23. EDN DTZGYI.

15. Патент RU № 2749226. МПК: E02D 1/02. Способ определения прочности смерзания / *Бояринцев А.В.*; заявл. № 2020136455 от 03.11.2020, опубл. 07.06.2021.

16. *Бояринцев А.В., Шорина А.Ю., Родионова Е.С., Матюшина В.А.* Опытное определение скорости морозного пучения для различных типов грунтов по степени пучинистости // *Вестник гражданских*

инженеров. 2022. № 2 (91). С. 66–73. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-66-73. EDN KDPSDC.

17. Long X., Cen G., Cai L., Chen Y. Experimental research on frost heave characteristics of gravel soil and multifactor regression prediction // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2018/5682619

18. Ishikawa T., Kijiya I., Tokoro T., Akagawa S. Estimation of frost heave ratio of soils in contemplation of matric suction under low overburden pressure // *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*. 2015. Vol. 70. Issue 3. Pp. 65–70. DOI: 10.2208/jscejpe.70.I_65

19. Arroyo M., Pineda M., Sau N., Devincenzi M., Perez N. Sample quality examination on silty soils // *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. Vol. 6. Pp. 2873–2878. DOI: 10.1680/jecsme.60678.vol6.445

20. Аксёнов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. М. : Все о мире стр-ва, 2008. 351 с.

21. Кудрявцев С.А. Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезонно-промерзающих грунтов // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2003. № 7. С. 233–240.

22. Лебедеенко Ю.П. Миграция влаги и сегрегационное выделение в льдодисперстных породах : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1978. 136 с.

23. Частотинов Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М. : Наука, 1973. 144 с.

24. Патент RU № 2720595. МПК: E02D 5/24. 2020. Способ повышения несущей способности сваи по грунту / Бояринцев А.В., Ланько С.В.; заявл. № 2019145667 от 31.12.2019, опубл. 12.05.2020.

Поступила в редакцию 11 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 января 2024 г.

Одобрена для публикации 12 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Владимирович Бояринцев** — старший преподаватель кафедры геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1001889; Andrey_boyarintsev@mail.ru;

Евгений Константинович Козликин — инженер 3-й категории; **Петромоделлинг лаб**; 119270, г. Москва, Лужнецкая наб., д. 10а, стр. 6 Э 1, пом. II; eugenekozlikin@gmail.com;

Сергей Александрович Козельских — руководитель подразделения; **Проектное бюро «Резерв»**; 125284, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 31 А, стр. 1; sergey.kozelskikh@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Wen Z., Yu Q., Ma W., Dong S., Wang D., Niu F. et al. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength. *Cold Regions Science and Technology*. 2016; 131:108–115. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.07.009

2. Volokhov S.S., Solov'eva N.V. Strength of soils frozen to pipeline materials. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2010; 5:25–28. EDN SKAOLB. (rus.).

3. Volokhov S.S. The influence of the foundation material roughness to frost strength bond in different conditions. *Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 1993; 3:76–81. (rus.).

4. Boyarintsev A.V., Lanko S.V. Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fibre reinforced plastic in frozen soil. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019; 49–53. DOI: 10.1201/9780429058882-10

5. Sokolov V.M. *The investigation of load impact of the freezing soil to the vertical structures of the pipe lines* : PhD thesis. Leningrad, 1976; 163. (rus.).

6. Ryzhkov I.B., Minkin M.A., Isaev O.N. Determination of long-term strength of frozen soils and bearing capacity of piles by means of cone penetration test. *Housing Construction*. 2020; 9:54–64. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-54-64 (rus.).

7. Goldstein M.N. *The deformations of the embankment and its soil base within soil freezing and melting*. Moscow, Transzheldorizdat, 1948; 212. (rus.).

8. Tsytoich N.A. *Mechanic of frozen soils*. Moscow, Higher School Publ., 1973; 446. (rus.).

9. Iospa A.V., Aksenov V.I., Shmelev I.V. Certain results of antiheave and anticorrosion tests of protective coatings for metal foundations on permafrost. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 5:27–31. EDN VICRKL. (rus.).

10. Johnson J., Buska J.S. *Measurement of frost heave forces on H-piles and pipe piles*. State of Alaska department of transportation and public facilities, 1988.

11. Hou X., Chen J., Yang B., Wang J., Dong T., Rui P. et al. Monitoring and simulation of the thermal behavior of cast-in-place pile group foundations in perma-

frost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022; 196:103486. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103486

12. Hou X., Chen J., Jin H., Rui P., Zhao J., Mei Q. Thermal characteristics of cast-in-place pile foundations in warm permafrost at Beiluhe on interior Qinghai-Tibet Plateau: Field observations and numerical simulations. *Soils and Foundations*. 2020; 60(1):90-102. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.01.008

13. Mu Y., Wang G., Yu Q., Li G., Ma W., Zhao S. Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line. *Cold Regions Science and Technology*. 2016; 121:226-236. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.006

14. Boyarintsev A.V., Lanko S.V., Zybteva A.V. The thermal engineering influence of the foundation on the depth of freezing and thawing of soils. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 5:14-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23. EDN DTZGYI. (rus.).

15. Patent RU No. 2749226. IPC: E02D 1/02. *Method for determining freezing strength* / Boyarintsev A.V.; application No. 2020136455 03.11.2020, publ. 06/07/2021. (rus.).

16. Boyarintsev A.V., Shorina A.Yu., Rodionova E.S., Matyushina V.A. Experimental assessing of frost heaving rate for various types of soils according to the heaving degree. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):66-73. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-66-73. EDN KDPSDC. (rus.).

17. Long X., Cen G., Cai L., Chen Y. Experimental research on frost heave characteristics of gravel soil and multifactor regression prediction. *Advances in*

Materials Science and Engineering. 2018; 2018:1-13. DOI: 10.1155/2018/5682619

18. Ishikawa T., Kijiya I., Tokoro T., Akagawa S. Estimation of frost heave ratio of soils in contemplation of matric suction under low overburden pressure. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*. 2015; 70(3):65-70. DOI: 10.2208/jscejpe.70.I_65

19. Arroyo M., Pineda M., Sau N., Devincenzi M., Perez N. Sample quality examination on silty soils. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 6:2873-2878. DOI: 10.1680/ec-smge.60678.vol6.445

20. Aksyonov V.I. *Saline frozen soils of the Arctic coast as the foundation of structures*. Moscow, All about the world of construction, 2008; 351. (rus.).

21. Kudryavcev S.A. Influence of migratory moisture on the process of frost heaving of seasonally frozen soils *Urban Reconstruction and Geotechnical Engineering*. 2003; 7:233-240. (rus.).

22. Lebedenko Yu.P. *Moisture migration and segregation in ice-dispersed rocks* : PhD thesis. Moscow, 1978; 136. (rus.).

23. Chastotinov L.V. *Moisture migration in freezing non-saturated soils*. Moscow, Nauka Publ., 1973; 144. (rus.).

24. Patent RU No. 2720595. IPC: E02D 5/24. 2020. *A method for increasing the load-bearing capacity of a pile on the ground* / Boyarintsev A.V., Lanko S.V.; application No. 2019145667 31, 2019, publ. 05/12/2020. (rus.).

Received January 11, 2024.

Adopted in revised form on January 11, 2024.

Approved for publication on September 12, 2023.

B I O N O T E S: **Andrey V. Boyarintsev** — senior lecturer at the Department of Geotechnics; **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 2nd, 4 Krasnoarmeiskaya st., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1001889; Andrey_boyarintsev@mail.ru;

Evgeniy K. Kozlikin — engineer 3rd category; **Petromodeling lab**; build. 6 E, 10a Luzhnetskaya embankment, Moscow, 1119270, Russian Federation; eugenekozlikin@gmail.com;

Sergei A. Kozelskikh — head of the region office; **Design bureau “Rezerv”**; build. 1, 31A Leningradskiy ave., Moscow, 125284, Russian Federation; sergey.kozelskikh@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.