

## СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА

УДК 624.139

DOI: 10.15372/KZ20220303

КАСАТЕЛЬНЫЕ СИЛЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ  
ГЛИНИСТЫХ И ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ,  
ДЕЙСТВУЮЩИЕ ВДОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Г. Алексеев

НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО "НИЦ Строительство",  
109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6, Россия  
Московский государственный строительный университет,  
129337, Москва, Ярославское ш., 26, Россия; [adr-alekseev@yandex.ru](mailto:adr-alekseev@yandex.ru)

Приведены результаты экспериментальных исследований касательных сил морозного пучения глинистых и песчаных грунтов в лабораторных условиях на трех установках, с различной скоростью одноплоскостного сдвига при постоянной нормальной нагрузке. Установки позволяли выполнять условно-мгновенный сдвиг, длительные испытания с приложением ступенчатой сдвигающей нагрузки и сдвиг с постоянной скоростью. В результате комплексных исследований установлены зависимости сопротивления сдвигу или эквивалентных ему касательных сил морозного пучения песка и суглинка от влажности (от 10 до 28 %) и температуры (от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$ ) по металлической поверхности. Повышение влажности и понижение температуры грунта приводят к возрастанию сопротивления сдвигу грунта. Сопротивление сдвигу песка до 2 раз превышает аналогичные значения для суглинка при идентичных условиях сдвига, температуре и влажности. Возрастание влажности грунта приводит к увеличению площади контакта частиц грунта через прослойки льда с металлическим фундаментом и к увеличению числа связей между частицами в результате увеличения объема льда. Установлено, что сопротивление условно-мгновенному сдвигу до 3 раз превышает значения предельно длительного сопротивления сдвигу и сдвигу с постоянной скоростью при аналогичных термовлажностных условиях.

**Ключевые слова:** касательные силы морозного (криогенного) пучения грунтов, устойчивое сопротивление сдвигу мерзлого грунта по поверхности фундамента, лабораторные исследования.

TANGENTIAL FROST HEAVING FORCES  
OF CLAY AND SANDY SOILS ACTING ALONG THE METAL SURFACE

A.G. Alekseev

Gersevanov NIIOSP, JSC "Construction", 2nd Institutskaya str. 6, Moscow, 109428, Russia  
Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye sh. 26, Moscow, 129337, Russia; [adr-alekseev@yandex.ru](mailto:adr-alekseev@yandex.ru)

The results of experimental studies of the tangential frost heaving forces of clay and sandy soils in laboratory conditions on three installations with different single-plane shear rates at constant normal load are presented. The installations made it possible to perform conditionally instantaneous shift, long-term tests with the application of a stepwise shifting load and a shift at a constant speed. As a result of complex studies, the dependences of shear resistance or equivalent tangential forces of frost heaving of sand and loam on water content (from 10 to 28 %) and temperature (from 0 to  $-10^{\circ}\text{C}$ ) on the metal surface have been established. An increase in soil water content and a decrease in soil temperature leads to an increase in the resistance to soil shear. The shear resistance of sand is up to 2 times higher than similar values for loam under identical shear conditions, temperature and water content. An increase in soil moisture leads to an increase in the contact area of soil particles through ice layers with a metal foundation and to an increase in the bonds between the particles as a result of an increase in the volume of ice. It is established that the resistance to conditionally instantaneous shear is up to 3 times higher than the values of extremely long-term shear resistance and shear at a constant speed under similar thermal humidity conditions.

**Key words:** tangential frost heaving forces of soils, stable resistance to the shift of frozen soil along the foundation surface, laboratory studies.

## ВВЕДЕНИЕ

При устройстве фундаментов в пучинистых грунтах ниже глубины сезонного промерзания на фундамент действуют силы морозного пучения,

направленные вдоль его боковой поверхности. Под действием сил морозного пучения фундаменты деформируются – перемещаются вверх,

причем по результатам некоторых наблюдений перемещение достигает 15 см и более, а величина касательных сил пучения превышает 200 кН [Сафронов, 1985; Иванов и др., 2020; Шулятьев, 2020]. Деформирование сооружений под действием касательных сил морозного пучения приводит к значительным затратам на восстановление поврежденных конструкций. Поэтому оценка величины касательных сил морозного пучения является важной научной и практической задачей.

Касательные силы морозного пучения достаточно активно исследовались в Советском Союзе [Далматов, 1957; Дубнов, 1967; Перетрухин, 1967; Орлов и др., 1977]. Проведенные Б.И. Далматовым [1957], а затем Ю.Д. Дубновым [1967] исследования в лабораторных условиях позволили установить следующую закономерность: величина устойчивых сил смерзания близка к величине касательных сил морозного пучения грунтов. В качестве расчетной характеристики следует принимать установившуюся величину сопротивления смерзания при определенных мерзлотно-грунтовых условиях [Дубнов, 1967]. Опыты Ю.Д. Дубнова показали, что последовательное увеличение или уменьшение скорости перемещения грунта по модели фундамента не изменяет величину устойчивого сопротивления смерзания при условии, что скорость перемещения грунта отличается не более чем в 10 раз. Существенное влияние оказывает изменение скорости перемещения грунта в 50–100 раз, что меняет устойчивое сопротивление смерзания на 40–50 %. В природных условиях резких изменений скорости перемещения грунта по фундаменту не бывает, поэтому влияние скорости при измерении устойчивого сопротивления смерзания в лабораторных условиях можно не учитывать. Для сокращения времени эксперимента рекомендуемая скорость перемещения грунта по материалу фундамента составляет 10–20 мм/сут.

Аналогичные зависимости касательных сил морозного пучения и деформации пучения от времени содержатся в зарубежных работах (например, [Penner, 1974]).

В связи с трудоемкостью полевой метод исследования морозного пучения грунтов не нашел широкого применения в практике строительства и используется исключительно в научных целях [Сафронов, 1985; Иванов и др., 2020; Шулятьев, 2020], хотя единственный нормативный документ России [ГОСТ 27217-2012, 2013] разработан именно для полевых исследований касательных сил пучения грунтов. Зарубежные нормативные документы [ASTM D 5918-063, 2006; BS 812-124:2009, 2009; Eurocode 7, 2013] также не содержат требований к определению касательных сил пучения грунта и методов их определения.

В 2016 г. при участии автора разработан стандарт по лабораторному определению удельных

касательных сил морозного пучения [ГОСТ Р 56726-2015, 2016]. Документ учитывал единственный метод определения касательных сил морозного пучения грунтов в лабораторных условиях [Руководство..., 1973], не нашедший широкого применения из-за сложности конструкции экспериментальной установки.

Целью настоящего исследования является оптимизация определения интегральной касательной силы пучения с учетом термовлажностного режима промерзающих пучинистых грунтов. Эксперименты выполнялись тремя методами, использующими различную скорость сдвига грунта по металлическому фундаменту (условно-мгновенные испытания, длительные и испытания с постоянной скоростью), для песчаных и глинистых грунтов. Полученные результаты могут использоваться при инженерно-геологических изысканиях и выполнении расчетов фундаментов на пучинистых грунтах.

#### Методика определения касательных сил морозного пучения грунтов в лабораторных условиях

Эксперименты проводились тремя лабораторными методами: 1) условно-мгновенные испытания, 2) длительные испытания с приложением ступенчатой нагрузки, 3) сдвиг с постоянной скоростью. Используемые экспериментальные установки позволяли задавать нагрузки как в нормальном, так и в касательном направлениях по отношению к исследуемому образцу, обеспечивая одноплоскостной сдвиг.

Нормальное напряжение задавалось для всех установок одинаковым и составляло 0.1 МПа. Исследования проводились для двух типов грунта: суглинка и песка, характеристики которых представлены в таблице. Влажность суглинка задавалась равной 10, 20, 28 %, песка – 10, 15, 20 %. Исследования проводились для металлической плашки из стали марки 09Г2С. Число повторных определений составило 3.

**Метод исследования условно-мгновенного сопротивления сдвигу по поверхности смерзания.** Испытания по определению значения условно-мгновенного сопротивления сдвигу по поверхности смерзания проводились на приборе ВСВ-25, схема которого и методика проведения работ изложены в [Руководство..., 1973]. В верхней части срезной каретки устанавливался образец грунта в металлическом кольце, в нижней обойме располагался образец фундамента в виде металлической плашки.

Образец грунта устанавливался в прибор и нагружался заданной нормальной нагрузкой с помощью динамометра. К образцу фундамента быстро (более 100 мм/сут), но не допуская удара, прикладывалась непрерывно и равномерно воз-

## Физические характеристики грунтов при исследовании касательных сил морозного пучения

Наименование грунта*	Содержание частиц (%) разного размера (мм)							$C_u$	$W_g$	$\rho_s$	$W_L/W_{sat}$	$W_p$	$I_p$	$I_{om}$
	1–0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.002	<0.002							
	$A_{0.5}$	$A_{0.25}$	$A_{0.1}$	$A_{0.05}$	$A_{0.01}$	$A_{0.002}$	$A_0$							
Песок пылеватый, неоднородный	1.3	7.4	53.4	28.2	2.6	4.8	2.3	3.21	0.6	2.60	–/17.0	–	–	0.7
Суглинок пылеватый, тяжелый	0.8	2.7	15.2	17.7	28.7	20.4	14.5	–	2.4	2.61	30.8/–	18.7	12.1	2.4

Примечание.  $C_u$  – степень неоднородности грансостава;  $W_g$  – гигроскопическая влажность, %;  $\rho_s$  – плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;  $W_L/W_{sat}$  – влажность на границе текучести/полная влагоемкость, %;  $W_p$  – влажность на границе раскатывания, %;  $I_p$  – число пластичности;  $I_{om}$  – относительное содержание органического вещества, %.

\* По: [ГОСТ 25100-2011, 2013].

растающая сдвигающая нагрузка. Продолжительность испытания составляла 20–30 с. Эксперимент заканчивался при отрыве металлической плашки от грунта или при перемещении образца грунта без дальнейшего увеличения нагрузки. Значение условно-мгновенного сопротивления грунта сдвигу по поверхности смерзания определялось как частное от деления разрушающего усилия на площадь образца. Температура испытаний составила 0, –1, –2, –4, –6 и –10 °С.

**Метод исследования предельно длительно-го сопротивления сдвигу.** Испытания по определению значения предельно длительного сопротивления сдвигу по поверхности смерзания грунта с металлической поверхностью проводились по методу, изложенному в [ГОСТ 12248-2010, 2012], в сдвиговых приборах. В нижней части срезной каретки прибора устанавливали образец фундамента, в верхней части корпуса прибора встроено металлическое кольцо, в которое помещали исследуемый грунт.

Каретка с образцом фундамента и примороженным образцом грунта помещалась в прибор, после чего устанавливался динамометр, с помощью которого поддерживалась нормальная нагрузка в течение испытания, а также датчик перемещения, затем ступенчато прикладывалась сдвигающая нагрузка.

Нагрузка на первой ступени испытания принималась с учетом температуры и типа грунта по таблице 6.2 [ГОСТ 12248-2010, 2012], а приращение касательной нагрузки – с учетом таблицы 6.3 [ГОСТ 12248-2010, 2012]. Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условной стабилизации деформации. За условную стабилизацию деформации принималось приращение деформации, не превышающее 0.01 мм за 12 ч. Следующая ступень нагрузки прикладывалась к образцу после достижения стабилизации деформации на предшествующей ступени. Если на очередной ступени нагру-

жения стабилизации деформации не наблюдалось, нагрузку выдерживали до развития деформации с постоянной скоростью, при которой два следующих друг за другом 12-часовых интервала остаются постоянными.

Испытание прекращали, если постоянная скорость деформирования установлена не менее чем для двух ступеней сдвигающей нагрузки либо при развитии деформаций с увеличивающейся скоростью. Предельно длительное значение сопротивления сдвигу по поверхности смерзания с материалом фундамента определялось как наибольшее касательное напряжение, при котором произошла стабилизация деформации образца при заданном нормальном напряжении. Температура испытаний составила 0, –1, –2, –6, –10 °С.

Обработка экспериментальных данных выполнялась по кривым  $\varepsilon - t$  ползучести ( $\varepsilon$ , мм;  $t$ , ч) и зависимости между сдвигающим напряжением и суммарной деформацией на момент стабилизации  $\ln \tau - \ln \varepsilon$  в логарифмических координатах согласно [ГОСТ 12248-2010, 2012].

**Метод исследования сопротивления сдвигу при постоянной скорости.** Исследования сдвига с постоянной скоростью или удельных касательных сил морозного пучения проводились в экспериментальной установке, обеспечивающей сдвиг по фиксированной плоскости с постоянной скоростью перемещения образца фундамента по образцу грунта в диапазоне 5–20 мм/сут [Чевреву, Алексееву, 2016].

Установка имеет каретку, в верхней части которой содержится обойма для образца грунта, а в нижней – образец фундамента. На образец грунта прикладывалась нормальная нагрузка, на образец фундамента – сдвигающая нагрузка с постоянной скоростью. Сопротивление грунта сдвигу измерялось датчиком силы с точностью до 0.01 МПа, перемещение образца во времени замерялось датчиком перемещения с точностью до 0.01 мм.

Устойчивое сопротивление сдвигу в опыте фиксировалось в момент, когда максимальное перемещение образца материала фундамента относительно образца грунта достигало не менее 10 мм.

Опыты проводились при пяти значениях температуры: 0, -1, -2, -4 и -6 °С. При температурах -1, -2, -4 °С задавалась постоянная скорость перемещения каретки 0.42 мм/ч (10 мм/сут), при температуре -6 °С скорость перемещения каретки задавалась 0.21 мм/ч (5 мм/сут), так как обеспечить скорость сдвига 10 мм/сут при данной температуре (-6 °С) не представляется возможным в связи со срывом образцов.

**Методика подготовки образцов грунта для проведения испытаний на сдвиг.** Образцы грунта и фундамента для всех испытательных установок идентичны, поэтому подготовка образцов выполнялась аналогично. Грунт размещался в металлическом кольце диаметром 71.5 мм и высотой 35 мм.

Исследуемый грунт при комнатной температуре закладывали в кольцо методом послойного уплотнения после чего совмещали с образцом фундамента. После приготовления образца грунта и испытания контролировали плотность и влажность грунта.

Подготовленные таким образом образцы с грунтом и фундаментом помещали в морозильную камеру с низкой отрицательной температурой (-26 °С) для промораживания и формирования массивной криогенной текстуры. После смораживания образцы грунта и фундамента переносили в морозильную камеру, в которой поддерживалась температура испытаний для проведения эксперимента. Перед испытаниями образцы грунта и фундамента выдерживали в морозильной камере при заданной температуре не менее 12 ч.

### Закономерности развития касательных сил морозного пучения грунтов

Исследования, проведенные тремя лабораторными методами с различной скоростью приложения сдвигающей нагрузки, позволили выявить

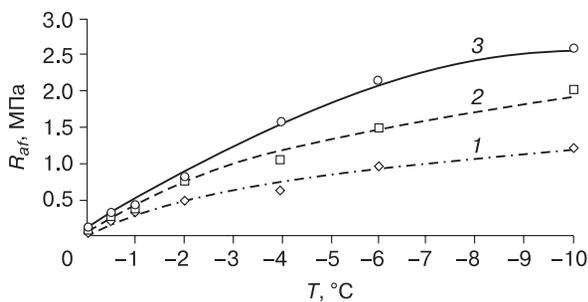


Рис. 1. Зависимость условно-мгновенного сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) мерзлого песка от температуры испытаний и начальной влажности:

1 –  $W = 10\%$ ; 2 –  $W = 15\%$ ; 3 –  $W = 20\%$ .

закономерности развития касательных сил пучения или устойчивого сопротивления сдвигу от температуры и влажности для песчаных и глинистых грунтов по поверхности смерзания с металлической поверхностью.

**Зависимость условно-мгновенного сопротивления сдвигу по поверхности смерзания от температурно-влажностного режима.** Понижение температуры песчаного грунта от 0 до -10 °С приводит к увеличению условно-мгновенного сопротивления сдвигу от 0.04 до 1.21 МПа при влажности 10 %, от 0.07 до 2.01 МПа при влажности 15 %, от 0.09 до 2.58 МПа при влажности 20 % (рис. 1).

Для суглинка понижение температуры испытаний от 0 до -10 °С привело к возрастанию сопротивления сдвигу от 0.07 до 1.14 МПа при влажности 10 %, от 0.10 до 1.39 МПа при влажности 20 %, от 0.18 до 1.65 МПа при влажности 28 % (рис. 2). Очевидной и ярко выраженной является зависимость сопротивления сдвига от влажности, с увеличением которой сопротивление сдвигу возрастает в рассматриваемом диапазоне температур.

Сопротивление условно-мгновенному сдвигу песка при исследованных значениях температур существенно выше, чем у суглинка.

Температура грунта является определяющей в формировании сил смерзания влажного грунта и конструкции фундамента. При высокой температуре грунта (до -1 °С) сопротивление сдвигу имеет низкие значения (менее 0.5 МПа) как для суглинка, так и для песка; дальнейшее понижение температуры приводит к практически линейному возрастанию сопротивления сдвигу.

**Зависимость предельно длительного сопротивления сдвигу от температурно-влажностного режима грунтов.** Предельно длительное сопротивление сдвигу при увеличении влажности образца грунта и понижении температуры испытаний от 0 до -10 °С, как для песка, так и для суглинка, возрастает. При этом предельно длительное сопротивление сдвигу для песчаного грунта увеличивалось от 0.02 до 0.42 МПа при

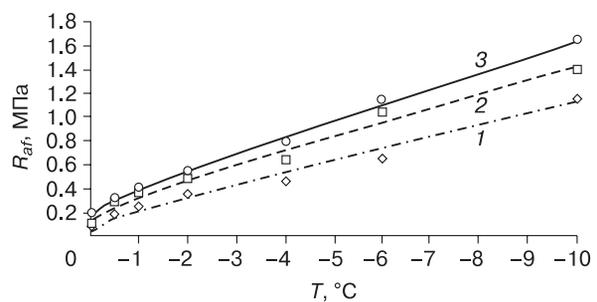


Рис. 2. Зависимость условно-мгновенного сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) мерзлого суглинка от температуры испытаний и начальной влажности:

1 –  $W = 10\%$ ; 2 –  $W = 20\%$ ; 3 –  $W = 28\%$ .

влажности 10 %, от 0.02 до 0.52 МПа при влажности 15 %, от 0.03 до 0.70 МПа при влажности 20 % (рис. 3). Для суглинка предельно длительное сопротивление сдвигу возрастало от 0.01 до 0.33 МПа при влажности 10 %, от 0.02 до 0.37 МПа при влажности 20 %, от 0.03 до 0.49 МПа при влажности 28 % (рис. 4).

Значения предельно длительного сопротивления сдвигу у песка существенно выше, чем у суглинка: при влажности 10 % разница составила 0.05–0.09 МПа; при влажности 20 % разница 0.05–0.33 МПа.

В зоне высоких температур (0...–1 °С) отмечен более интенсивный рост величины предельно длительного сопротивления сдвигу, чем при низких температурах (–1...–10 °С), что объясняется переходом грунта из талого состояния в мерзлое и увеличением сопротивления сдвигу не только за счет сцепления грунта с фундаментом, но и за счет смерзания данных материалов.

Предельно длительное сопротивление сдвигу как глинистых, так и песчаных грунтов зависит от термовлажностного режима и возрастает при понижении температуры и увеличении влажности грунта.

Ступенчатое возрастание сдвигающей нагрузки при испытаниях допустимо применять при оценке величины касательных сил морозного пучения для условий равномерного промерзания грунта и увеличения внешней нагрузки на площадь сдвига. Однако полученное значение не отражает в полной мере искомую величину удельной касательной силы морозного пучения, которая характеризуется сопротивлением трения скольжения мерзлого грунта по поверхности смерзания. В испытаниях по определению предельно длительного сопротивления сдвигу оценивают величину, при которой деформации перемещения фундамента стабилизируются, т. е. трения скольжения не возникает. Длительные испытания предшествуют стадии скольжения мерзлого

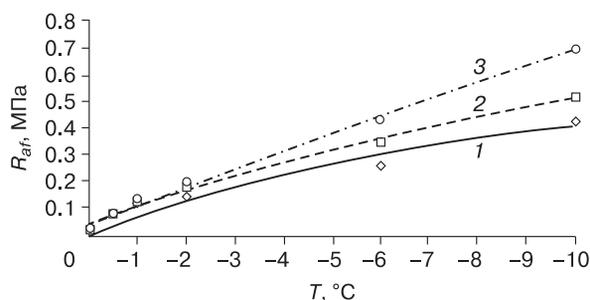


Рис. 3. Зависимость предельно длительного сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) мерзлого песка по металлической поверхности от температуры испытаний и начальной влажности:

1 –  $W = 10\%$ ; 2 –  $W = 15\%$ ; 3 –  $W = 20\%$ .

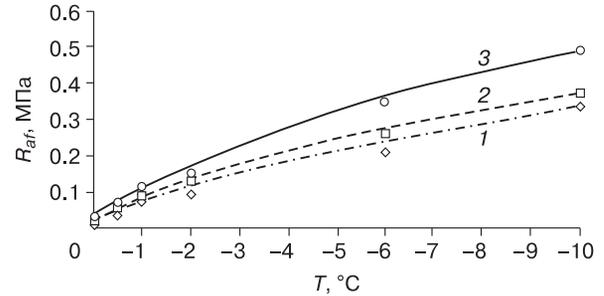


Рис. 4. Зависимость предельно длительного сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) мерзлого суглинка по металлической поверхности от температуры испытаний и начальной влажности:

1 –  $W = 10\%$ ; 2 –  $W = 20\%$ ; 3 –  $W = 28\%$ .

грунта по поверхности фундамента. Объективная величина удельных касательных сил морозного пучения должна определяться при условии перемещения мерзлого грунта по фундаменту со скоростью, характеризующей сопротивление трения скольжения. Для оценки искомой величины следующая серия испытаний проводилась при заданной постоянной скорости перемещения грунта по контакту с фундаментом.

**Зависимость удельных касательных сил морозного пучения от температурно-влажностного режима грунтов.** Удельные касательные силы морозного пучения грунта определялись по значению устойчивого сопротивления сдвигу образца мерзлого грунта относительно модели металлического фундамента, перемещающегося с постоянной скоростью.

При понижении температуры эксперимента от 0 до –6 °С значения удельных касательных сил пучения для исследуемых грунтов возрастали. Для песчаного грунта касательные силы увеличивались от 0.02 до 0.08 МПа при влажности 10 %, от 0.03 до 0.12 МПа при влажности 15 %, от 0.05 до 0.15 МПа при влажности 20 % (рис. 5). Для су-

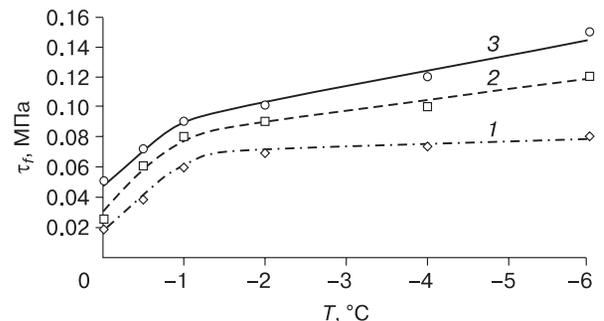
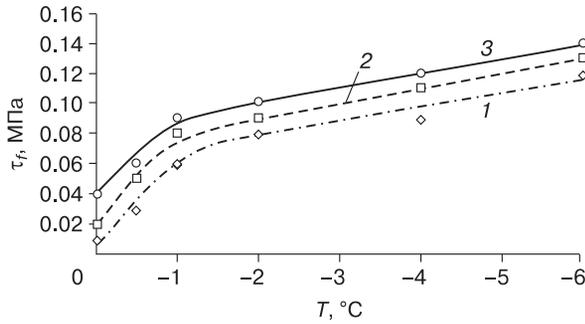


Рис. 5. Зависимость удельных касательных сил пучения ( $\tau_f$ ) мерзлого песка по металлической поверхности от температуры испытаний и начальной влажности:

1 –  $W = 10\%$ ; 2 –  $W = 15\%$ ; 3 –  $W = 20\%$ .



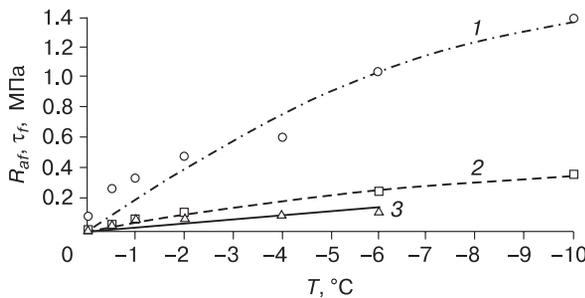
**Рис. 6. Зависимость удельных касательных сил пучения ( $\tau_f$ ) мерзлого суглинка по металлической поверхности от температуры испытаний и начальной влажности:**

1 –  $W = 10\%$ ; 2 –  $W = 20\%$ ; 3 –  $W = 28\%$ .

глинка удельные касательные силы морозного пучения возрастали от 0.01 до 0.12 МПа при влажности 10 %, от 0.02 до 0.13 МПа при влажности 20 %, от 0.04 до 0.14 МПа при влажности 28 % (рис. 6).

Смерзание грунта с фундаментом обусловлено возникновением льдоцементных связей, формирующихся в результате замерзания воды на контакте грунта и фундамента. При высоких температурах при проведении экспериментов, когда не вся поровая вода замерзла, сопротивление сдвигу складывалось из сил смерзания и сил сцепления частиц грунта с материалом фундамента через пленки воды, при нулевых температурах – только из сил сцепления грунта и фундамента.

Силы смерзания песчаного грунта и фундамента выше, чем для суглинистого, в связи с тем, что у песчаных грунтов отсутствует двойной электрический слой вокруг песчаных частиц, в отличие от глинистых. Кроме того, размер песчаных частиц значительно больше глинистых, что обуславливает увеличение сил сцепления.



**Рис. 7. Зависимость сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) и удельных касательных сил пучения ( $\tau_f$ ) от температуры для суглинка влажностью 20 %:**

1 – метод 1 – условно-мгновенное сопротивление сдвигу; 2 – метод 2 – предельно длительного сопротивления сдвигу; 3 – метод 3 – сдвиг с постоянной скоростью  $\tau_f$ .

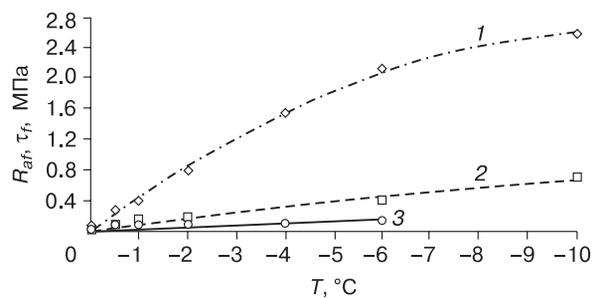
С понижением температуры грунта уменьшается количество незамерзшей воды, увеличивается площадь смерзания частиц грунта с фундаментом.

Увеличение влажности и, соответственно, степени заполнения пор грунта водой в образце приводит к возрастанию площади контакта частиц грунта через прослойки льда с фундаментом, увеличению количества связей между частицами из-за роста объема льда. Данное обстоятельство приводит к общему возрастанию сил сопротивления сдвигу более влажных грунтов.

При увлажнении грунта в первую очередь формируется прочносвязанная вода, затем рыхлосвязанная и наконец свободная. При влажности 10 % основная часть воды находится в связанном состоянии, что обеспечивает высокое содержание незамерзшей воды в глинистом грунте при отрицательной температуре. Таким образом, с уменьшением влажности грунта количество льда в грунте значительно сокращается, а следовательно, уменьшаются площадь смерзания и сопротивление сдвигу.

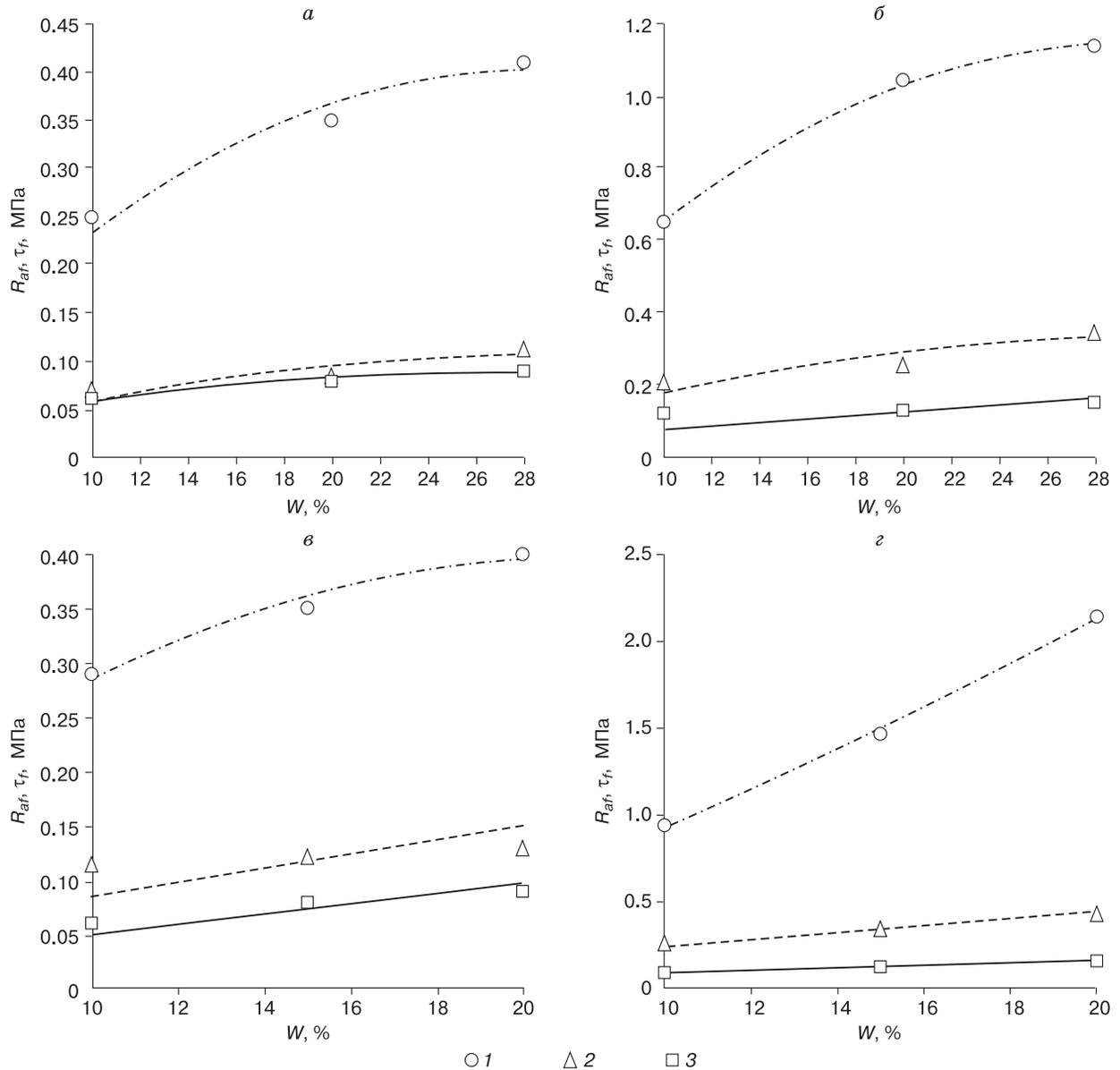
Исследования показали аналогичную зависимость сопротивления сдвигу от температуры для всех трех методов испытаний: с понижением температуры грунта от 0 до  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  отмечено увеличение сопротивления сдвигу (рис. 7, 8). Повышение сопротивления сдвигу характерно при увеличении влажности грунта, так, для песчаных грунтов характерны более высокие значения сопротивления сдвигу, чем для суглинка (рис. 9). Рост влажности песка приводит к увеличению сцепления частиц песка (размер которых значительно больше глинистых) и образца фундамента.

При условно-мгновенном сдвиге значение сопротивления сдвигу существенно (более чем в 3 раза) превышает значения сопротивления сдвигу, полученные при испытаниях в других установках. Значение длительного сопротивления сдвигу



**Рис. 8. Зависимость сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) и удельных касательных сил пучения ( $\tau_f$ ) от температуры для песка влажностью 20 %:**

1 – метод 1; 2 – метод 2; 3 – метод 3.



**Рис. 9. Зависимость сопротивления сдвигу ( $R_{af}$ ) и удельных касательных сил пучения ( $\tau_f$ ) от влажности ( $W$ ):**

*a* – суглинок,  $T = -1^\circ\text{C}$ ; *б* – суглинок,  $T = -6^\circ\text{C}$ ; *в* – песок,  $T = -1^\circ\text{C}$ ; *з* – песок,  $T = -6^\circ\text{C}$ ; 1 – метод 1; 2 – метод 2; 3 – метод 3.

несколько превышает значение, полученное при сдвиге с постоянной скоростью.

Величина сопротивления сдвигу или касательные силы пучения, определенные по методам 2 и 3, идентичны по направлению, но по величине различаются на 10–40 %. Значения сопротивления сдвигу, полученные по методу 2 (предельно длительный сдвиг), превышают значения, полученные по методу 3. Значения сопротивления сдвигу, полученные условно-мгновенным сдвигом (метод 1), существенно выше (до 5 раз) значений, полученных методами 2 и 3.

Проведенные исследования показали, что наиболее достоверная величина удельных касательных сил морозного пучения, соответствующая сопротивлению трения скольжения мерзлого грунта по материалу фундамента, может быть определена в установке, обеспечивающей сдвиг грунта по модели фундамента с постоянной скоростью.

Определение удельных касательных сил морозного пучения методом сдвига с постоянной скоростью характерно для большинства случаев пучения грунтов при промерзании возле фунда-

мента, когда происходит интегральное возрастание глубины промерзания и, как следствие, давления морозного пучения.

Однако существуют частные случаи, когда возможно резкое промерзание грунта и, как следствие, быстрое деформирование грунта и фундамента в результате пучения, особенно если промерзший слой грунта находился в стесненных условиях. Данные обстоятельства могут возникать при резком понижении температуры воздуха и при искусственном промораживании грунта. В таких случаях, когда давление пучения, в большей степени характеризующееся силами кристаллизации поровой воды при промерзании, повышается со значительной скоростью ( $>100$  мм/сут), величину касательных сил морозного пучения рекомендуется определять условно-мгновенными испытаниями.

### ВЫВОДЫ

1. Подобраны три лабораторных метода оценки величины сопротивления сдвигу, эквивалентной касательной силе морозного пучения: условно-мгновенные испытания, длительные испытания с приложением ступенчатой нагрузки и сдвиг с постоянной скоростью.

2. По результатам комплексных исследований установлены зависимости сопротивления сдвигу песка и суглинка от влажности (от 10 до 28 %) и температуры (от 0 до  $-10$  °С): с повышением влажности грунта и понижением температуры происходит возрастание сопротивления сдвигу грунта. Сопротивление сдвигу песчаных грунтов вдвое превышает аналогичные значения для суглинка. Силы смерзания песчаного грунта и фундамента выше, чем у суглинка, в связи с тем, что у песчаного грунта отсутствует двойной электрический слой, а размер песчаных частиц значительно больше размера глинистых. С понижением температуры уменьшается количество незамерзшей воды и увеличивается площадь смерзания частиц грунта с фундаментом.

3. Увеличение влажности и степени заполнения пор грунта водой в образце приводит к увеличению площади контакта частиц грунта через прослойки льда с фундаментом; кроме того, с ростом влажности и увеличением объема льда возрастает количество связей между частицами.

4. Определено, что сопротивление условно-мгновенному сдвигу (скорость более 100 мм/сут) до 3 раз превышает значения удельно-длительного сопротивления сдвигу и удельных касательных сил морозного пучения.

### Литература

**ГОСТ 12248-2010.** Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М., Стандартинформ, 2012, 77 с.

**ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2013, 44 с.

**ГОСТ 27217-2012.** Грунты. Метод полевого определения удельных касательных сил морозного пучения. М., Стандартинформ, 2013, 10 с.

**ГОСТ Р 56726-2015.** Грунты. Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения. М., Стандартинформ, 2016, 6 с.

**Далматов Б.И.** Воздействие морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений. Л.; М., Госстройиздат, 1957, 60 с.

**Дубнов Ю.Д.** Лабораторные исследования касательных сил пучения // Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. М., Транспорт, 1967, с. 55–60.

**Иванин А.С., Кумаллагов В.А., Смирнов Н.В.** Полевые и лабораторные исследования действия касательных сил морозного пучения грунтов на свайные фундаменты // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2020, т. 10, № 5, с. 460–469.

**Орлов В.О.** Морозное пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В.О. Орлов, Ю.Д. Дубнов, Н.Д. Меренков. Л., Стройиздат, 1977, 183 с.

**Перетрухин Н.А.** Сила морозного выпучивания фундаментов // Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. М., Транспорт, 1967, с. 25–54.

**Руководство** по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1973, 191 с.

**Сафронов Ю.В.** Морозное пучение грунтов и методика полевого определения касательных сил пучения: дис. ... канд. техн. наук. М., 1985, 185 с.

**Чевереv В.Г., Алексеев А.Г.** Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения (к проекту ГОСТ) // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 3, с. 72–79.

**Шулятьев О.А.** Исследования взаимодействия пучинистого грунта со свайным фундаментом // Вестн. НИЦ Строительство, 2020, № 3 (26), с. 105–120.

**ASTM D 5918-06.** Standard test methods for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils // ASTM International, 2006, 12 p.

**BS 812-124:2009.** Testing Aggregates. Method for Determination of Frost Heave // British Standards Institution, 2009, 38 p.

**Eurocode 7:** Geotechnical Design Worked examples // Publications Office of the European Union, 2013, 159 p.

**Penner E.** Uplift forces on foundations in frost heaving soils // Can. Geotechn. J., 1974, No. 11, p. 323–338.

### References

GOST 12248-2010. Soils. Methods of laboratory determination of strength and deformability characteristics. Moscow, Standartinform, 2012, 77 p. (in Russian).

GOST 25100-2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2013, 44 p. (in Russian).

GOST 27217-2012. Soils. Method of field determination of specific tangential forces of frost heaving. Moscow, Standartinform, 2013, 10 p. (in Russian).

GOST R 56726-2015. Soils. Laboratory method for determining specific tangential forces of frost heaving. Moscow, Standartinform, 2016, 6 p. (in Russian).

- Dalmatov B.I. Vozdejstvie moroznogo pucheniya gruntov na fundamenty sooruzhenij [Effect of Frost heaving on Foundations of Structures]. Leningrad; Moscow, Gosstroizdat, 1957, 60 p. (in Russian).
- Dubnov Yu.D. Laboratory tests of tangential forces of frost heave. In: Frost heave of soil and ways to protect structures from its effects. Moscow, Transport, 1967, p. 55–60 (in Russian).
- Ivanin A.S., Kumallagov V.A., Smirnov N.V. Field and laboratory studies of the action of tangential forces of frost heaving of soils on pile foundations. Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products, 2020, vol. 10, No. 5, p. 460–469 (in Russian).
- Orlov V.O., Dubnov Yu.D., Merenkov N.D. Moroznoe puchenie promerzayushchikh gruntov i ego vliyanie na fundamenty sooruzhenij [Heaving of frozen soils and its effect on the foundations of structures]. Leningrad, Stroiizdat, 1977, 183 p. (in Russian).
- Peretrukhin N.A. The strength of frosty buckling of foundations. In: Frost heave of soil and ways to protect buildings from its effects. Moscow, Transport, 1967, p. 25–54 (in Russian).
- Guidelines for determining the physical, thermal and mechanical characteristics of frozen soils. Moscow, Stroiizdat, 1973, 191 p. (in Russian).
- Safronov Yu.V. Frost heaving of soils and the method of field determination of tangent forces of heaving: PhD thesis ... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 1985, 185 p. (in Russian).
- Cheverev V.G., Alekseev A.G. Method of laboratory determination of the specific tangent force of frost heaving (to the GOST project). In: Proceeding of the Fifth Conference of Geocryologists (Moscow, June 14–17, 2016). Moscow, Univ. Kniga, vol. 3, p. 72–79 (in Russian).
- Shulyatyev O.A. Studies of the interaction of the heaving soil with the pile foundation. Vestnik NITS Stroitelstvo [Bulletin of the SIC Construction], 2020, No. 3 (26), p. 105–120 (in Russian).
- ASTM D 5918-06. Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils. ASTM International, 2006, 12 p.
- BS 812-124:2009. Testing Aggregates. Method for Determination of Frost Heave. British Standards Institution, 2009, 38 p.
- Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples. Publications Office of the European Union, 2013, 159 p.
- Penner E. Uplift forces on foundations in frost heaving soils. Can. Geotechn. J., 1974, No. 11, p. 323–338.

*Поступила в редакцию 5 августа 2021 г.,  
после доработки – 17 марта 2022 г.,  
принята к публикации 25 марта 2022 г.*