

DOI 10.15593/24111678/2016.01.09

УДК 624.131.434

**О.В. Третьякова**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия  
Пермская государственная сельскохозяйственная академия,  
Пермь, Россия

## **ВЕЛИЧИНЫ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Показана природа нормальных напряжений морозного пучения, действующих в глинистом грунте. Преимущественное значение для возникновения напряжений имеет расклинивающее действие пленок незамерзшей воды в силу особенностей молекулярного строения этого вида грунтов. Определены величины нормальных напряжений морозного пучения глинистого грунта. Нормальные напряжения вычислены для случаев закрытой и открытой системы. Для условий закрытой системы напряжения определены с использованием уравнения Бриджмена – Таммана. Закрытая система описывает поведение грунта при промерзании в жестком закрытом сосуде. Полученные завышенные значения напряжений указывают на то, что данная расчетная схема не отвечает натурным грунтовым условиям. Реальная ситуация экспериментальной и строительной площадки требует учета ряда факторов, таких как влагопроводные свойства грунтов, сжимаемость нижележащих слоев, жесткость конструкций, воспринимающих силы морозного пучения. Перечисленные факторы реализуются в открытой системе, под которой в данной статье понимается экспериментальная площадка с установленными буровыми сваями, имеющими верхний обратный конус. Рассматривалось напряженно-деформированное состояние промерзающего грунта вокруг сваи с обратным конусом. Конструктивные особенности сваи учтены с помощью коэффициента жесткости конструкции. Величина нормального напряжения определена в двух вариантах: как функция пористости и избыточной влажности. Получены выражения, где учтены факторы, обуславливающие процесс пучения глинистых грунтов: льдовыделение при замерзании поровой воды, миграционное льдонакопление, влияние незамерзшей воды. Расчетная схема «промерзающий грунт – фундамент» в условиях открытой системы более полноценно описывает поведение грунтов при промерзании и создает достоверную картину напряженно-деформированного состояния глинистого промерзающего грунта в околосвайном пространстве. Результаты, полученные для условий открытой системы, имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными и могут быть использованы для практических расчетов.

**Ключевые слова:** морозное пучение, миграция воды, пленочная вода, сегрегационный потенциал, нормальные напряжения, буровая свая.

**O.V. Tret'iakova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation  
Perm State Agricultural Academy, Perm, Russian Federation

## **THE VALUES OF THE NORMAL STRESS OF FROST HEAVING, GROWING IN CLAY SOILS**

The nature of the normal stress of frost heaving acting in the clay soil was showed. The priority significance for the occurrence of stress has wedging action films of unfrozen water because of the nature of the molecular structure of this type of soil. The normal stresses of frost heaving in the experimental area, composed of clay soils, were determined. The normal stresses are calculated for a closed and an open system. For a closed system, stress is expressed using the Bridgman-Tamman equation. Closed system describes the behavior of the soil freezing in hard closed vessel. The resulting excessive stress values indicate that this design scheme does not meet the natural soil conditions. The actual situation of experimental and the construction site requires consideration of a number of factors, such as moisture permeability properties of soils, compressibility of the underlying layers, structural rigidity, perceiving forces of frost heaving. These factors are implemented in an open system. Open system in this paper is the experimental platform with established drilling piles having an upper inverted cone. We considered the stress-strain state of the freezing of soil around the pile with a reverse taper. Design features of the pile factor taken into account by means of coefficient of rigidity of the construction. In an open system the stress was defined in two ways: as a function of porosity and excessive humidity. Expressions, which take into account factors driving the process heaving clay soils: the formation of ice during freezing pore water, accumulation of ice due to moisture migration, the influence of unfrozen water, were derived. Design scheme "freezing the soil – foundation" in the context of an open system more fully describe the behavior of soils during freezing and provides a reliable picture of the stress-strain state of the freezing of the clay soil around the pile. The calculated results for the conditions of the open system, have a good agreement with experimental data and can be used for practical calculations.

**Keywords:** frost heave, water migration, film water, segregation potential, normal stress, bored pile.

Мерзлый грунт представляет собой многокомпонентную систему, основу которой составляет минеральная матрица с активной поверхностью. Активность поверхности минеральных частиц обуславливает наличие динамических границ раздела фаз, определяющих механизм и величину напряжений в мерзлом грунте, т.е. напряжений морозного пучения.

Величины нормальных напряжений морозного пучения определяются природой действующих сил, которая в первую очередь зависит от вида и свойств грунта [1–3].

Природой нормальных сил пучения в глинистом грунте являются кристаллизация свободной и связанной влаги, расклинивающее действие пленок незамерзшей воды, которое служит превалирующим фактором [4].

Миграция воды в глинистый грунт затруднена, так как он обладает определенной водонепроницаемостью. Это связано с высоким содержанием пленочной связанной воды, имеющей высокую вязкость

и упорядоченность молекулярного строения, которые препятствуют миграции.

Показательны исследования нормальных сил морозного пучения в открытой и закрытой системах.

### *Закрытая система*

В *закрытой системе* (жестком закрытом сосуде) значения нормальных сил морозного пучения определяются давлениями, которые развивают кристаллы льда при стесненном замерзании воды. Величины этих сил зависят от свойств промерзающих грунтов, внешнего давления, влажности грунта.

Давления, которые лед может развивать, не оттаивая под действием внешнего давления, в частности атмосферного, при отрицательных температурах, можно определить по формуле Бриджмена – Таммана [5]:

$$\Delta p = 1 + 127\theta - 1,519\theta^2, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – давление, которое лед может развивать при стесненном замерзании воды в закрытом сосуде, кН/см<sup>2</sup>;  $\theta$  – значение отрицательной температуры, °С.

Для глинистых дисперсных грунтов, имеющих низкую температуру замерзания поровой воды, давление растущих кристаллов льда может достигать значительных величин.

По данным Э.Д. Ершова, в *закрытой системе* в пределах 9%-ного увеличения объема воды действуют *силы кристаллизации*, составляющие около 13,4 МПа на 1° понижения температуры [6].

Напряжения пучения носят динамический характер, возрастая по мере понижения температуры.

Считая, что напряжения пучения будут возникать в момент превышения объема льда и незамерзшей воды над объемом пор грунта, граничным условием для появления напряжений пучения примем равенство объема льда и незамерзшей воды объему пор. При понижении температуры в первую очередь замерзает свободная вода. Поэтому для выполнения граничного условия пучения необходимо, чтобы, за исключением пленочной связанной воды, количество свободной воды в порах грунта составило:

$$V_{\text{своб. воды}} > (V_{\text{пор}} - V_{\text{н. воды}})(1 - 0,09), \quad (2)$$

где  $V_{\text{своб. воды}}$ ,  $V_{\text{н. воды}}$ ,  $V_{\text{пор}}$  – объем свободной воды, незамерзшей воды, пор грунта соответственно, д. ед.

Запишем выражения для напряжения пучения в закрытой системе с использованием формулы Бриджмена – Таммана:

$$\sigma_{\text{пуч}} = (1 + 127\theta - 1,519\theta^2)(V_{\text{пор}} - V_{\text{н. воды}}) + w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{пуч}} = (1 + 127\theta - 1,519\theta^2)(n - w_w) + w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z, \quad (4)$$

где  $n$  – пористость грунта, д. ед.;  $w_w$  – влажность грунта за счет незамерзшей воды, д. ед.;  $\rho$  – плотность свободной воды,  $\text{кН/см}^3$ ;  $z$  – глубина промерзания грунта (в вертикальном направлении), толщина слоя грунта (в горизонтальном направлении), см.

### ***Открытая система***

Под открытой системой понимается экспериментальная площадка с установленными буровыми сваями, имеющими верхний обратный конус.

В реальных условиях открытой системы нормальные силы пучения обусловлены: *давлением кристаллизации*, содержащейся в грунте и миграционной влаге, *расклинивающим действием пленок незамерзшей воды*, *усадкой* соседних слоев грунта.

В открытой системе значения нормальных сил морозного пучения, кроме свойств грунта и внешнего давления, зависят от влагопроводности грунтов, сжимаемости нижележащих слоев [7, 8]. Величины нормальных напряжений пучения свободной поверхности грунта отличны от напряжений, развивающихся в массиве грунта вокруг фундаментов, где они в числе прочих факторов определяются жесткостью конструкций, воспринимающих силы морозного пучения [9–11].

Таким образом, для открытой системы напряжения пучения складываются из следующих составляющих:

- 1) напряжений массового пучения (кристаллизация свободной воды в порах грунта);
- 2) пучения в результате миграционного льдонакопления (кристаллизация миграционной влаги);
- 3) расклинивающего давления тонких пленок незамерзшей воды в результате миграции влаги;
- 4) напряжений усадки.

Схематично составляющие напряжений пучения показаны на рис. 1.



Рис. 1. Составляющие напряжения пучения

Лед и незамерзшая вода, суммарный объем которых меньше объема грунтовых пор, не оказывают давление на их стенки и не вызывают внутренних напряжений в грунте, приводящих к увеличению его объема. Пучение происходит при условии превышения объема заморзшей и незамерзшей воды над объемом пор в грунте. При этом незамерзшая пленочная вода оказывает расклинивающее действие на промерзающий грунт, подобно набуханию; «избыточный» лед также играет роль «клины» между льдом в объеме пор и их стенками. Силы морозного пучения являются, с одной стороны, функцией пористости грунта, а с другой стороны – функцией избыточной влажности, приводящей к образованию льда, превышающего объем пор [12].

Условие пучения грунта выразим следующим образом:

$$V_{\text{льда}} + V_{\text{н.воды}} > V_{\text{пор}}. \quad (5)$$

Исходя из этого, запишем выражение для нормальных горизонтальных напряжений пучения в общем виде:

$$\sigma_{\text{откр}} = [\sigma_{\text{изб.льда}} + \sigma_{\text{н.воды}} - \sigma_{\text{ус}}] k_{\text{ан}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\text{изб.льда}}$ ,  $\sigma_{\text{н.воды}}$  – давления «избыточного» льда, незамерзшей воды соответственно,  $\text{кН/м}^2$ ;  $\sigma_{\text{ус}}$  – разгружающее влияние усадки грунта вследствие миграции влаги из соседних слоев,  $\text{кН/м}^2$ ;  $k_{\text{ан}}$  – коэффици-

ент анизотропии, учитывающий горизонтальное направление действия сил пучения.

Первое слагаемое  $\sigma_{\text{изб.льда}}$  включает: а) давление замерзшей грунтовой воды ( $\sigma_{\text{льда}}^{\text{пор}}$ ) и б) давление замерзшей влаги, поступившей в результате миграции ( $\sigma_{\text{льда}}^{\text{мигр}}$ ). Представим  $\sigma_{\text{изб.льда}}$  в виде разности давления фактического объема льда по условиям *a* и *б* и давления льда в объеме пор, без учета незамерзшей воды. Получим выражение

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{изб.льда}} &= \left[ \sigma_{\text{льда}}^{\text{пор}} + \sigma_{\text{льда}}^{\text{мигр}} \right] - \left[ \sigma_{\text{льда}}^{\text{пор}} + \sigma_{\text{льда}}^{\text{мигр}} \right] n(1 - w_w) = \\ &= \left[ \sigma_{\text{льда}}^{\text{пор}} + \sigma_{\text{льда}}^{\text{мигр}} \right] \left[ 1 - n(1 - w_w) \right].\end{aligned}\quad (7)$$

Выражение для  $\sigma_{\text{изб.льда}}$  представим через закон Гука:

$$\sigma_{\text{изб.льда}} = h_{\text{пуч}} \frac{E_M}{z} \left[ 1 - n(1 - w_w) \right], \quad (8)$$

где  $h_{\text{пуч}}$  – деформация пучения, м;  $E_M$  – модуль деформации мерзлого грунта, кН/м<sup>2</sup>.

С учетом свойств грунта, толщины промерзающего слоя и жесткости фундаментной конструкции выражение для избыточного давления льда без учета усадки и незамерзшей воды примет вид

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{изб.льда}} &= \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \\ &\times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) \left[ 1 - n(1 - w_w) \right],\end{aligned}\quad (9)$$

где  $w_{\text{sat}}$  – суммарная природная влажность грунта, д. ед;  $\rho_d / \rho_w$  – коэффициент пересчета массовой влажности в объемную;  $z$  – глубина промерзания грунта (в вертикальном направлении), толщина слоя грунта (в горизонтальном направлении), м; SP – сегрегационный потенциал, см<sup>2</sup>/ч · °С;  $k_d$  – коэффициент жесткости конструкции;  $\tau$  – время промерзания, сут; grad  $t$  – градиент температуры, °С/см.

Давление незамерзшей воды в мерзлом грунте составляет:

$$\sigma_{\text{н.воды}} = w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z. \quad (10)$$

Запишем выражение для напряжений пучения (9) без учета усадки в виде суммы давления избыточного льда и незамерзшей воды как функцию пористости следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пуч}} &= [\sigma_{\text{изб.льда}} + \sigma_{\text{н.воды}}] k_{\text{ан}} = \\ &= \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) [1 - n(1 - w_w)] + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\} k_{\text{ан}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем выражение для напряжений пучения (9) без учета усадки в виде суммы давления избыточного льда и незамерзшей воды как функцию избыточной влажности, превышающей объем пор грунта, следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пуч}} &= \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} \frac{w_{\text{sat}} - w_w}{n - w_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

**Определение нормальных напряжений морозного пучения для исследуемых грунтов**

Таблица 1

Геологические условия площадки исследования

Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	Природная влажность, д. ед.	Число пластичности, д. ед.	Показатель текучести, д. ед.	Коэффициент пористости, д. ед.	Степень влажности, д. ед.	Удельное сцепление, кПа	Модуль деформации, мПа
Глина мягкопластичная							
20,6	0,33	0,21	0,6	0,82	1,02	20	6,1

Нормальные напряжения пучения в открытой системе определим из выражений (11) и (12):

$$\sigma_{\text{пуч}} = \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right. \\ \left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) \left[ 1 - n(1 - w_w) \right] + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\} k_{\text{ан}}; \\ \sigma_{\text{пуч}} = \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} \frac{w_{\text{sat}} - w_w}{n - w_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right. \\ \left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\}.$$

Определим расчетные составляющие, входящие в выражения согласно характеристикам грунта площадки исследования, указанным в табл. 1.

Суммарная природная влажность грунта, д. ед.:

$$w_{\text{sat}} = 0,33.$$

Влажность грунта за счет незамерзшей воды определим как функцию влажности на границе пластичности согласно указаниям СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах», д. ед.:

$$W_w = K_w W_p = 0,92 \cdot 0,204 = 0,19,$$

где  $k_w$  – коэффициент, принимаемый по СП 25.13330.2012 в зависимости от числа пластичности  $I_p$  и температуры грунта  $T$ ; принимаем  $k_w = 0,92$  при температуре начала замерзания  $-0,5^\circ$ ;  $W_p$  – влажность грунта на границе пластичности (раскатывания), д. ед., определяем по данным табл. 1:

$$L_L = \frac{W - W_p}{L_p},$$

$$W_p = W - L_p \cdot L_L = 0,33 - 0,21 \cdot 0,6 = 0,204.$$

Плотность грунта в сухом состоянии:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + W_{\text{tot}}} = \frac{20,6}{1 + 0,33} = 15,5 \text{ кН/м}^3.$$



Плотность связанной воды по данным А.Л. Невзорова составляет в среднем [13]

$$\rho_w = 12 \text{ кН/м}^3.$$

Поскольку по экспериментальным данным максимальные силы пучения возникают ориентировочно на глубине  $2/3$  от глубины промерзания, рассматриваем промерзающий слой толщиной

$$z \sim \frac{2}{3} 1,8 = 1,2 \text{ м.}$$

По исследованиям К. Kujala сегрегационный потенциал  $SP$  ( $\text{мм}^2/\text{ч} \cdot \text{°C}$ ) находится в корреляционной зависимости от скорости пучения  $v_h$  ( $\text{мм/сут}$ ) [14]:

$$SP = 1,1 v_{hw} = 1,1 \cdot 7,5 \text{ мм/сут} = 8,25 \text{ мм}^2/\text{ч} \cdot \text{°C} = 0,0825 \text{ см}^2/\text{ч} \cdot \text{°C},$$

где  $v_{hw}$  – скорость пучения за счет миграционного льдонакопления,  $\text{мм/сут}$ .

Температурный градиент позади фронта промерзания (рис. 2) вычислим по формуле

$$\text{grad } T = \frac{t_{bf} - t_s}{d} \sim \frac{-t_s}{d} = -\frac{(-4)}{120} = 0,033 \text{ °C/см},$$

$$d \sim z,$$

где  $t_{bf}$  – температура начала замерзания,

$$t_{bf} \rightarrow 0,$$

где  $t_s$  – температура в точке 1 (температура сегрегации) при промерзании слоя грунта толщиной  $z = 1,8$  м;  $d \approx z$  – толщина каймы промерзания (промерзающего слоя).

Время промерзания

$$\tau = \frac{H}{v_n} = \frac{120 \text{ см}}{1,5 \text{ см/сут}} = 80 \text{ сут} = 1920 \text{ ч},$$

где  $v_n$  – общая скорость пучения,  $\text{см/сут}$  [15].

Модуль упругости мерзлого грунта

$$E_M = 0,9 \cdot 16 \text{ МПа} = 14,4 \text{ МПа} = 14\,400 \text{ кПа}.$$

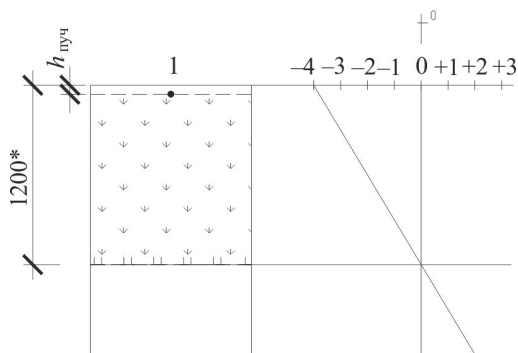


Рис. 2. К определению температурного градиента

Пористость грунта, д. ед.:

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{15,5}{27,4} = 0,434.$$

Коэффициент жесткости конструкции сваи с обратным конусом:

$$k_d = \frac{E_b \frac{R_k + r_k}{2}}{2\pi h_k \frac{R_k + r_k}{2}} = \frac{E_b}{2\pi h_k} = \frac{2,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 100} = 0,004 \text{ кН/см}^3,$$

где  $h_k$ ,  $R_k$ ,  $r_k$  – геометрические параметры обратного конуса (высота, радиусы основания и вершины соответственно).

Исследуемые глинистые грунты обладают слоистой криогенной текстурой, которая отличается наибольшей анизотропией [16]. Поэтому определение коэффициента анизотропии имеет смысл. Коэффициент анизотропии для учета сил пучения в горизонтальном направлении составляет:

$$k_{ан} = \frac{E_{верт}}{E_{гор}}, \quad (13)$$

$$E_{верт} = \frac{\beta}{a}, \quad (14)$$

где  $a$  – коэффициент сжимаемости мерзлого грунта;  $\beta$  – коэффициент бокового расширения грунта.

Учитывая объемный характер процесса морозного пучения и рассматривая деформации грунта в продольном и поперечном направлении как составляющие одного процесса, запишем выражение для модуля деформации в поперечном направлении:

$$E_{гор} = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{\beta} = \frac{\beta}{a} \cdot \frac{1}{\beta^2} = E_{верт} \cdot \frac{1}{\beta^2}. \quad (15)$$

Тогда выражение для коэффициента анизотропии примет вид

$$k_{ан} = \frac{E_{верт}}{E_{гор}} = \frac{E_{верт} \cdot \beta^2}{E_{верт}} = \beta^2, \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu},$$

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

При отсутствии данных по величине коэффициента Пуассона для практических вычислений примем  $\beta = 0,8$ .

Вычислим коэффициент анизотропии для расчета сил пучения в горизонтальном направлении:

$$k_{ан} = \beta^2 = 0,8^2 = 0,64.$$

На основании вычисленных значений вычислим напряжения пучения в открытой и закрытой системах.

**Напряжения пучения в открытой системе по формуле (11):**

$$\begin{aligned} \sigma_{пуч} = & \left\{ \left[ 0,09(w_{sat} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z [1 - n(1 - w_w)] + 1,09 \cdot SP \cdot \tau \cdot grad t \right] \times \right. \\ & \left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\} k_{ан} = \left\{ \left[ 0,09(0,33 - 0,19) \frac{15,5}{12} 120 \times \right. \right. \\ & \times [1 - 0,434(1 - 0,19)] + 1,09 \cdot 0,0825 \cdot 1920 \cdot 0,033 \left. \left[ 0,004 + \frac{1,44}{120} \right] + \right. \\ & \left. + 0,19 \cdot 0,434 \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot 120 \right\} 0,64 = \{ [1,26 + 5,698] (0,004 + 0,012) + \\ & + 0,001 \} 0,64 = 0,0719 \text{ кН/см}^2 = 719 \text{ кН/м}^2. \end{aligned}$$

**Напряжения пучения в открытой системе по формуле (12):**

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пуч}} &= \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} \frac{w_{\text{sat}} - w_w}{n - w_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right. \\ &\times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) k_{\text{ан}} = +w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z \left. \right\} = \left\{ \left[ 0,09(0,33 - 0,19) \frac{15,5}{12} \frac{0,33 - 0,19}{0,434 - 0,19} \times \right. \right. \\ &\times 120 + 1,09 \cdot 0,0825 \cdot 1920 \cdot 0,033 \left. \right] \times \left( 0,004 + \frac{1,44}{120} \right) + \\ &+ 0,19 \cdot 0,434 \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot 120 \left. \right\} 0,64 = \\ &= \{ [1,953 \cdot 0,6 + 5,698] (0,004 + 0,012) + 0,001 \} 0,64 = \\ &= 0,0710 \text{ кН/см}^2 = 710 \text{ кН/м}^2. \end{aligned}$$

**Напряжения пучения в закрытой системе по формуле (4):**

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пуч}} &= (1 + 127\theta - 1,519\theta^2)(n - w_w) + w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z = \\ &= (1 + 127 \cdot 2 - 1,519 \cdot 2^2)(0,434 - 0,19) + 0,19 \cdot 0,434 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = \\ &= 248,92 \cdot 0,244 + 0,01 = 60,75 \text{ кг/см}^2 = 6075 \text{ кН/м}^2. \end{aligned}$$

Полученные значения нормальных напряжений морозного пучения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Нормальные горизонтальные напряжения пучения

Номер формулы	Расчетная формула	$\sigma_{\text{пуч}}$ кН/м <sup>2</sup>
(11)	$\sigma_{\text{пуч}} = \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z [1 - n(1 - w_w)] + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right.$ $\left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\} k_{\text{ан}}$	719
(12)	$\sigma_{\text{пуч}} = \left\{ \left[ 0,09(w_{\text{sat}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} \frac{w_{\text{sat}} - w_w}{n - w_w} z + 1,09 \cdot \text{SP} \cdot \tau \cdot \text{grad } t \right] \times \right.$ $\left. \times \left( k_d + \frac{E_M}{z} \right) + [w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z] \right\} k_{\text{ан}}$	710
(4)	$\sigma_{\text{пуч}} = (1 + 127\theta - 1,519\theta^2)(n - w_w) + w_w \cdot n \cdot \rho \cdot z$	6075

Таблица 3

Результаты сравнения данных, полученных аналитическим и экспериментальным путем

Наименование сравниваемых показателей	Результаты		
	эксперимент	аналитические	% к эксперименту
Нормальные горизонтальные напряжения пучения $\sigma_{пуч}$ , кН/м <sup>2</sup>	700	719	+2,7
		710	+1,4

### Выводы

1. Значения нормальных напряжений морозного пучения в открытой системе, полученные по формулам (11) и (12), согласуются с результатами экспериментов, проведенных Б.С. Юшковым в 2013–2015 гг. на экспериментальных площадках Пермского края. Нормальные горизонтальные напряжения морозного пучения, полученные экспериментально, составляют 700 кН/м<sup>2</sup> [3]. Расхождение расчетных значений напряжений пучения с экспериментально полученными величинами составляет порядка 1,4–2,7 %, что с позиции технического проектирования находится в допустимых пределах изменения признаков напряженно-деформированного состояния (5 %). Результаты сравнения аналитических и экспериментальных результатов показаны в табл. 3.

2. Выражения (11) и (12) могут применяться в практических расчетах напряжений морозного пучения при соответствующем обосновании используемых в них параметров промерзающих грунтов.

### Список литературы

1. Peppin S.S.L., Style R.W. The physics of frost heave and ice-lens growth. – Oxford, 2012. – 35 p.
2. Noon C. Secondary frost heave in freezing soils. Thesis of Doctor of Philosophy / University of Oxford. – 1996. – 197 p.
3. Юшков Б.С. Экспериментально-теоретические основы расчета фундаментов из двухконусных свай, устраиваемых в сезоннопромерзающих грунтах / Перм. нац. исслед. политех. ун-т. – Пермь: ОТ и ДО, 2015. – 311 с.
4. Дерягин Б.В., Чураев И.В. Физико-механические основы переноса влаги в мерзлых грунтах // В кн.: Мерзлые грунты при инженерных воздействиях. – Новосибирск: Наука (Сибир. отд-ние), 1984. – С. 5–14.

5. Куликов Ю.Г., Перетрухин Н.А. Определение величины нормальных сил пучения // Труды ВНИИ транспортного строительства. – 1967. – Вып. 62. – С. 106–109.

6. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / под ред. Э.Д. Ершова. – М: Изд-во Моск. ун-та, 1985. – 167 с.

7. Ершов Э.Д., Шевченко Л.В., Лебедеко Ю.П. Особенности протекания усадки и пучения в промерзающих грунтах различного состава и свойств // Мерзлотные исследования: сб. / Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. – М., 1976. – Вып. XV. – С. 226–236.

8. Кудрявцев С.А. Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Реконструкция городов и геотехническое строительство». – 2003. – № 7. – С. 233–240. – URL: <http://www.georec.spb.ru/journals/07/files/pdf/0407018.pdf> (дата обращения: 17.02.2016).

9. Юшков Б.С., Третьякова О.В., Ребров С.А. Рациональные подходы к проектированию заглубленных транспортных тоннелей в условиях морозного пучения грунтов // Дороги и мосты. – 2015. – № 2. – С. 56–62.

10. Пусков В.И. Силовые воздействия морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений и методы их расчета: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Сиб. гос. акад. путей сообщения. – Новосибирск; М., 1993. – 40 с.

11. Медведева О.П. Работа пирамидально-призматических свай в пылевато-глинистых грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск; Пермь, 1992. – 20 с.

12. Michalowski R. A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations // Gold Regions Science and Technology. – 1993. – No. 22. – P. 47–63.

13. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 152 с.

14. Kujala K. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils // Acta Univ. Oulu, C58. – Oulu, 1991. – 99 p.

15. Пыщев Н.Ф. Методика оценки степени пучинистости грунта // Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политехн. ун-т. – Пермь, 1982. – С. 118–122.

16. Юшков Б.С., Третьякова О.В. Влияние анизотропии глинистых грунтовых массивов на напряженно-деформированное состояние транспортных тоннелей [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2014. – Т. 1, № 3. – С. 1–12. – URL: <http://t-s.today/PDF/01TS14.pdf> (дата обращения: 17.02.2016).

## References

1. Peppin S.S.L., Style R.W. The physics of frost heave and ice-lens growth. Oxford, 2012. 35 p.
2. Noon C. Secondary frost heave in freezing soils. Thesis of Doctor of Philosophy. University of Oxford, 1996. 197 p.
3. Iushkov B.S. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy rascheta fundamentov iz dvukhkonusnykh svai, ustraivaemykh v sezonopromerzaiushchikh gruntakh [Experimental and theoretical basis of the calculation of the foundations of the Cone piles, arranged in seasonally ground]. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015. 311 p.
4. Deriagin B.V., Churaev I.V. Fiziko-mekhanicheskie osnovy pere-nosa vlagi v merzlykh gruntakh [Physical and mechanical basics of moisture migration in frozen soils]. *Merzlye grunty pri inzhenernykh vozdeistviakh*. Novosibirsk: Nauka, 1984, pp. 5-14.
5. Kulikov Iu.G., Peretrukhin N.A. Opredelenie velichiny normal'nykh sil [Determination of the normal forces of swelling]. *Trudy VNII transportnogo stroitel'stva*, 1967, no. 62, pp. 106-109.
6. Ershov E.D. Deformatsii i napriazheniia v promerzaiushchikh i ottaivaiushchikh porodakh [Deformations and stresses of freezing and thawing in rocks]. Moskovskii universitet, 1985. 167 p.
7. Ershov E.D., Shevchenko L.V., Lebedenko Iu.P. Osobennosti prottekaniia usadki i pucheniia v promerzaiushchikh gruntakh razlichnogo sostava i svoystv [Features flow shrinkage and swelling in freezing soils of different composition and properties]. *Merzlotnye issledovaniia*. Moskovskii universitet, 1976, no. XV, pp. 226-236.
8. Kudriavtsev S.A. Vliianie migratsionnoi vlagi na protsess moroznogo pucheniia sezonopromerzaiushchikh gruntov [The impact of migration of moisture in the process of frost heaving soils seasonally]. *Internet-zhurnal "Rekonstruktsiia gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo"*, 2003, no. 7, pp. 233-240, available at: <http://www.georec.spb.ru/journals/07/files/pdf/0407018.pdf> (accessed 17 February 2016).
9. Iushkov B.S., Tret'iakova O.V., Rebrov S.A. Ratsional'nye podkhody k proektirovaniuu zaglublennykh transportnykh tonnelei v usloviiakh moroznogo pucheniia gruntov [Rational approaches to the design of buried transport tunnels under frost heaving soils]. *Dorogi i mosty*, 2015, no. 2, pp. 53-62.

10. Puskov V.I. Silovye vozdeistviia moroznogo pucheniia gruntov na fundamente sooruzhenii i metody ikh rascheta [Power effects of frost heaving of soil on the foundations of structures and methods of their calculation]. Abstract of the Doctor's Thesis, Novosibirsk; Moscow: Sibirskaia gosudarstvennaia akademiia putei soobshcheniia, 1993. 40 p.

11. Medvedeva O.P. Rabota piramidal'no-prizmaticheskikh svai v pylevato-glinistykh gruntakh [Work pyramidal prismatic piles in silty-clay soils]. Abstract of the Ph.D.'s Thesis, Krasnoiarsk; Perm', 1992. 20 p.

12. Michalowski R. A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations. *Gold Regions Science and Technology*, 1993, no. 22, pp. 47-63.

13. Nevzorov A.L. Fundamente na sezonnopromerzaiushchikh gruntakh [Foundations in soil seasonally]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2000. 152 p.

14. Kujala K. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils [Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils]. *Acta Univ. Oulu, C58*. Oulu, 1991. 99 p.

15. Pyshchev N.F. Metodika otsenki stepeni puchinistosti grunta [Methods of assessing the degree of heaving soils]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Permskii politekhnicheskii universitet, 1982, pp. 118-122.

16. Iushkov B.S, Tret'iakova O.V. Vliianie anizotropii glinistykh gruntovykh massivov na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie transportnykh tonnelei [Influence of anisotropy clay soil masses on the stress-strain state of the transport tunnels]. *Internet-zhurnal "Transportnye sooruzheniia"*, 2014, vol. 1, no. 3, pp. 1-12, available at: <http://ts.today/PDF/01TS314.pdf> (accessed 17 February 2016).

Получено 19.02.2016

### Об авторе

**Третьякова Ольга Викторовна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 19а); доцент кафедры «Материаловедение и строительное производство» Пермской государственной сельскохозяйственной академии (614000, г. Пермь, ул. 25 Октября, 10, e-mail: [Olga\\_wsw@mail.ru](mailto:Olga_wsw@mail.ru)).



### **About the authors**

**Olga V. Tret'iakova** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of Automobile Roads and Bridges, Perm National Research Polytechnic University (19a Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation); Associate Professor, Department of Materials Science and Building Manufacture, Perm State Agricultural Academy (10, October 25 st., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: Olga\_wsw@mail.ru).