

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОЙ СИЛЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ: РЕКОМЕНДАЦИИ

А.Г. Алексеев¹, В.Г. Чеверев²

¹Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений имени Н.М. Герсеванова,
109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6, Россия; adr-alekseev@yandex.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; cheverev44@mail.ru

По трем методикам проведено сопоставительное определение величины касательной силы морозного пучения в зависимости от температурного режима промерзания грунтов. На основе анализа результатов даны рекомендации по определению интегральной величины касательных сил морозного выпучивания фундаментов, в которых применяется стандартизованный лабораторный метод определения удельных касательных сил пучения грунтов.

Морозное пучение грунтов, касательные силы, устойчивое сопротивление сдвигу, фундаменты, нормативные документы

GUIDELINES FOR DETERMINING TANGENTIAL FORCES OF FROST HEAVING OF SOILS

A.G. Alekseev¹, V.G. Cheverev²

¹NIOSP them. N.M. Gershevanov, 6, 2nd Institutskaya str., Moscow, 109428, Russia; adr-alekseev@yandex.ru

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; cheverev44@mail.ru

A comparative determination of tangential forces of frost heaving depending on the soil freezing temperature regime was carried using three calculus methods. Their analysis resulted in recommendations (relying on standard laboratory method for measuring specific tangential forces of frost heave of soils) for calculating integral magnitude of the tangential forces of frost swelling of foundations.

Frost heave of soils, tangential force, resistance to shear, foundations, regulatory documents

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании сооружений, в основании которых расположены пучинистые грунты, возникают сложности, связанные с определением усилий, действующих на фундаменты сооружений при промерзании грунтов. Силы морозного пучения принято подразделять на нормальные, действующие в направлении градиента температуры (они могут быть вертикальными и горизонтальными), и касательные, действующие по боковой поверхности фундаментов.

В статье рассматриваются касательные силы морозного пучения с акцентом на особенности применения нормативных документов. Следует отметить, что современные нормативные документы в области строительства не содержат предупреждения “Несоблюдение стандарта преследуется по закону”. В настоящее время стандартизация в РФ основывается на принципе добровольности применения документов по стандартизации № 184-ФЗ от 27.12.2002 г. и № 162-ФЗ от 29.06.2015 г. В документах учитывается тот факт, что с появлением новых результатов научно-прикладных исследований и опыта применения стан-

дартов в практике инженерно-строительных изысканий ранее введенные стандарты часто устаревают. В то же время процедура актуализации (обновления) стандартов достаточно длительная. Поэтому сейчас допускается применение более совершенных, чем в существующих стандартах, методов определения характеристик грунтов, если доказано, что это позволит получить более точные и надежные входные данные для проектирования инженерных сооружений. Обычно такое обоснование требуется на стадии прохождения государственной экспертизы материалов изысканий.

Аналогичная ситуация возникла с применением стандарта по методике лабораторного определения удельных касательных сил морозного пучения грунтов [ГОСТ Р 56726-2015] для расчета интегральной касательной силы пучения по Своду правил [СП 25.13330.2012. Изменение № 1], в котором не раскрыто влияние распределения температуры в грунте в период сезонного промерзания на формирование интегральной касательной силы пучения.

Целью данной научно-прикладной работы, основанной на вариативных расчетах с учетом полевых исследований, является оптимизация определения интегральной касательной силы пучения с учетом температурного поля промерзающих грунтов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов определения строительных свойств криогенных грунтов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Величина касательных сил пучения входит в расчетную схему, по которой определяют несущую способность оснований сооружений, возводимых в условиях как многолетней мерзлоты, так и глубокого сезонного промерзания [СП 25.13330.2012].

Оценка касательных сил пучения может выполняться как в полевых, так и в лабораторных условиях. Учет результатов полевых исследований в разработке лабораторных методов оценки касательных сил пучения позволяет повысить их достоверность. Ниже рассмотрены основные выводы по результатам полевых исследований, которые существенны для постановки лабораторных испытаний.

Касательные силы пучения реализуются через силы смерзания грунтов с боковой поверхностью фундамента. Впервые метод расчета устойчивости сооружений на мерзлом основании предложил Н.А. Цытович [1928].

В полевых условиях первая попытка непосредственного определения касательной силы пучения была сделана Н.И. Быковым [Быков, Каптерев, 1940]. Метод состоял в измерении максимальной величины сил пучения при испытании моделей свай статическими нагрузками. Однако такой метод позволял определить величину сил пучения, но не показывал ее динамику в процессе промерзания грунта.

Динамометрический метод С.С. Вялова позволил исследовать динамику развития сил пучения во времени и по глубине [Вялов, Егоров, 1958]. Основываясь на полученных результатах, С.С. Вялов предложил использовать в расчетах фундаментов на выпучивание удельное значение касательных сил пучения, соответствующее максимуму их интегральной величины. Это положение было реализовано в строительных нормах.

Для лабораторного определения сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по боковой поверхности фундаментов используются приборы, в которых через испытываемый грунт продавливается модель фундамента. Так, Н.А. Цытович в качестве модели фундамента использовал стойки диаметром 40 мм и высотой 120 мм [Цытович, 1973], а В.Ф. Ермаков – пластины в приборах с двухплоскостным сдвигом [Руководство..., 1973].

Как показано в методической работе Л.Т. Роман, в натуральных условиях на величину касательных сил смерзания (и пучения) влияет диаметр сваи [Роман, 2002]. При этом чем меньше диаметр сваи, тем ниже значение касательной силы смерзания. Это влияние прекращается при достижении значения диаметра сваи 200 мм и более (по данным института АО “Фундаментпроект”, 140 мм и более). Дальнейшее увеличение диаметра сваи уже не влияет на результаты измерения. Отсюда следует вывод, что применение В.Ф. Ермаковым модели сваи в форме пластины оправданно.

Исследованием касательных сил морозного пучения в лабораторных условиях занимался Б.И. Далматов и другие исследователи [Далматов, 1957; Дубнов, 1967; и др.]. При продавливании с разной скоростью перемещения вмороженных в мерзлый грунт моделей свай Б.И. Далматов получил важную закономерность: величина устойчивых сил смерзания близка к величине касательных сил морозного пучения грунтов. Этот результат был развит в работе [Дубнов, 1967]. При этом получена сложная зависимость изменения сил смерзания от времени приложения сдвигающей нагрузки (рис. 1).

На первом (I) участке этой кривой сопротивление сдвигу грунта, переходящего в мерзлое состояние вдоль поверхности фундамента, резко возрастает до максимальных значений при незначительных перемещениях модели сваи по грунту. Это связано с появлением льдоцементационных связей в грунте, которые формируют повышение прочности смерзания с поверхностью фундамента.

Второй (II) участок кривой характеризуется резким снижением сопротивления сдвигу, что имеет место при нарушении возникших при промерзании статических льдоцементационных связей между грунтом и фундаментом.

На третьем (III) участке кривой падение сопротивления сдвигу замедляется и происходит по-

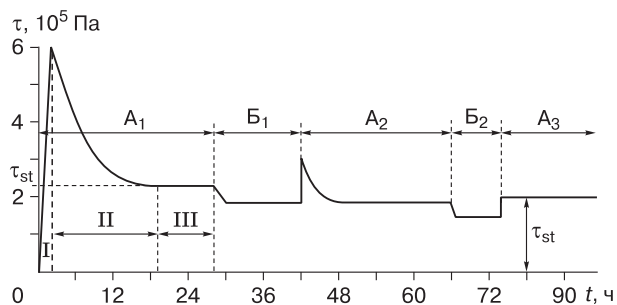


Рис. 1. Кривая изменения во времени (t) сопротивления сдвигу (τ) грунта по поверхности модели сваи, вмороженной в грунт.

τ_{st} – устойчивое сопротивление сдвигу; A_1, A_2, A_3 – сдвиг со скоростью 10 мм/сут; B_1, B_2 – сдвига нет; I, II, III – см. пояснения в тексте.

степенное приближение его к постоянной устойчивой величине.

По С.С. Вялову третий участок кривой – это стадия установившегося пластично-вязкого течения, по Б.И. Далматову – период достижения касательными напряжениями величины устойчивого сопротивления смерзанию, по С.С. Вялову и В.О. Орлову – стадия длительного сопротивления сдвигу [Орлов и др., 1977].

В некоторых случаях при пучении деятельного слоя процесс непрерывного перемещения грунта по боковой поверхности фундамента может идти с остановками, поэтому представляет интерес процесс восстановления сил смерзания после принудительной остановки сваи.

На рис. 1 показано влияние остановок на динамику сил смерзания грунта с материалом сваи [Дубнов, 1967]. Как следует из опытных данных, прекращение перемещения мерзлого грунта по модели фундамента приводит к снижению сил смерзания до некоторой постоянной величины.

Возобновление перемещения модели фундамента относительно мерзлого грунта сопровождается повторением всех трех стадий изменения сопротивления смерзания (с меньшей амплитудой). Важно, что величина льдоцементационного сцепления мерзлого грунта с материалом фундамента не восстанавливается до своего максимального значения, несмотря на длительность остановок.

Следовательно, максимальное сопротивление смерзания может быть использовано в качестве расчетной характеристики в первоначальный период пучения деятельного слоя, когда промерзший слой грунта глубиной до 0.3 м прочно смерзается с боковой поверхностью фундамента.

Дальнейшее пучение деятельного слоя приводит к разрушению первоначальных контактных связей, в результате чего мерзлый слой начинает перемещаться по боковой поверхности фундамента.

Согласно опытным данным, максимальное сопротивление смерзания может достигать больших величин порядка 1.0–1.2 МПа (при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости сдвига 10 мм/сут и влажности $W_r + 0.5W_n$, где W_r – влажность на границе раскатывания; W_n – влажность природная). Принимая во внимание, что слой мерзлого грунта в момент начального сдвига имеет температуру, близкую к нулю, и малую мощность, его пучение не может вызвать недопустимых деформаций фундамента.

Таким образом, *максимальное сопротивление смерзания как расчетная характеристика не имеет практического значения*. В качестве расчетной характеристики следует принимать величину максимума в III стадии установившегося значения сопротивления смерзания (см. рис. 1) при определенных мерзлотно-грунтовых условиях [Дубнов, 1967].

Опыты Ю.Д. Дубнова показали, что последовательное увеличение или уменьшение скорости перемещения или уменьшение скорости перемещения грунта по модели фундамента не изменяет величину устойчивого сопротивления смерзания при условии, что скорость каждой последующей ступени отличается не более чем в 10 раз. Заметное влияние оказывает изменение скорости перемещения 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 составляет 10–20 мм/сут [Дубнов, 1967].

Согласно опытам Б.И. Далматова для ледистых глинистых грунтов, постоянное устойчивое сопротивление сдвигу достигалось при скорости сдвига 10 мм/сут и общей деформации 1 см. На основе этого было предложено принять среднюю величину касательных сил пучения равной величине устойчивой прочности смерзания.

Установившееся сопротивление сдвигу мерзлого грунта по поверхности модели сваи зависит в первую очередь от температуры, возрастая с ее понижением. Зависимость принимается линейной до температуры $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Дубнов, 1967].

По глубине промерзающий грунт неоднороден, так как его температура меняется от минимальной на поверхности грунта до температуры начала замерзания грунтовой влаги на фронте промерзания. При расчете фундаментов на выпучивание необходимо учитывать фактическое распределение касательных сил пучения по глубине, зависящее от температуры. Исследования такого распределения выполнялись как в полевых, так и в лабораторных условиях [Далматов, 1957; Перетрухин, 1967; Орлов, 1982]. Приведем существенные результаты этих исследований. С начала промерзания при понижении температуры промерзшего слоя грунта удельные касательные силы пучения возрастают, а при повышении температуры снижаются. При этом *удельные* касательные силы пучения имеют максимум в верхних промерзающих слоях мощностью 0.2–0.3 м и с ростом глубины промерзания уменьшаются за счет температурного фактора. Величина удельных касательных сил морозного пучения сопоставима с предельно длительным сопротивлением сдвигу.

Однако *интегральные* касательные силы пучения, зависящие от суммарной площади контакта грунта с фундаментом, достигают максимума на расстоянии, равном $2/3$ глубины промерзания (обычно 1.0–1.5 м).

Данные иностранных авторов согласуются с результатами российских исследователей. Так, на рис. 2 приведены результаты натурных наблюде-

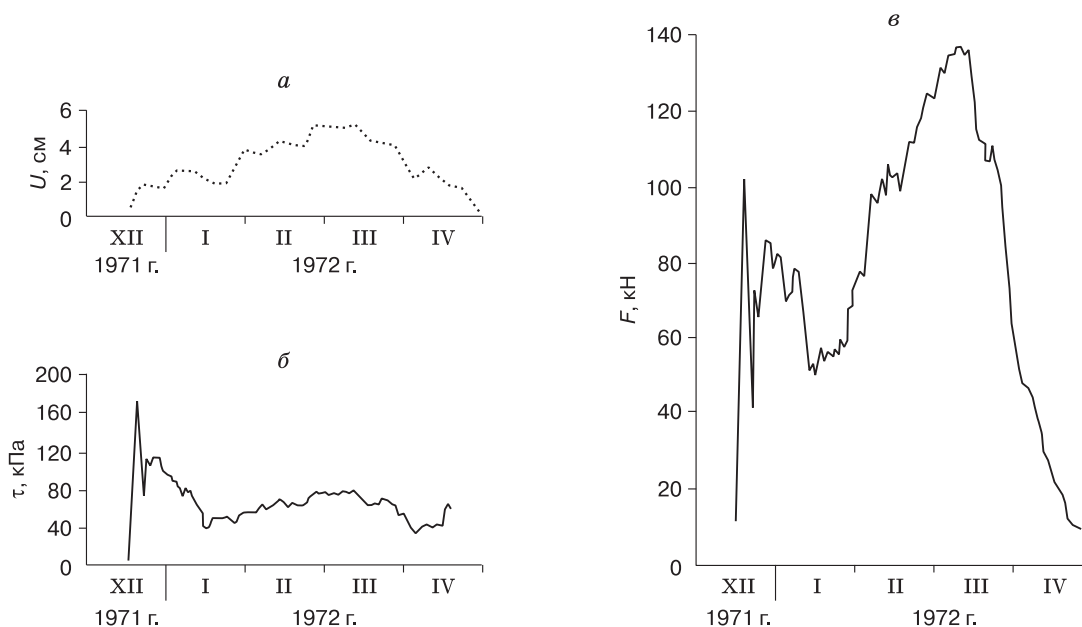


Рис. 2. Результаты натуральных наблюдений за развитием во времени вертикального перемещения свай U (а), касательных сил пучения τ (б) и общей силы выпучивания F (в) [Penner, 1974].

ний за развитием во времени вертикального перемещения свай, касательных сил пучения и общей силы выпучивания из [Penner, 1974]. Глубина промерзания глинистого грунта составляла 1.12 м, диаметр металлической свай 32.4 см.

Из результатов натуральных наблюдений следует, что вертикальное перемещение свай U увеличивается по зависимости, близкой к параболической, от нулевых значений в декабре до максимальных с конца февраля до середины марта, затем при потеплении свая постепенно оседает и возвращается в исходное положение в конце апреля – начале мая (см. рис. 2, а).

Удельные касательные силы пучения τ в начальный период промерзания (середина декабря – начало января) резко возрастают до 170 кПа, достигая максимума, при котором происходит срез по поверхности смерзания (см. рис. 2, б). Затем до середины января происходит их снижение до 40 кПа, дальнейший медленный рост до 70 кПа и изменение по кривой, параллельной параболической зависимости перемещения свай во времени до 40 кПа к середине апреля.

Общая сила пучения F имеет первый максимум до 100 кН в начале промерзания (середина декабря), затем происходит спад до 50 кН к середине января и далее устойчивый рост почти до 140 кН до середины марта (см. рис. 2, в).

Таким образом, основные положения процесса формирования касательных сил пучения грунтов в представлении российских и зарубежных специалистов совпадают.

Методика лабораторного определения удельных касательных сил морозного пучения грунтов, опубликованная в [ГОСТ Р 56726-2015], по физической сути основана на обобщении материалов, изложенных выше.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В нормативных документах по проектированию СП “Свайные фундаменты” [СП 24.13330-2011] и СП “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” [СП 25.13330-2012] содержится методика расчета касательных сил морозного пучения по величине удельной касательной силы морозного пучения грунта, значения которой принимаются по таблице в зависимости от типа и физических характеристик грунта. Недостатком данного метода является неучет существенных факторов, влияющих на величину касательных сил пучения, в том числе динамики температурного поля грунта в ходе его промерзания и пучения.

Для дальнейшего развития нормативной базы по определению касательных сил морозного пучения служит разработанный в 2015 г. ГОСТ “Грунты. Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения” [ГОСТ Р 56726-2015; Чеверев, Алексеев, 2016].

По ГОСТу, удельные касательные силы морозного пучения грунта рекомендуется определять по значению устойчивого сопротивления сдвигу образца мерзлого грунта относительно модели поверхности фундамента. Для получения данных испытания проводятся в устройстве, обе-

спечивающем срез грунта по плоской поверхности смерзания с постоянной скоростью перемещения в диапазоне 1–2 см/сут.

Опыты проводятся при трех значениях температуры: –1, –2 и –6 °С. Устойчивое сопротивление сдвигу в опыте фиксируется в момент, когда максимальное перемещение образца материала фундамента относительно образца грунта достигает не менее 1 см.

В соответствии с [СП 25.13330.2012. Изменение № 1] касательные силы морозного пучения, действующие по боковой поверхности фундамента, по результатам лабораторных испытаний определяются следующим образом [ГОСТ Р 56726-2015].

1. Строятся графики изменения температуры грунта по глубине в конце зимнего периода до границы фазовых переходов (глубины промерзания грунта). Значения температуры грунта замеряют на площадке строительства в соответствии с [ГОСТ 25358-2012] или определяют расчетным путем, в том числе численными методами (рис. 3).

2. График температуры разбивается на три участка, первый участок от глубины промерзания грунта до глубины, на которой зафиксирована температура –1 °С; второй – от глубины, на которой зафиксирована температура –1 °С, до глубины, где температура равна –2 °С; третий – от глубины, на которой зафиксирована температура –2 °С, до температуры поверхности грунта.

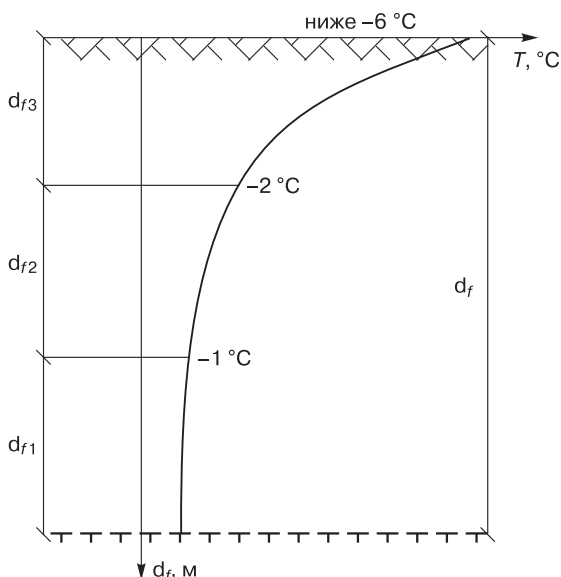


Рис. 3. Схематический график распределения температуры грунта по глубине для расчета касательной силы морозного пучения.

Мощность слоя промерзшего грунта (d_f): d_{f1} – от температуры замерзания до –1 °С; d_{f2} – от –1 до –2 °С; d_{f3} – от –2 °С до поверхности грунта.

3. Касательная сила морозного пучения будет равна сумме произведений удельной касательной силы морозного пучения, полученной в лабораторных условиях для разных температур (–1, –2, –6 °С), на площадь боковой поверхности фундамента, где температура грунта соответствует указанным выше значениям:

$$F_f = \tau_{fh1}A_1 + \tau_{fh2}A_2 + \tau_{fh3}A_3,$$

где τ_{fh1} , τ_{fh2} , τ_{fh3} – удельная касательная сила пучения (кПа) для температур –1, –2 и –6 °С соответственно; A_1 , A_2 , A_3 – площадь боковой поверхности фундамента в соответствующих зонах.

Для оценки достоверности методов определения касательных сил морозного пучения, полученных в соответствии с нормативными документами [СП 25.13330.2012; ГОСТ Р 56726-2015], авторами проведено численное моделирование распределения температур в зимний период по глубине. По полученным температурным графикам определено максимальное значение касательной силы пучения, а также построены зависимости изменения касательных сил морозного пучения в зимний период.

Распределение температур по глубине грунта определялось для г. Москвы на специальной площадке АО “НИЦ “Строительство” (рис. 4). Взято распределение температур воздуха за зимний период 2011/12 г. Оценка сил морозного пучения выполнялась для железобетонной сваи сечением 300 × 300 мм, установленной в тугопластичном суглинке.

Касательные силы морозного пучения определялись по трем методам.

Метод 1. По графикам распределения температуры грунта по глубине и во времени определя-

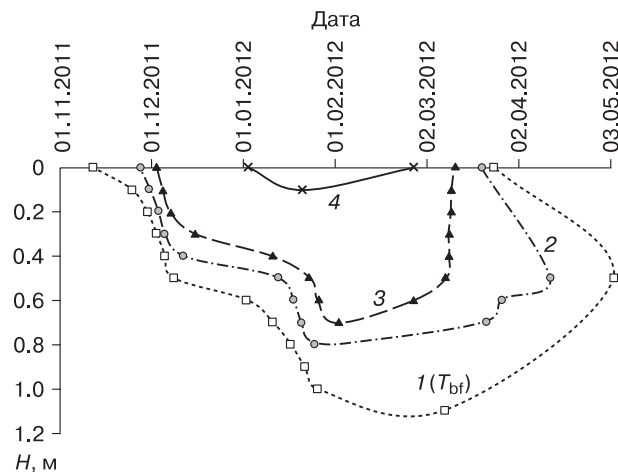


Рис. 4. График изменения глубины грунта (H) во времени для различных температур: –0.2 °С (1), –1 °С (2), –2 °С (3) и –6 °С (4).

T_{bf} – температура начала замерзания грунта.

лась глубина промерзания грунта. В дальнейшем касательную силу морозного пучения F_{fn} вычисляли в соответствии с [СП 25.13330.2012] по формуле

$$F_{fn} = \tau_{fh} A_{fh},$$

где τ_{fh} – расчетная удельная касательная сила пучения (кПа), принимаемая согласно п. 7.4.3 из [СП 25.13330.2012]; A_{fh} – площадь боковой поверхности смерзания фундамента в пределах расчетной глубины сезонного промерзания грунта, м².

Метод 2. Расчет касательных сил морозного пучения выполнялся в соответствии с [СП 25.13330.2012. Изменение № 1; Чеверев, Алексеев, 2016]. Значения удельной касательной силы или силы смерзания грунта с фундаментом для температур -1 , -2 и -6 °С определялось в соответствии с [СП 25.13330.2012. Изменение № 1]. На основе этого определения построен график зависимости расчетного сопротивления грунта по поверхности смерзания с фундаментом для разных температур (рис. 5).

Метод 3. Расчет касательных сил пучения выполнялся по фактическому распределению температур по длине сваи с разбивкой этого распределения с шагом 0,5 °С. Значения силы смерзания грунта с фундаментом определялись в соответствии с нормами [СП 25.13330.2012] по рис. 4, 5:

$$F_{fn} = \sum_{i=1}^{df} \tau_{fh} A_{fh}.$$

С помощью программного комплекса FROST 3D Universal получено распределение температуры грунта по глубине и во времени за зимний период. Графики распределения температуры по глубине (-0.2 , -1 , -2 и -6 °С) приведены на рис. 4.

С использованием распределения температур определены значения касательных сил морозного пучения (сил смерзания грунта и свай) во времени (рис. 6). Расчеты показали, что при решении задачи по методу 1 величина касательной силы морозного пучения с увеличением глубины промерзания возрастает, достигая 138 кН. Затем с умень-

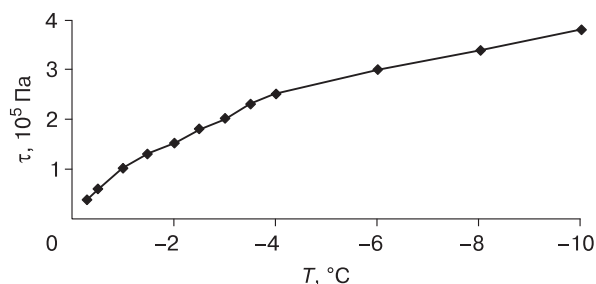


Рис. 5. Зависимость сопротивления сдвигу мерзлого глинистого раствора по фундаменту от температуры (по таблице В3 [СП 25.13330.2012]).

шением глубины или, точнее, мощности промерзшего слоя грунта (так как оттаивание происходит с поверхности грунта и с нижних слоев грунта вне зоны промерзания) эта величина снижается. Поскольку по требованиям [СП 25.13330.2012] определяется только максимальное значение касательных сил пучения, необходимости строить зависимость касательных сил морозного пучения от времени нет.

Величина касательных сил морозного пучения, рассчитанная по методу 2 для конца зимнего периода, составила 52.8 кН. Однако следует отметить, что в конце зимнего периода за счет повышения среднесуточной температуры воздуха температура грунта с поверхности также повышается, хотя процесс промерзания грунта на глубине и продолжается.

При максимальной глубине промерзания температуры грунта по поверхности сваи не минимальные. На основе анализа распределения температур по глубине сваи построены графики распределения температур в конце зимнего периода (конец марта) и за зимний период (начало февраля) по глубине сваи (рис. 7). Величина касательных сил морозного пучения на начало февраля составила 184.8 кН, что в 3.5 раза превышает значение τ_f в конце зимнего периода (см. рис. 6). На рис. 6 видно, что с увеличением глубины промерзания и понижением температуры грунта величина τ_f закономерно возрастает, с повышением температуры начинает снижаться.

Расчетами по методу 3 получены максимальные значения касательных сил морозного пучения. Максимальное значение τ_f достигло 258 кН, что объясняется существенным снижением температуры грунта по длине сваи. Так, по методу 2 в интервале глубин между грунтом с температурой -2 и -6 °С выявлено только одно значение устойчивого сопротивления сдвигу при температуре -2 °С, по методу 3 этих значений будет больше, и

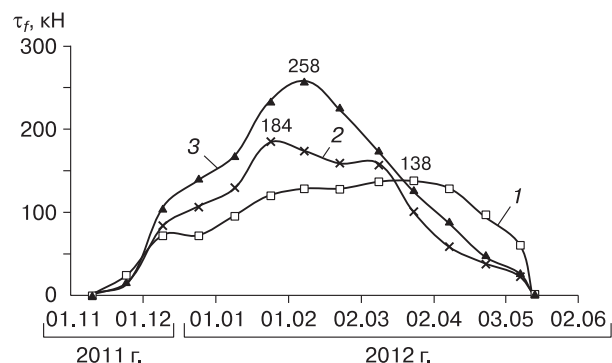


Рис. 6. Зависимость касательных сил морозного пучения (τ_f), рассчитанных тремя методами, от времени промерзания.

1 – первый, 2 – второй, 3 – третий методы расчета.

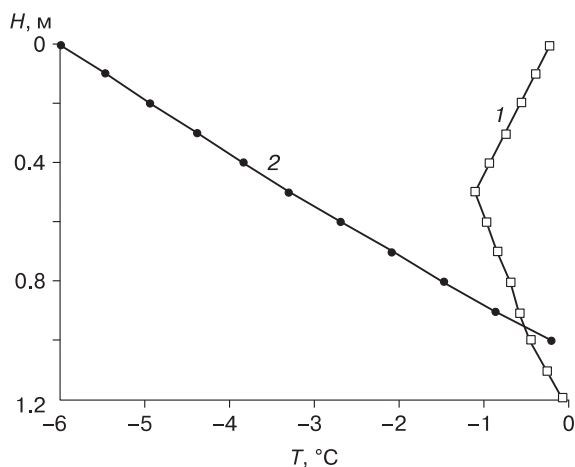


Рис. 7. Распределение температуры грунта по глубине заложения фундамента в экстремальные периоды.

1 – конец зимнего периода, 29.03.2012; 2 – распределение минимальных температур за зимний период, 07.02.2012.

их величина будет значительно выше при более низких температурах (-2.5 , -3.0 °C и т. д.).

ВЫВОДЫ

1. Величина касательных сил морозного пучения (или устойчивой прочности смерзания) увеличивается с понижением температуры грунта, контактирующего с фундаментом.

2. Расчет величины касательной силы морозного пучения по удельному значению касательной силы, принимаемой по таблице из [СП 25.13330.2012], дает существенно заниженные результаты по сравнению с лабораторным методом ГОСТ Р 56726-2015, предложенным в [СП 25.13330.2012. Изменение № 1], примерно на 26 %.

3. Наиболее точным методом определения величины касательной силы морозного пучения является лабораторный метод, рекомендованный ГОСТ Р 56726-2015, применимый для всех типов грунтов, с разбивкой элементарных слоев грунта по глубине фундамента с температурой, кратной 0.5 °C. Полученные данным способом значения касательной силы морозного пучения превышают значения, полученные по п. 7.4.3 из [СП 25.13330.2012], в 1.9 раза, а полученные по [СП 25.13330.2012. Изменение № 1] – в 1.4 раза. Однако этот способ является достаточно трудоемким, так как требует проведения значительного количества испытаний на длительную прочность смерзания грунта с фундаментом, с шагом по температуре, кратным 0.5 °C.

4. В итоге для определения касательных сил морозного пучения рекомендуется использовать подход, изложенный в [СП 25.13330.2012. Изменение № 1], при определении устойчивой прочности

смерзания по [ГОСТ Р 56726-2015] – с умножением на поправочный коэффициент, который следует находить опытным путем по результатам предварительных лабораторных испытаний или построением графика зависимости устойчивой прочности смерзания от температуры. По наилучшему распределению температур по глубине определяется суммарное значение величины максимальной касательной силы морозного пучения.

Литература

Быков Н.И. Вечная мерзлота и строительство на ней / Н.И. Быков, П.Н. Каптерев. М., Трансжелдориздат, 1940, 372 с.

Bykov, N.I, Kapterev, P.N., 1940. Permafrost and Construction on it. Transzheldorizdat, Moscow, 372 pp. (in Russian)

Вялов С.С., Егоров Н.И. Экспериментальное определение сил пучения грунтов // Тр. Ин-та мерзлотоведения АН СССР, 1958, т. 14, с. 40–56.

Vyalov, S.S., Egorov, N.I., 1958. Experimental Evaluation of Frost Heave Forces. Trudy Instituta merzlotovedeniya, USSR Academy of Sciences, vol. 14, 40–56. (in Russian)

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

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

ГОСТ 25358-2012. Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Стандартинформ, 2013, 16 с.

GOST (State Standard) 25358-2012, 2013. Soils. Field method of determining temperature. Standartinform, Moscow, 16 pp. (in Russian)

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

Dalmatov, B.I., 1957. Effect of Frost heaving on Foundations of Structures. Gosstroizdat, Leningrad; Moscow, 60 pp. (in Russian)

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

Dubnov, Yu.D., 1967. Laboratory tests of tangential forces of frost heave. In: Peretrukhin, N.A. (Ed.). Frost heave of soil and ways to protect structures from its effects. Transport Press, Moscow, pp. 55–60. (in Russian)

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.

Orlov, V.O., Dubnov, Yu.D., Merenkov, N.D., 1977. Heaving of Frozen Soils and Its Effect on the Foundations of Structures. Stroizdat, Leningrad, 183 pp. (in Russian)

Орлов В.О. Закономерности развития и полевые методы оценки касательных сил морозного пучения грунтов // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М., Наука, 1982, с. 144–148.

Orlov, V.O., 1982. Evolution and field methods for calculation of tangential forces of frost heaving of soils. In: Rheology of soils and permafrost engineering. Nauka, Moscow, pp. 144–148. (in Russian)

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

- Peretrukhin, N.A., 1967. The strength of frosty buckling of foundations. In: Frost heave of soil and ways to protect buildings from its effects. Transport Press, Moscow, pp. 25–54. (in Russian)
- Роман Л.Т.** Механика мерзлых грунтов. М., МАИК Наука/Интерпериодика, 2002, 426 с.
- Roman L.T., 2002. Mechanics of Frozen Soils. MAIK Nauka/Interperiodika, Moscow, 426 pp. (in Russian)
- Руководство** по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1973, 191 с.
- Guidelines for determining the physical, thermal and mechanical characteristics of frozen soils, 1973. Stroyizdat, Moscow, 191 pp. (in Russian)
- СП 24.13330-2011.** Свайные фундаменты. М., ФАУ “ФЦС”, 2011, 85 с.
- SP 24.13330-2011, 2011. Pile Foundations. Published by FAI “Federal Center of Pricing in Construction and Building Materials Industry”, Moscow, 85 pp. (in Russian)
- СП 25.13330.2012.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., ФАУ “ФЦС”, 2012, п. 7.4, с. 28–30 (Изменение № 1).
- SP 25.13330.2012, 2012. Bases and foundations on permafrost soils. Clause 7.4 (Amendment No. 1). Published by FAI “Federal Center of Pricing in Construction and Building Materials Industry”, Moscow, pp. 28–30. (in Russian)
- Цытович Н.А.** К вопросу расчета фундаментов сооружений, возводимых на вечной мерзлоте // Научно-исследовательские работы Гипромеза. Л., 1928, вып. 2, с. 3–14.
- Tsytovich, N.A., 1928. On the question of the design of foundations erected on permafrost. Trudy Gipromeza, Leningrad, issue 2, pp. 3–14. (in Russian)
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 446 с.
- Tsytovich, N.A., 1973. Mechanics of Frozen Soils. Vysshaya Shkola, Moscow, 446 pp. (in Russian)
- Penner, E.** Uplift forces on foundations in frost heaving soils // Can. Geotechn. J., 1974, No. 11, p. 323–338.

*Поступила в редакцию 24 января 2018 г.,
после доработки – 5 сентября 2018 г.,
принята к публикации 11 октября 2018 г.*