

МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА

Инженер О.В. Третьякова

(Пермский национальный

исследовательский политехнический университет)

Конт. информация: olga_wsw@mail.ru

Статья посвящена феномену морозного пучения грунта в части касательных напряжений и сил, развивающихся на боковой поверхности фундаментов, возводимых в холодных районах. Сообщается об оценке, выполненной автором статьи, некоторых аспектов возникновения и развития касательных напряжений морозного пучения с целью их расчета. Представлены выражения для определения касательных напряжений морозного пучения на боковой поверхности фундамента.

Ключевые слова: влажность, временное сопротивление срезу, граничный слой, касательные напряжения, лед, морозное пучение, напряженно-деформированное состояние, неоднородность, прочность смерзания, релаксация напряжений, сдвиг, удельное сцепление грунта, устойчивые силы смерзания, фундамент, частицы грунта.

Развитие северных районов открывает новые возможности для подъема экономики России и ряда других стран. Для освоения новых территорий необходима транспортная инфраструктура, объекты которой в первую очередь оказываются под воздействием сурового климата. Наиболее подвержены такому воздействию транспортные сооружения, расположенные вблизи дневной поверхности, а именно дороги, тоннельные сооружения мелкого заложения, выполненные открытым и полузакрытым способами. К числу последних относятся порталные участки тоннелей, а также городские транспортные коммуникации (подземные переходы, путепроводы тоннельного типа на транспортных развязках, подземные сооружения скоростного рельсового транспорта).

Негативными проявлениями суровых климатических условий являются промерзание и морозное пучение грунтов, что приводит к появлению повреждений и нарушению эксплуатационной пригодности сооружений. Для предотвращения таких явлений необходимо детальное изучение опасного природного процесса морозного пучения.

При сезонном понижении температуры воздуха происходит охлаждение и промерзание грунта, приводящее к увеличению его объе-

ма – морозному пучению. В связи с этим вокруг фундамента формируется напряженная зона. Возникающие нормальные напряжения служат причиной напряжений и сил сдвига, направленных по касательной к боковой поверхности фундамента. Касательные напряжения вызывают неравномерный подъем конструкций и, как следствие, нарушение целостности и аварийное состояние зданий и объектов инфраструктуры. Изучению данного вопроса посвящены работы Б.Е. Славина (1992) [1], В.Д. Карлова (1998) [2], В.Е. Соколович (2000) [3], Ж.П. Модизетт с соавторами (J.P. Modisette et al., 2014) [4], Т. Кибрия, Л. Тахир (T. Kibriya, L. Tahir, 2015) [5] и ряда других ученых. В действующих на сегодняшний день нормативных документах [6,7] для учета касательных напряжений приведены обобщенные табличные данные, а также рекомендовано определять напряжения экспериментально. Однако последнее не всегда возможно. Возникает вопрос о методике расчета, разработка которой требует в первую очередь изучения механизма возникновения и развития таких силовых факторов.

Согласно существующим представлениям, касательные напряжения морозного пучения развиваются при смерзании и последующем взаимодействии грунта с материалом фундамента. Однако понимание неоднородности взаимодействующих сред, какими являются фундамент и грунт, позволяет уточнить понятие напряженно-деформированного состояния системы «фундамент – промерзающий грунт».

Теоретическими предпосылками такого исследования являются современные представления о криогенной структуре и механических свойствах мерзлого грунта, а также существующие взгляды на стадийность развития касательных напряжений.

Цель рассматриваемого в настоящей статье исследования заключалась в обеспечении технического проектирования расчетными формулами для определения касательных напряжений морозного пучения. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- 1) определить, в каком слое напряженной зоны развиваются сдвигающие усилия, приводящие к возникновению касательных напряжений, и исходя из этого получение качественной и количественной картины взаимодействия;
- 2) выявить свойства взаимодействующих при сдвиге сред, позволяющие выполнить расчет касательных напряжений;
- 3) разработать методику расчета напряжений.

Анализ состояния вопроса

Анализ нормативных документов [6,7] показал, что в настоящее время отсутствует общепринятая методика расчета касательных напряжений морозного пучения, что приводит к использованию при практическом проектировании рекомендуемых табличных значений или требует экспериментального определения напряжений. Однако табличные данные не позволяют учесть весь диапазон грунтовых и климатических условий, а также их возможные сочетания. Такие данные получены по результатам экспериментов, которые проведены для ограниченного количества грунтов. Экспериментальное определение касательных напряжений пучения на конкретном объекте не всегда представляется возможным по условиям сроков выполнения проектной документации и объемам финансирования. Экспериментальная оценка, предполагающая натурные или лабораторные исследования, увеличивает длительность проектирования и составляет дополнительную статью расходов изыскательских и проектных работ.

Для проведения натурного эксперимента требуется следующее: время, соответствующее периоду отрицательных температур атмосферного воздуха, приборы для измерения касательных сил пучения, технический персонал. Способы измерения касательных сил пучения в полевых условиях отражены в работах Б.И. Далматова (1954) [8], Н.А. Толкачева (1964), Э.А. Марова (1974), Э.Д. Ершова (1986) [9], А.Г. Алексеева (2006), Х. Янга (H. Jiang, 2015).

Лабораторный эксперимент невозможен без соответствующего помещения, специального сертифицированного оборудования и научно-технического сопровождения. Лабораторные методы изучения сил пучения приведены в «*Руководстве по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов*» (1973), а также рассмотрены в работах Н.Н. Морарескула (1950), Э.Д. Ершова (1985) [10], В.Р. Пармесваран (V.R. Parmesvaran, 1981) [11], Х. Томаса (H. Thomas, 2009), И.-Х. Хуанга (Y.-H. Hyang, 2015), Ф. Минга (F. Ming, 2015).

Возникает вопрос об эффективности экспериментального подхода (присущего в большей степени научному исследованию) к прогнозированию касательных сил морозного пучения при практическом проектировании. Использование апробированной методики расчета касательных сил морозного пучения, учитывающей гидрогеологические характеристики места строительства, позволит экономично и надежно проектировать сооружения.

Основами данного исследования являются фундаментальные знания в области морозного пучения грунтов, отраженные в работах отечественных и зарубежных авторов. В России базовые положения даны в трудах Н.А. Цытовича (1973) [12], С.С. Вялова (1959) [13], Б.И. Далматова (1988) [14], В.И. Пускова (1993) [15], В.Д. Карлова (1998) [2], В.С. Сажина (1989) [16], Л.Т. Роман (2002) [17], А.Г. Алексеева (2006) и других авторов. За рубежом физикой морозного пучения занимались Р.Л. Харлан (R.L Harlan, 1973), Ж.-М. Конрад (J.-M. Konrad, 1980) [18, 19], С.Л. Пеппин (S.L. Peppin, 2012), Р.В. Стайл (R.W. Style, 2012). Касательные силы морозного пучения рассматривали в своих работах Э. Пеннер (E. Penner 1974, 2010) [20, 21], В.Р. Пармесваран (V.R. Parmesvaran, 1981) [11], Д. Ладаньи, А. Форейро (D. Ladanyi, A. Foriero, 1998) [22], С. Франкештейн, А.М. Тутхилл (S. Frankenstein, A.M. Tuthill, 2002) [23], К.В. Биггар, Д. Сего (K.W. Biggar, D. Sego, 2011) [24], С. Хироши (S. Hiroshi, 2011) [25].

Согласно существующим представлениям, формирование касательных сил определяется силами смерзания грунта с боковой поверхностью фундамента. Силы пучения, развивающиеся в окружающем массиве грунта, стремятся переместить фундамент вверх. При этом происходит сдвиг мерзлого грунта относительно фундамента. Нарушаются статические связи грунта с фундаментом (смерзание), возникают динамические связи, которые обуславливаются сопротивлением смещению слоя мерзлого грунта относительно боковой поверхности фундамента – касательными силами пучения.

Величина касательных сил морозного пучения грунтов, по существующим исследованиям, близка к значениям устойчивых сил смерзания грунта с материалом фундамента [12-14]:

$$\tau_{\text{пуч.}} \approx \tau_{\text{см.}}$$

Под силами смерзания понимается сопротивление сдвигу мерзлого грунта по боковой поверхности фундамента. Сила смерзания грунтов с фундаментом соответствует общей силе, которую надо приложить к нему, чтобы нарушить связь с промерзшим вокруг грунтом. Таким образом, считается, что смещение мерзлого грунта относительно фундамента происходит между материалом фундамента и грунтом.

Сопротивление сдвигу мерзлого грунта является функцией основных переменных, к которым относятся:

- свойства мерзлого грунта – его криогенная структура, которая в свою очередь определяется температурой грунта, скоростью промерзания, величиной и временем действия внешней нагрузки;

- свойства материала фундамента и шероховатость его боковой поверхности.

Таким образом, важно отметить, что основными определяющими сдвиг факторами, являются структура и свойства мерзлого грунта, материала фундамента. Однако для реализации сдвига непосредственно между материалом и мерзлым грунтом необходимо, чтобы эти обе среды были однородными, что в практике не обеспечивается и создает предпосылки для развития существующих положений.

Теоретические предпосылки исследования

Анализ криогенной структуры и механических свойств мерзлого грунта позволил развить представления о возникновении и действии касательных напряжений. Промерзающий грунт представляет собой четырехкомпонентную систему, состоящую из частиц грунта, включений льда, незамерзшей пленочной воды и газообразных включений [12]. Количество и фазовые состояния компонентов в сочетании с природными свойствами грунта определяют его неоднородную криогенную структуру. В этой структуре частицы грунта «сцеплены» льдом. Поверхности контакта частиц грунта и льда образуют многочисленные плоскости скальвания, что обеспечивает возможность хрупкого разрушения мерзлого грунта от скальвающих напряжений.

Работа взаимодействующих при сдвиге сред рассмотрена на основе современных представлений о стадийности развития касательных напряжений.

На *первой стадии* происходит *сдвиг с отрывом* массива грунта относительно тонкого граничного слоя этого грунта, находящегося на боковой поверхности свай и смерзшегося с ней. Касательные скальвавшие напряжения в этом случае характеризуются значительной величиной, но небольшим периодом действия. Такие напряжения могут быть определены как кратковременный, почти мгновенный сдвиг, проходящий при достижении времененного сопротивления грунта срезу.

В этом случае определяющее значение имеет временная прочность на сдвиг частиц граничного слоя мерзлого грунта, связанного с поверхностью заглубленной конструкции и практически являющегося ее «частью». Условием возникновения касательных сдвигающих напряжений является преодоление:

- суммарного сцепления частиц мерзлого грунта, соответствующего времененному сопротивлению грунта и льда срезу;

- нормального давления пучащегося грунта на боковой поверхности фундамента, контактирующего с мерзлым грунтом.

Период действия предельных (мгновенных) сдвигающих напряжений $\tau_{\text{мен.}}$, вызывающих скальвание с отрывом агрегатов грунта в граничном слое, сменяется периодом спада (релаксации напряжений), который продолжается вплоть до установления постоянной скорости сдвига грунта по боковой поверхности сваи при напряжениях, достигших величины $\tau_{\text{уст.}}$.

При этом наступает ***вторая стадия*** установившихся касательных напряжений $\tau_{\text{уст.}}$, возникающих при равномерном смещении массива мерзлого грунта относительно граничного слоя. Смещение массива происходит за счет микросдвигов в граничном слое, в котором часть связей (наименее прочных) уже нарушена на стадии кратковременного сдвига. Касательные напряжения при этом имеют меньшее значение, но действуют практически весь период промерзания и определяют действительную картину развития касательных напряжений морозного пучения по боковой поверхности сваи [12-15, 26].

На ***второй стадии*** от $\tau_{\text{мен.}}$ до $\tau_{\text{уст.}}$ при действии длительной нагрузки от сил морозного пучения происходит релаксация напряжений, преимущественно за счет снижения сил сцепления мерзлого грунта. Это явление было подтверждено опытами С.С. Вялова [13]. Характерное изменение сцепления мерзлых грунтов во времени, составляющее превалирующую часть их сопротивления сдвигу, проиллюстрировано также в зависимостях Н.А. Цытовича [12].

Проведенные С.С. Вяловым и Н.А. Цытовичем исследования показали, что сила сцепления – основная прочностная характеристика мерзлого грунта – снижается при действии сдвиговых напряжений во времени, как правило, в пределах $1/3 \dots 1/5$ $c_{\text{мгн.}}$ [12, 13]. Для глин при длительном сдвиге имеет место также снижение угла внутреннего трения.

Методы расчета касательных напряжений морозного пучения грунта

Особенности криогенной структуры и механических свойств мерзлого грунта позволили предположить, что вызванные пучащимся грунтом напряжения сдвига возникают не по границе «фундамент – промерзающий грунт», а в прилегающем к фундаменту пограничном промерзающем слое грунта. Это положение обосновывается рассмотренными выше факторами, являющимися теоретическими предпосылками данного исследования: неоднородностью взаимодействующих

сплошных сред – материала фундамента и промерзающего грунта, а также способностью мерзлого грунта к хрупкому разрушению.

Эффектом воздействия стесненного пучения вблизи боковой поверхности фундамента являются значительные усилия сжатия, приводящие к развитию напряжений сдвига, которые реализуются по многочисленным плоскостям скальвания, образующимся за счет разной сдвиговой прочности компонентов грунта в расчетном пограничном слое [27]. Результатирующим фактором этих сдвиговых напряжений являются касательные напряжения. Для наступления сдвиговых деформаций необходимо нарушение связей между частицами и грунта, и льда. Причем в любом элементарном фрагменте скальвание будет происходить между слоями льда или по границе ледяных и минеральных прослоек за счет меньшей сдвиговой прочности частиц грунта. В некотором приближении можно оценивать распределение сдвиговых деформаций соответственно процентному соотношению грунта и льда. Это позволило установить связь величины касательных напряжений морозного пучения с влажностью грунта, поскольку количество ледяных включений в мерзлом грунте определяется, прежде всего, влажностью последнего, а также удельным сцеплением частиц грунта и льда. На основании вышеизложенного суммарное сцепление мерзлого глинистого грунта на **первой стадии** развития касательных напряжений, можно записать в виде:

$$c^{mg} = c_{gp}^{mg} \cdot (1 - 1,09 \cdot w) + c_l^{mg} \cdot 1,09 \cdot w = c_{gp}^{mg} - 1,09 \cdot w \cdot c_{gp}^{mg} + c_l^{mg} \cdot 1,09 \cdot w . \quad (1)$$

После преобразований получено выражение:

$$c^{mg} = c_{gp}^{mg} - 1,09 \cdot w \cdot (c_{gp}^{mg} - c_l^{mg}) , \quad (2)$$

где

c_{gp}^{mg} – удельное сцепление грунта, соответствующее временному сопротивлению, кПа;

c_l^{mg} – временное сопротивление льда срезу, кПа;

w – влажность грунта, д. ед.

Для расчета касательных напряжений морозного пучения предложен метод с использованием зависимости Б.И. Далматова, полученной на основании закона Кулона. Касательные напряжения сдвига, возникающие в связных глинистых грунтах вблизи боковой поверхности фундамента при промерзании, на основании [28] запишем:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi ,$$

где

c – удельное сцепление;

σ – нормальное давление;

φ – угол внутреннего трения.

Проанализируем две стадии развития касательных напряжений на боковой поверхности фундамента. Касательные напряжения на первой стадии запишем в виде выражения:

$$\tau_{max}^I = c^{mg} + p_{cp} \cdot \operatorname{tg}\varphi , \quad (3)$$

где

c^{mg} – суммарное (мгновенное) сцепление частиц мерзлого грунта, соответствующее временному сопротивлению, кПа;

p_{cp} – среднее давление на боковой поверхности фундамента, контактирующего с мерзлым грунтом, кПа;

φ_i – угол внутреннего трения грунта и льда.

Среднее давление на боковой поверхности фундамента имеет вид:

$$p_{cp} = \varepsilon_i \cdot \gamma_i \cdot z_i , \quad (4)$$

где

ε_i – коэффициент бокового давления грунта и льда:

$$\varepsilon_i = \frac{\nu_i}{1-\nu_i} ;$$

γ_i – объемный вес грунта и льда, кН/м³;

z_i – глубина (толщина) i -го слоя мерзлого грунта, м;

ν_i – коэффициент Пуассона для грунта и льда.

Подставляя в формулу (3) выражения (2) и (4), получим максимальное касательное напряжение морозного пучения в пределах граничного слоя на глубине z_i при заданной влажности грунта:

$$\tau'_{max} = \tau'_{men} = [c_{cp}^{mg} - 1,09 \cdot w \cdot (c_{cp}^{mg} - c_{\lambda}^{mg})] + \xi_{cp} \cdot \gamma_i \cdot z_i \cdot \operatorname{tg}\varphi_{cp} \cdot (1 - 1,09 \cdot w) + \xi_{\lambda} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot z_i \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\lambda} \cdot 1,09 \cdot w \quad (5)$$

Это мгновенное напряжение является временным сопротивлением мерзлого грунта сдвигу.

На *второй стадии* развиваются установившиеся касательные напряжения, которые являются наиболее достоверным показателем, чем кратковременные на *первой стадии*. Установившиеся напряжения характеризуются снижением сдвиговых напряжений за счет уменьшения удельного сцепления грунта и угла внутреннего трения для связных грунтов [12, 13]. Основываясь на этом, напряжения можно определить из выражения (5), заменив мгновенное сцепление грунта c^{mg} на его длительное значение c^{dl} , определяемое, согласно закономерностям, изложенными в работах [12, 13]:

$$\begin{aligned}\tau_{ycm}^H = & \left[c_{ep}^{\partial l} - 1,09 \cdot w \cdot (c_{ep}^{\partial l} - c_{\lambda}^{\partial l}) \right] + \xi_{ep} \cdot \gamma_i \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ep} \cdot (1 - 1,09 \cdot w) + \\ & + \xi_{\lambda} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\lambda} \cdot 1,09 \cdot w.\end{aligned}\quad (6)$$

Анализируя величину влажности w в формуле (6), заметим, что льдообразование в промерзающем грунте обусловлено суммарной влажностью, включающей поровую влагу в природном сложении грунта, и влагу, поступающую в результате миграции. С учетом этого выражение (6) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}\tau_{ycm}^H = & \left[c_{ep}^{\partial l} - 1,09 \cdot (w + w_{migr}) \cdot (c_{ep}^{\partial l} - c_{\lambda}^{\partial l}) \right] + \\ & + \xi_{ep} \cdot \gamma_i \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ep} \cdot (1 - 1,09 \cdot (w + w_{migr})) + \xi_{\lambda} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\lambda} \cdot 1,09 \cdot (w + w_{migr}).\end{aligned}\quad (7)$$

Долю миграционной влаги в промерзающем грунте определим, используя выражение для деформации пучения А.Л. Невзорова [29], в котором второе слагаемое связано с влагой, поступающей в промерзающую зону за счет сил миграции:

$$h_{nyq.} = 0,09 \cdot (w_{sat} - w_w) \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot z + 1,09 \cdot SP \cdot \tau \cdot grad t . \quad (8)$$

Тогда влажность, формирующаяся за счет миграции воды к холодному фронту, из формулы (8) составит:

$$w_{migr.} = \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} . \quad (9)$$

После подстановки (9) выражение (7) примет вид:

$$\begin{aligned}\tau_{ycm}^H = & \left[c_{ep}^{\partial l} - 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} \right) \cdot (c_{ep}^{\partial l} - c_{\lambda}^{\partial l}) \right] + \\ & + \xi_{ep} \cdot \gamma_i \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ep} \cdot \left(1 - 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} \right) \right) + \\ & + \xi_{\lambda} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\lambda} \cdot 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} \right)\end{aligned}, \quad (10)$$

где

$c_{ep}^{\partial l}$ – удельное сцепление частиц грунта, кПа;

$c_{\lambda}^{\partial l}$ – удельное сцепление частиц льда, кПа;

w – природная влажность грунта, д. ед.

$\varphi_{ep}, \varphi_{\lambda}$ – угол внутреннего трения грунта и льда соответственно;

$\xi_{\text{гр}}$, $\xi_{\text{л}}$ – коэффициент бокового давления грунта и льда соответственно;

$\gamma_{\text{гр}}$, $\gamma_{\text{л}}$ – объемный вес грунта и льда соответственно, кН/м³;

z – глубина промерзания грунта в вертикальном направлении; толщина слоя грунта в горизонтальном направлении, м;

SP – сегрегационный потенциал грунта, м²/ч·°C;

τ – время промерзания, ч;

$\text{grad } t$ – градиент температуры, °C/м.

Упростим запись выражения (10), заменив $c_{\text{гр}}^{\partial \text{л}}$ и $c_{\text{л}}^{\partial \text{л}}$ на величины $c_{\text{гр}}$ и $c_{\text{л}}$, а τ_{ycm}^H на величину τ_{ycm} :

$$\begin{aligned} \tau = \tau_{\text{ycm.}} &= \left[c_{\text{гр}} - 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot \text{grad } t}{z} \right) \cdot (c_{\text{гр}} - c_{\text{л}}) \right] + \\ &+ \xi_{\text{гр}} \cdot \gamma_i \cdot z_i \cdot \text{tg} \varphi_{\text{гр}} \cdot \left(1 - 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot \text{grad } t}{z} \right) \right) + \quad . \quad (11) \\ &+ \xi_{\text{л}} \cdot \gamma_{\text{л}} \cdot z_i \cdot \text{tg} \varphi_{\text{л}} \cdot 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot \text{grad } t}{z} \right) \end{aligned}$$

Полученное выражение (11) позволяет определить величину касательных напряжений морозного пучения на боковой поверхности заглубленной конструкции в зависимости от влажности и удельного сцепления частиц мерзлого грунта.

Причиной возникновения касательных напряжений являются максимальные нормальные сжимающие напряжения, развивающиеся при ограничении расширения пучащегося грунта при его промерзании. В.И. Пускову удалось установить линейную зависимость между касательными напряжениями морозного пучения, с одной стороны, нормальными напряжениями пучения и отрицательной температурой, с другой стороны.

Рассмотренные выше положения позволили выразить касательные напряжения морозного пучения как функцию горизонтальных напряжений морозного пучения σ_x :

$$\tau = \sigma_x \cdot \text{tg} \varphi \quad , \quad (12)$$

где

σ_x – напряжение морозного пучения, нормальное к боковой поверхности фундамента [30];

φ – угол внутреннего трения мерзлого грунта или льда;

Выражение для горизонтальных напряжений морозного пучения σ_x получено автором данной статьи в зависимости от модуля деформации мерзлого грунта в работе [30]:

$$\sigma_x = \sigma_{nyu} = 1,09 \cdot SP \cdot \tau \cdot grad t \cdot \frac{E_M}{z} \cdot \left[1 - e \cdot \left(1 - w_w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} - 1,09 \cdot w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \right] \cdot k_{an}, \quad (13)$$

где

E_M – модуль деформации мерзлого грунта, кПа;

w – природная влажность грунта, д. ед.;

w_w – влажность по незамерзшей воде, д. ед.;

e – коэффициент пористости грунта, д. ед.;

z – глубина промерзания грунта в вертикальном направлении; толщина слоя грунта в горизонтальном направлении, м;

SP – сегрегационный потенциал грунта, $m^2/\text{ч}\cdot{}^\circ\text{C}$;

τ – время промерзания, ч;

$grad t$ – градиент температуры, ${}^\circ\text{C}/\text{м}$;

ρ_d – плотность сухого грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_w – плотность свободной воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_d / ρ_w – коэффициент пересчета массовой влажности в объемную;

k_{an} – коэффициент анизотропии мерзлого грунта, учитывающий направление промерзания и напряжений морозного пучения.

С использованием выражений (11), (12) выполнены примеры расчета касательных напряжений пучения, действующих на боковой поверхности фундамента в глинистом грунте. Результаты расчета напряжений показаны в табл. 1.

Сравнение напряжений, рассчитанных по формулам (11) и (12), с данными нормативной литературы отражено в табл. 2. Результаты формулы (11) не противоречат табличным значениям норм. Формула (12) показала меньшие значения напряжений. Это указывает на необходимость дальнейших исследований деформационных свойств мерзлого грунта с целью получения уточненных значений модулей деформации для расчета касательных напряжений морозного пучения.

Таблица 1

***Результаты расчета касательных напряжений
морозного пучения на боковой поверхности
фундамента в глинистом грунте***

<i>Номер форму- лы</i>	<i>Расчетная формула</i>	<i>Значение ка- сательных напряже- ний, кН/м²</i>
11	$\tau = \left[c_{ep} - 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} \right) \cdot (c_{ep} - c_x) \right] +$ $+ \xi_{ep} \cdot \gamma_i \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ep} \cdot \left(1 - 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} \right) \right) +$ $+ \xi_x \cdot \gamma_x \cdot z_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_x \cdot 1,09 \cdot \left(w + \frac{SP \cdot \tau \cdot grad t}{z} \right)$	152,7
12	$\tau = \sigma_x \cdot \operatorname{tg} \varphi,$ <p>где</p> $\sigma_x = 1,09 \cdot SP \cdot \tau \cdot grad t \cdot \frac{E_M}{z} \cdot \left[1 - e \cdot \left(1 - w_w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} - 1,09 \cdot w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \right] \cdot k_{an}$	79

Таблица 2

***Сравнение касательных напряжений
морозного пучения***

<i>Касательные напряжения морозного пучения τ, кН/м²</i>				
<i>По нормативным документам</i>		<i>По результатам расчета</i>		
СП 25 1.3330.2015, п.7.4.3 [6] (в зависи- мости темпе- ратуры грунта)	СП 25 1.3330.2015, п.7.4.3 [6] (в зависи- мости от глубины промерзания)	Пособие к СНиП 2.02.01.83 (рекомен- дуемые значения)	Формула 11	Формула 12
136,4	114	104	152,7	79

ВЫВОДЫ

По итогам рассмотренного выше аналитического исследования разработаны методики расчета касательных напряжений морозного пучения, предназначенные для проектирования заглубленных транспортных сооружений в районах с суровым климатом.

Базируясь на современных представлениях о криогенной структуре и механических свойствах мерзлого грунта, высказано предположение, что касательные напряжения морозного пучения развиваются в граничном слое мерзлого грунта, прилегающем к боковой поверхности фундамента. Это позволило установить связь касательных напряжений с влажностью и удельным сцеплением мерзлого грунта, что отражено в выражении (11).

Как было указано выше, причиной возникновения касательных напряжений морозного пучения являются сжимающие напряжения пучения, нормальные к боковой поверхности фундамента и приводящие к сдвигу грунта относительно этой поверхности. Данное положение послужило основой для расчета касательных напряжений с учетом деформационных свойств мерзлого грунта и закономерностей миграции влаги при промерзании, что отражено в (12).

Таким образом, полученные методики расчета касательных напряжений морозного пучения реализованы в выражениях (11) и (12) в зависимости от свойств мерзлого грунта и в функции нормальных напряжений морозного пучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Славин Б.Е. Воздействие сурового климата на конструкции тоннелей метрополитенов / Б.Е. Славин, В.С. Молчанов // Проблемы железнодорожного транспорта Сибири: Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 60-летию НИИЖТ. – Новосибирск: НИИЖТ, 1992. – Ч. 2. – С. 5-6.
2. Карлов В.Д. Сезонно промерзающие грунты как основания сооружений: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.02 / Карлов Владислав Дмитриевич; СПбГАСУ. – СПб, 1998. – 349 с.
3. Соколович В.Е. Влияние морозного пучения на разрушение заглубленных конструкций / В.Е. Соколович // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – №6. – С. 22-23.
4. Modisette Jason P., Modisette Jerry L. Pipe Line Frost Heave (or the lack thereof). – Proceedings of PSIG (Pipeline Simulation Interest Group) Conference – 6-9 May 2014, Baltimore, Maryland, USA. –

Paper № 1421. – PP. 1-8. – Электрон. данные. – URL: <https://www.onepetro.org/conferences/PSIG/PSIG14?start=20&rows=10> (дата обращения: 20.07.2017).

5. Kibriya T., Tahir L. Adfreeze forces on Lightly Loaded Pile Foundations of Solar PV Farms in Gold Regions // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2015. – V. 3, No. 4. – C. 109-117. – Электрон. данные. – URL: <http://pubs.sciepub.com/ajcea/3/4/1> (дата обращения: 21.07.2017).
6. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – Введ. 2013-01-01. – М.: ООО «Аналитик», 2011. – 118 с.
7. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на пучинистых грунтах. – М.: Стройиздат, 1979. – 54 с.
8. Далматов Б.И. Исследования касательных сил пучения и влияния их на фундаменты сооружений / Б.И. Далматов. – М.: Институт мерзлотоведения АН СССР, 1954. – 29 с.
9. Ершов Э.Д. Полевые методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова и Г.И. Гордеевой. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 143 с.
10. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих почвах / Под ред. Ершова Э. Д. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. – 167 с.
11. Parmesvaran V.R. Adfreeze strength of model piles in ice // Canadian Geotech. J. – 1987. – 24, 3. – PP. 446-452.
12. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 636 с.
13. Вялов С.С. Реологические свойства мерзлых грунтов / С.С. Вялов. – Москва, Изд-во АН СССР, 1959. – 191 с.
14. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии). – 2-е изд. перераб. и доп. / Б.И. Далматов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. издание, 1988. – 415 с.
15. Пусков В.И. Силовые воздействия морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений и методы их расчета: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.02 / Пусков Виктор Исакович; Новосибирск. Сибирская Государственная академия путей сообщения. – М., 1993. – 37 с.
16. Сажин В.С. Взаимодействие пучинистого грунта с фундаментами, работающими совместно с конструкциями сооружений: автореферат дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.02 / Владимир Степанович Сажин; Госстрой СССР. Всесоюз. н.-и., проектно-

- изыскат. и конструкторско-технол. ин-т оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова. – М., 1989. – 47 с.
17. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман. – Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Геол. фак. – М.: Наука / Интерпериодика, 2002. – 425 с.
18. Konrad J.-M. Frost heave mechanics. – Ph. D. Thesis. – Dept. of Civil Eng. – Univ. Edmonton Alberta. – 1980. – 472 p.
19. Konrad J.-M., Morgenstern N. R. A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fine-Grained Soils // Canadian Geotechnical Journal. – V. 17, No. 4. – Электрон. данные. – 1980. – C. 473–486. – URL: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t80-056> (дата обращения: 29.08.2017).
20. Penner E. Uplift Forces on Foundations in Frost Heaving Soils // Canadian Geotechnical Journal. – 1974. – V. 11, No. 3. – PP. 323-338.
21. Penner. E. Frost-Heave Uplift Forces on Foundation. ResearchGate.net. – Электрон. данные. – 2010. – URL: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t74-034#.WaZweLhn3cs> (дата обращения: 29.08.2017).
22. Ladanyi D., Foriero A. Evolution of Frost Heaving Stresses Acting on a Pile. – Proceedings of Seventh International Conference Permafrost, Yellowknife (Canada). – Collection Nordicana. – 1998. – No 55. – C. 623–633. – Электрон. данные. – URL: <http://research.iarc.uaf.edu/NICOP/DVD/ICOP%201998%20Permafrost%207th%20conf/CD-ROM/Proceedings/PDF001189/097125.pdf> (дата обращения: 29.08.2017).
23. Frankenstein S., Tuthill A.M. Ice Adhesion to Locks and Dams: Past Work; Future Directions? // Journal of Cold Regions Engineering. – 16(2). – Электрон. данные. – 2002. – URL: https://www.researchgate.net/publication/245293264_Ice_Adhesion_to_Locks_and_Dams_Past_Work_Future_Directions (дата обращения: 29.08.2017).
24. Biggar K.W., Sego D. The Strength and Deformation Behaviour of Model Adfreeze and Grouted Piles in Saline Frozen Soils // Canadian Geotechnical Journal. – Электрон. данные. – 2011. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/237379399> (дата обращения: 29.08.2017).
25. Hiroshi S. Mechanical Properties Between Ice and Various Materials Used in Hydraulic Structures // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2011. – V. 21, No. 2. – PP. 81–90.
26. Оржеховский Ю.Р. Прогноз деформаций фундаментов в промерзающих глинистых грунтах / Ю.Р. Оржеховский, Р.Я. Оржехов-

- ская // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала: сб. науч. тр. / Пермь: ППИ, 1983. – С. 69-74.
27. Богоявленский В.В. Разрушение льда. Методы, технические средства / В.В. Богоявленский, В.П. Гаврило, О.А. Недошивин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 232 с.
28. Даляматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии). – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд.-ние. – 1988. – 415 с.
29. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах / А.Л. Невзоров. – М.: Изд. АСВ, 2000. – 152 с.
30. Третьякова О.В. Величины нормальных напряжений морозного пучения, развивающихся в глинистых грунтах / О.В. Третьякова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2016. – №1. – С. 125-141.

LITERATURA

1. Slavin B.E. Vozdejstvie surovogo klimata na konstrukcii tonnelej metropolitenov / B.E. Slavin, V.S. Molchanov // Problemy zheleznodorozhnogo transporta Sibiri: Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashchennoy 60-letiju NIZhT. – Novosibirsk: NIZhT, 1992. – Ch. 2. – S. 5-6.
2. Karlov V.D. Sezonno promerzajushchie grunty kak osnovaniya sooruzhenij: dis. ... d-ra teh. nauk: 05.23.02 / Karlov Vladislav Dmitrievich; SPbGASU. – SPb, 1998. – 349 s.
3. Sokolovich V.E. Vlijanie moroznogo puchenija na razrushenie zاغlublennyh konstrukcij / V.E. Sokolovich // Osnovaniya, fundamente i mehanika gruntov. – 2000. – №6. – S. 22-23.
4. Modisette Jason P., Modisette Jerry L. Pipe Line Frost Heave (or the lack thereof). – Proceedings of PSIG (Pipeline Simulation Interest Group) Conference – 6-9 May 2014, Baltimore, Maryland, USA. – Paper № 1421. – PP. 1-8. – Jelektron. dannye. – URL: <https://www.onepetro.org/conferences/PSIG/PSIG14?start=20&rows=10> (data obrashhenija: 20.07.2017).
5. Kibriya T., Tahir L. Adfreeze forces on Lightly Loaded Pile Foundations of Solar PV Farms in Gold Regions // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2015. – V 3, No. 4. – S. 109-117. – Jelektron. dannye. – URL: <http://pubs.sciepub.com/ajcea/3/4/1> (data obrashhenija: 21.07.2017).

6. SP 25.13330.2012. *Osnovanija i fundamenty na vechnomerzlyh gruntah. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.04-88.* – Vved. 2013-01-01. – M.: OOO «Analitik», 2011. – 118 s.
7. *Rukovodstvo po proektirovaniyu osnovanij i fundamentov na puchinistyh gruntah.* – M.: Strojizdat, 1979. – 54 s.
8. *Dalmatov B.I. Issledovaniya kasatel'nyh sil puchenija i vlijanija ih na fundamenty sooruzhenij / B.I. Dalmatov.* – M.: Institut merzlotovedenija AN SSSR, 1954. – 29 s.
9. *Ershov Je.D. Polevye metody geokriologicheskikh issledovanij / Pod red. Je.D. Ershova i G.I. Gordeevoj.* – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986. – 143 s.
10. *Deformacii i naprjazhenija v promerzajushhih i ottaivajushhih porodah / Pod red. Ershova Je. D.* – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1985. – 167 s.
11. *Parmesvaran V.R. Adfreeze strength of model piles in ice // Canadian Geotech. J.* – 1987. – 24, 3. – PP. 446-452.
12. *Cytovich N.A. Mehanika merzlyh gruntov / N.A. Cytovich.* – M.: Vysshaja shkola, 1973. – 636 s.
13. *Vjalov S.S. Reologicheskie svojstva merzlyh gruntov / S.S. Vjalov.* – Moskva, Izd-vo AN SSSR, 1959. – 191 s.
14. *Dalmatov B.I. Mehanika gruntov, osnovanija i fundamenty (vklyuchaja special'nyj kurs inzhenernoj geologii).* – 2-e izd. pererab. i dop. / B.I. Dalmatov. – L.: Strojizdat, Leningr. otd-nie, 1988. – 415 s.
15. *Puskov V.I. Silovye vozdejstvija moroznogogo puchenija gruntov na fundamenty sooruzhenij i metody ih rascheta: avtoref. dis. ... d-ra teh. nauk: 05.23.02 / Puskov Viktor Isakovich; Novosibirsk. Sibirskaja Gosudarstvennaja akademija putej soobshhenija.* – M., 1993. – 37 s.
16. *Sazhin V.S. Vzaimodejstvie puchinistogo grunta s fundamentami, rabotajushhimi sovmestno s konstrukcijami sooruzhenij: avtoreferat dis. ... d-ra teh. nauk: 05.23.02 / Vladimir Stepanovich Sazhin; Gosstroj SSSR. Vsesojuz. n.-i., proektnoizyskat. i konstruktorskotechnol. in-t osnovanij i podzemnyh sooruzhenij im. N.M. Gersevanova.* – M., 1989. – 47 s.
17. *Roman L.T. Mehanika merzlyh gruntov / L.T. Roman.* – Mosk. gos. un-t im. M. V. Lomonosova. Geol. fak. – M.: Nauka / Interperiodika, 2002. – 425 s.
18. *Konrad J.-M. Frost heave mechanics.* – Ph. D. Thesis. – Dept. of Civil. Eng. – Univ. Edmonton Alberta. – 1980. – 472 p.
19. *Konrad J.-M., Morgenstern N. R. A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fine-Grained Soils // Canadian Geotechnical Journal.* – V. 17, No. 4. – Jelektron. dannye. – 1980. – S. 473–486. – URL:

<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t80-056> (data obrashhenija: 29.08.2017).

20. Penner E. *Uplift Forces on Foundations in Frost Heaving Soils* // Canadian Geotechnical Journal. – 1974. – V. 11, No. 3. – PP. 323-338.
21. Penner. E. *Frost-Heave Uplift Forces on Foundation*. ResearchGate.net. – Jelektron. dannye. – 2010. – URL:https://www.researchgate.net/publication/44047087_Frost-heave_uplift_forces_on_foundations (data obrashhenija: 29.08.2017).
22. Ladanyi D., Foriero A. *Evolution of Frost Heaving Stresses Acting on a Pile*. – Proceedings of Seventh International Conference Permafrost, Yellowknife (Canada). – Collection Nordicana. – 1998. – No 55. – S. 623–633. – Jelektron. dannye. – URL:<http://research.iarc.uaf.edu/NICOP/DVD/ICOP%201998%20Permafrost%207th%20conf/CD-ROM/Proceedings/PDF001189/097125.pdf> (data obrashhenija: 29.08.2017).
23. Frankenstein S., Tuthill A.M. *Ice Adhesion to Locks and Dams: Past Work; Future Directions?* // Journal of Cold Regions Engineering. – 16(2). – Jelektron. dannye. – 2002. – URL:https://www.researchgate.net/publication/245293264_Ice_Adhesion_to_Locks_and_Dams_Past_Work_Future_Directions (data obrashhenija: 29.08.2017).
24. Biggar K.W., Sego D. *The Strength and Deformation Behaviour of Model Adfreeze and Grouted Piles in Saline Frozen Soils* // Canadian Geotechnical Journal. – Jelektron. dannye. – 2011. – URL:<https://www.researchgate.net/publication/237379399> (data obrashhenija: 29.08.2017).
25. Hiroshi S. *Mechanical Properties Between Ice and Various Materials Used in Hydraulic Structures* // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2011. – V. 21, No. 2. – PP. 81–90.
26. Orzhehovskij Ju.R. *Prognoz deformacij fundamentov v promer-zajushhih glinistykh grunta* / Ju.R. Orzhehovskij, R.Ja. Orzhehovskaja // Osnovanija i fundamenty v geologicheskikh uslovijah Urala: sb. nauch. tr. / Perm': PPI, 1983. – S. 69-74.
27. Bogorodskij V.V. *Razrushenie l'da. Metody, tehnicheskie sredstva* / V.V. Bogorodskij, V.P. Gavriko, O.A. Nedoshivin. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 232 s.
28. Dalmatov B.I. *Mehanika gruntov, osnovaniya i fundamenty (vkljuchaja special'nyj kurs inzhenernoj geologii)*. – 2-e izd. pererab. i dop. – L.: Strojizdat, Leningr. otd.-nie. – 1988. – 415 s.
29. Nevzorov A.L. *Fundamenty na sezonnopromerzajushhih grunta* / A.L. Nevzorov. – M.: Izd. ASV, 2000. – 152 s.

30. Tret'jakova O.V. *Velichiny normal'nyh naprjazhenij moroznogo puchenija, razvivajushhihsja v glinistyh gruntah* / O.V. Tret'jakova // *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija.* – 2016. – №1. – S. 125-141.
-

ANALYTIC METHODS OF TANGENTIAL STRESSES OF SOIL FROST HEAVING

Engineer **O.V. Tretiakova**
(Perm National Research Polytechnic University)
Contact information: olga_wsw@mail.ru

The paper is concerned with soil frost heaving phenomenon so far as it relates to tangential stresses and forces developed on a lateral surface of foundations, which are being constructed in cold regions.

It is reported about the author's assessment of some aspects of the origin and the development process of tangential frost heaving stresses, with a focus on calculating them.

The expressions for determining tangential frost heaving stresses on lateral foundation surface are given.

Key words: moisture, ultimate shear stress, boundary layer, tangential stresses, ice, frost heaving, stress-strain state, heterogeneity, adfreezing strength, stress relaxation, shearing strain, specific cohesion of soil, stable adfreezing forces, foundation, soil particles.

Рецензент: канд. техн. наук А.Е. Мерзликин (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 10.07.2017 г.