Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2015, Том 2, №1 / 2015, Vol 2, No 1 <http://t-s.today/issues/vol2-no1.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/01TS115.pdf>

DOI: 10.15862/01TS115 (<http://dx.doi.org/10.15862/01TS115>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Юшков Б.С., Третьякова О.В. Методы защиты транспортных тоннелей от морозного пучения грунта, основанные на расчете конструкций сооружения // Транспортные сооружения, Том 2, No 1 (2015) <http://t-s.today/PDF/01TS115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Yushkov B.S., Tretyakova O.V. [Methods of the transport tunnel protection from the frost heaving of soil based on the calculation of building structures] Russian journal of transport engineering, 2015, Vol. 2, no. 1.

Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS115.pdf> (In Russ.)

Адрес для связи с авторами:

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29
614031, Пермь, ул. Докучаева, 31

УДК 625.731:624.138

Юшков Борис Семенович

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Зав. кафедры САД
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: Zzverdvd@mail.ru

Третьякова Ольга Викторовна

ОАО «ПЗСП», Россия, Пермь
E-mail: Olga_wsw@mail.ru

Методы защиты транспортных тоннелей от морозного пучения грунта, основанные на расчете конструкций сооружения

Аннотация. Рассмотрены возможности защиты транспортных тоннелей от морозного пучения грунта методами снижения влияния сил пучения и методами восприятия указанных воздействий конструкциями сооружения. В качестве наиболее оптимальных определены методы, основанные на расчете конструкций сооружения. Проанализировано влияние касательных и нормальных сил морозного пучения на конструкции транспортного тоннеля. Показано распределение характерных зон промерзания грунта за стеной заглубленного сооружения, а также действующие в этих зонах составляющие сил морозного пучения грунта. Приведен порядок решения в общем виде задачи определения усилий в конструкциях тоннеля от нормальных сил морозного пучения, действующих на стену сооружения. Решение включает определение нормальных сил морозного пучения, учет неравномерности действия нормальных сил пучения и вычисление усилий, возникающих в конструкциях. При одномерном (вертикальном) промерзании нормальные горизонтальные силы определяются с учетом анизотропии пучения и учитываются коэффициентом анизотропии. При неоднородном (двустороннем) промерзании – от дневной поверхности и через стену – нормальные горизонтальные силы морозного пучения имеют значения, сопоставимые с вертикальными. Суммарное воздействие на стену заглубленного сооружения складывается из горизонтального давления нормальных сил морозного пучения и давления грунта.

Ключевые слова: кристаллизация грунтовой воды; миграция влаги; льдонакопление; морозное пучение грунта; усадка талой зоны; анизотропия морозного пучения; двустороннее промерзание; свободное пучение; допустимое неравномерное пучение

Наиболее актуальной проблемой устройства и эксплуатации транспортных тоннелей в условиях Урала и Сибири является морозное пучение грунтов. Это явление обусловлено наличием значительных массивов глинистых тонкодисперсных грунтов, подверженных пучению, обводненностью территорий, суровыми климатическими условиями, большой продолжительностью периода отрицательных температур.

Есть два пути предотвращения деформаций сооружений от действия морозного пучения грунта. Во-первых, это снижение влияния сил пучения на сооружения. Во-вторых, это восприятие сил пучения конструкциями сооружений.

Снизить влияние сил морозного пучения на заглубленные сооружения в обводненных глинах – достаточно сложный вопрос. При условии выполнения ряда защитных мероприятий явление морозного пучения грунта в той или иной мере продолжает возникать.

Второй путь борьбы с силами морозного пучения грунта предусматривает проектирование конструкций транспортных тоннелей, способных воспринять эти силы, что позволит надежно эксплуатировать подземные сооружения. Таким образом, ключевым вопросом проектирования рационального поперечного сечения тоннеля является определение величин сил пучения на разных участках вокруг заглубленного сооружения.

Величина сил морозного пучения зависит от вида грунта, дисперсности его частиц, содержания воды, расположения промерзающего участка по глубине, температурного режима грунтов [1].

Бетонные конструкции тоннелей обладают большой теплопроводностью, что увеличивает вероятность глубокого проникновения потока холода в грунт. Поэтому расчет оснований и стен малозаглубленных транспортных сооружений на морозное пучение актуально производить как для открытых для атмосферного холода поверхностей.

Силы морозного пучения грунта оказывают влияние не только на основание, но и на боковые поверхности заглубленного сооружения, создавая промерзание по контуру конструкции. При *промерзании грунта под основанием* сооружения в вертикальном направлении возникают нормальные и касательные силы морозного пучения, действующие перпендикулярно основанию и по касательной к поверхности стен. Результатом является изгиб основания и подъем сооружения. В горизонтальном направлении по *причине промерзания стен* изнутри сооружения действуют силы морозного пучения, нормальные к поверхности стен и касательные по отношению к основанию. Как следствие происходит изгиб стен и сдвиг сооружения по подошве.

Из перечисленных сил морозного пучения наименее изучены горизонтальные силы, действующие по нормали к поверхности стен тоннелей.

Характер распределения горизонтальных нормальных сил морозного пучения по высоте заглубленного сооружения (рис. 1) определяется расположением зон промерзания грунта и имеет общие типичные черты [2]. Однако порядок распределения величин сил пучения индивидуален для каждого фактического комплекса климатических и гидрогеологических условий.

Рассматривая комплексы горизонтальных нормальных сил морозного пучения в аспекте обеспечения прочности и устойчивости конструкций тоннеля, по высоте заглубленного сооружения можно выделить три основных участка по интенсивности промерзания.

Участки интенсивного промерзания 1 и 2 (рис. 1) находятся у дневной поверхности и у основания тоннеля.

Участок грунта 3 (рис. 1), расположенный между ними, промерзает в меньшей степени. Бесков [3], исследуя глинистый грунт, расположенный между прослойками льда, отмечал, что он не промерзает. Это явление определяется термическими свойствами промерзших глинистых грунтов, в частности теплопроводностью. Вследствие этого есть основание считать промерзшие зоны 1 и 2 своего рода теплоизоляторами, сохраняющими зону 3 не промерзшей или частично промерзшей. Таким образом, низкий уровень промерзания зоны 3 обеспечивается за счет его обезвоживания при миграции влаги в более холодные области; низкой теплопроводности соседних участков интенсивного промерзания [4]; меньшего промерзания в горизонтальном направлении по причине анизотропии свойств промерзающего грунта.

Комплекс сил морозного пучения в различных зонах будет складываться из *массового пучения грунта при кристаллизации содержащейся в грунте воды и замерзании миграционной влаги, миграционного льдонакопления, усадки талой зоны*, различаясь величинами этих составляющих.

$$F_{\text{пуч.1}} = F_{\text{масс.1}} + F_{\text{w 1}} - F_{\text{ус.1}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{масс.1}}$ - величина пучения за счет кристаллизации влаги в верхней зоне грунта;

$F_{\text{w 1}}$ - величина пучения за счет миграции влаги в верхнюю зону грунта;

$F_{\text{ус.1}}$ - величина усадки талой зоны;

Указанный комплекс сил при определенных граничных условиях будет вызывать соответствующие деформации пучения. Расчет величин деформаций пучения на разных глубинах в пределах сооружения является отправной точкой для определения усилий от сил морозного пучения в конструкции тоннеля.

Решение в общем виде задачи определения усилий в конструкциях тоннеля от нормальных сил морозного пучения, действующих на стену сооружения, может быть выполнено в следующей последовательности:

- Расчет деформаций пучения h_f на разных глубинах.
- Определение соответствующих нормальных сил морозного пучения $\sigma_{\text{пуч. н.}}$.
- Построение по полученным данным кривых максимального и минимального пучения для данного вида грунтов.
- Определение по построенным кривым разницы $\Delta \sigma_{\text{пуч.н.}}$ между максимальными нормальными силами пучения и минимальными с учетом уравнивающих сил тяжести грунта и сооружения.
- По $\Delta \sigma_{\text{пуч.н.}}$ вычисление погонной нагрузки на сооружение. Определение усилий в элементах сооружения.

Расчет **деформации пучения h_f** выполняется по формуле [5], [6], [7]:

$$h_f = 0.09(w_{\text{tot}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z + 1.09 SP \times t \times \text{grad } t, \quad (2)$$

ρ_d/ρ_w - коэффициент пересчета массовой влажности в объемную;

z - глубина промерзания грунта (в вертикальном направлении); толщина слоя промерзшего грунта (в горизонтальном направлении);

Учет **расчетной нормальной силы пучения $\sigma_{\text{пуч.н.}}$** может быть выполнен **двумя способами**.

В первом случае в условиях *одномерной задачи* значение *расчетной нормальной силы пучения* $\sigma_{\text{пуч.н.}}$ в вертикальном направлении может быть определено согласно указаниям [8] по формуле

$$\sigma = \frac{2d_{fz}(a+b)}{ah}\sigma_s, \quad (3)$$

где a, b – стороны расчетной поверхности сооружения;

 d_{fz} - мощность слоя промерзающего грунта;

σ_s - сопротивление смещению (сдвигу) мерзлого грунта относительно элемента сооружения;

$$\sigma_s = k v_f \exp 0.525 T_{d \min}, \quad (4)$$

где v_f - средняя скорость пучения грунта;

$T_{d\ min}$ - абсолютное значение минимальной температуры мерзлого грунта в пределах расчетной поверхности сооружения.

Рис. 1. Зоны промерзания грунта вокруг тоннеля

[Zones of soil heaving around tunnel]

В *одномерной задаче*, учитывающей только вертикальное промерзание, возникновение горизонтальных нормальных сил морозного пучения обусловлено анизотропией пучения. В соответствии с исследованиями [9] коэффициент анизотропии определяется экспериментально и представляет собой соотношение

$$\psi_a = \frac{\varepsilon_{fh}}{\varepsilon_{fh\perp}}, \quad (5)$$

где ε_{fh} и $\varepsilon_{fh\perp}$ - относительные деформации морозного пучения параллельно и перпендикулярно фронту промерзания.

Тогда максимальную величину удельного нормального давления морозного пучения глинистого грунта, действующего на заглубленную конструкцию перпендикулярно фронту промерзания, можно определить по формуле Карлова В. Д.:

$$P_{fh \max 90} = \frac{\alpha \frac{\rho_d}{\rho_w} w - \beta}{\psi}, \quad (6)$$

где $\frac{\rho_d}{\rho_w} w$ - объемная влажность глинистого грунта.;

α , β , ψ - коэффициенты, определяемые экспериментально.

Во *втором случае*, рассматривая двустороннее промерзание стен тоннеля - в вертикальном направлении от дневной поверхности и горизонтально через стенку - можно говорить о *двустороннем промерзании, т.е. неоднородной задаче* [2].

Авторы [11], исследуя методику Карлова В.Д. [10] в *неоднородной постановке*, определили, что вертикальная и горизонтальная деформации пучения при *двустороннем промерзании* имеют сопоставимые значения. Т.е. при наличии *двух фронтов* на одной глубине вертикальные и горизонтальные деформации морозного пучения близки по величине.

Следовательно, график, построенный для промерзания грунта в вертикальном направлении (рис. 2) по методике [12], применим и для определения горизонтальных сил пучения.

Тогда, рассматривая двустороннее промерзание с ориентировочно равными *скоростями движения фронтов* в первом приближении, принимается:

$$\sigma_{\text{пуч.}}^{\text{верт.}} \sim \sigma_{\text{пуч.}}^{\text{гор.}}$$

Наиболее критично для конструкций сооружения воздействие не самих сил пучения, а их неравномерность [12], [13]. Для учета *неравномерности пучения* строятся кривые максимального и минимального пучения (рис. 2). Построение кривых максимального и минимального пучения для данного вида грунта по полученным h_f и $\sigma_{\text{пуч.н.}}$, в каждом отдельном случае будет определяться составом, строением и условиями промерзания грунта [14], [15], [16].

Кривая 1 характеризует максимальное пучение, кривая 2 - минимальное (рис. 2). Максимальным нормальным силам пучения $\sigma_{\text{пуч.н}}$ соответствует величина, определяемая отрезком BF. Данный отрезок отличается от минимального пучения при тех же силах $\sigma_{\text{пуч.н}}$ на величину избыточного пучения, определяемого отрезком AF. Отрезок AF может быть представлен как сумма допускаемого по условиям эксплуатации сооружения неравномерного пучения Δh_f и неуровновешенного избыточного пучения GF, которое должно быть либо устранено, либо воспринято элементами сооружения.

Полному допускаемому пучению $BG = h_{\text{пуч.}}$, на кривой максимального пучения 1 соответствуют нормальные силы пучения $\sigma_{\text{пуч.}}$ и 2. Нормальным силам при минимальном пучении,

уравновешенным силой тяжести грунта, соответствует величина $\sigma_{\text{пуч.н1}}$. Силы $\sigma_{\text{пуч.н2}}$ отличаются от $\sigma_{\text{пуч.н1}}$ на величину, определяемую отрезком DG

$$DG = \Delta\sigma_{\text{пуч.}}^{\text{н}} = \sigma_{\text{пуч.2}}^{\text{н}} - \sigma_{\text{пуч.1}}^{\text{н}}$$

Восприятие сил $\Delta\sigma_{\text{пуч.}}^{\text{н}}$ позволит создать равновесие в системе «пучинистый грунт – обделка тоннеля».

После построения графика зависимостей деформаций пучения от нормальных сил пучения по фактическим значениям h_f (**величина свободного пучения**) и Δh_f (**величина допустимого неравномерного пучения**) на требуемых глубинах определяется $\Delta\sigma_{\text{пуч. н.}}$

При этом величина **свободного пучения** h_f определяется по формуле (2). Величина **допустимого неравномерного пучения** Δh_f определяется по условиям эксплуатации сооружения и для горизонтальных сил, действующих на железобетонную обделку тоннеля, может быть определена как допускаемый прогиб стены сооружения в соответствии с положениями ¹. Согласно указаниям ² для железобетонных элементов стен тоннелей учитывается величина горизонтальных прогибов и раскрытия трещин. Величина прогиба от воздействия постоянной и временной нагрузок для стен подземных сооружений не должна превышать $1/300$ Н (Н - расчетная высота стены) при предельной величине длительного раскрытия отдельных трещин до 0,3, кратковременного - до 0,4 мм.

$$f_{\text{общ.}} = \frac{1}{300} H = \frac{1}{300} 450 \text{ см} = 1.5 \text{ см} \quad (5)$$

Принимаем прогиб стены тоннеля от сил морозного пучения

$$\Delta h_f = f_{\text{пуч.}} = f_{\text{общ.}} - f_{\text{грунта}} \quad (6)$$

Затем по $\Delta\sigma_{\text{пуч.н}}$ строится **эпюра давления от нормальных сил морозного пучения** на стену сооружения и вычисляется погонная нагрузка q на стену сооружения с учетом ширины грузовой полосы 1 м на разных глубинах.

¹ СП 122.13330.2012. Свод правил. Тоннели железнодорожные и автодорожные.

² Там же

Рис. 2. Зависимость между нормальными силами пучения и деформациями пучения фундаментов с различной степенью недопущения деформаций: 1 и 2 – кривые максимального и минимального пучения. Кривая 1 – кривая максимального пучения (обработка в работе [12] экспериментальных данных Н.А. Толкачева [13]).

[The relationship between the normal forces and deformations of heaving for foundations with a various degree of deformation exclusion: 1 and 2 - the curves of maximum and minimum heaving. Curve 1 - a curve of the maximum heaving (processing of N.A. Tolkaicheva experimental data [13] in [12])]

Силы морозного пучения грунта являются временной нагрузкой, которая всегда действует в сочетании с постоянной нагрузкой от давления грунта. Эпюра давления грунта имеет тенденцию к увеличению по глубине. Сложение эпюр давления грунта и сил морозного пучения при двустороннем промерзании дает **совмещенную эпюру давления** на стену подземного сооружения с максимальными значениями в нижней части стены тоннеля. На основании совмещенной эпюры давления определяются усилия в элементах сооружения, которые могут быть реализованы в соответствующих поперечных сечениях тоннеля.

Таким образом, рассмотрение воздействия на стену тоннеля двух фронтов промерзания и учет неравномерности пучения позволяет воспроизвести напряженно-деформированное состояние конструкций заглубленного сооружения в промерзающем грунте и подобрать оптимальное сечение тоннеля согласно фактическому распределению действующих усилий.

Рассмотренные методы проектирования тоннелей является эффективным направлением на пути снижения материалоемкости протяженных транспортных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 186с.
2. Юшков Б.С., Третьякова О.В., Ребров С.А. Рациональные подходы к проектированию заглубленных транспортных тоннелей в условиях морозного пучения грунтов. М.: Сборник «Дороги и мосты», ФГУП «РОСДОРНИИ», 2015.
3. G. Beskow. The Swedish Geological Society, C, no. 375, Year Book no. 3. Technological 537 Institute, Northwestern University, 1935. Reprinted in Historical Perspectives in Frost Heave Research (P. B. Black and M. J. Hardenberg, eds.) CRREL Special Report No.539 91-23, pp 37–157, 1991.
4. S. Akagawa. Experimental study of frozen fringe characteristics. Cold Regions Science 688 and Technology, 15:209–223, 1988.
5. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезонно промерзающих грунтах. М.; Изд-во АСВ, 2000. - 152с.
6. Konrad J.M. Frost heave mechanics: Ph. D. Thesis, Edmonton Alberta. -1980. – 472 p.
7. Konrad J.M. Procedure for determining the segregation potential of freezing soils// Geotech. Testing J. – 1987. – V.10. - №2. – P. 51 – 58.
8. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72с.
9. Кудрявцев С.А. Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания морозоопасных грунтов / С.А. Кудрявцев. – СПб.; М.: АСВ, 2004.-37с.
10. Карлов В.Д. Основания и фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах / В.Д.Карлов. – СПб.: СПбГАСУ, 2007. – 362с.
11. Мельников А. В., Сахаров И. И. Определение параметров напряженно-деформированного состояния промерзающего пучинистого грунта в неоднотонной постановке. ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург.
12. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Москва. Изд. «Высшая школа». 1963г. 636с.
13. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Ершова Э.Д.- М: Изд-во Моск. ун-та, 1985. - 167с.
14. Ершов Э.Д. Физикохимия и механика мерзлых пород. М.; Изд-во МГУ, 1986. - 336с.
15. Толкачев Н.А. Исследование нормальных сил морозного пучения грунтов в лабораторных и природных условиях. Записки Забайкал. Фил. Геогр. об-ва СССР, вып. 91, 1973г.
16. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. - М.: Наука, 1984 – 230с.

Yushkov Boris Semenovich

Perm National Research Polytechnic University, Russia, Perm
E-mail: Zzverdvd@mail.ru

Tretyakova Olga Viktorovna

«PZSP», Russia, Perm
E-mail: Olga_wsw@mail.ru

Methods of the transport tunnel protection from the frost heaving of soil based on the calculation of building structures

Abstract. The article presents possibilities of protecting transport tunnels from the frost heaving of soil by methods of reducing impact of heaving forces and methods of perception of these effects by the building structures. The most optimal method was defined as that based on the calculation of building structures. The impact of tangential and normal forces of frost heaving on the construction of transport tunnel was analyzed. The distribution of typical zones of the soil freezing beyond the wall of embedded structure, as well as components of the soil frost heaving forces acting in these zones are shown in this article. In general terms the authors present a procedure of solving problem of determining efforts in the tunnel constructions from the normal forces of frost heaving, acting on the building wall. The solution includes a definition of normal forces of frost heaving, account of the action non-uniformity of normal heaving forces and calculation of efforts resulting in structures. In case of one-dimensional (vertical) freezing the normal horizontal forces are determined with due consideration of the heaving anisotropy and anisotropy factor. In case of non-one-dimensional (bilateral) freezing - from the daylight surface and through the wall - the normal horizontal forces of frost heaving have values comparable with the vertical ones. The summing action on the wall of embedded structure is composed of horizontal pressure of the normal forces of frost heaving and soil pressure.

Keywords: crystallization of soil water; moisture migration; ice storage; frost heaving of soil; shrinkage of thawed zone; anisotropy of frost heaving; double-sided freezing; free heaving; permissible non-uniform heaving

REFERENCES

1. G.M. Feldman The forecast temperature of soils and development of cryogenic processes. - Nauka, Novosibirsk, 1977. – 186p.
2. Yushkov B.S., O. Tretyakova, S. Rebrov. Rational approaches to the design of transport tunnels buried under frost heaving soils. М.: Collection "Roads and bridges", FSUE "ROSDORNII", 2015.
3. G. Beskow. The Swedish Geological Society, C, no. 375, Year Book no. 3. Technological 537 Institute, Northwestern University, 1935. Reprinted in Historical Perspectives in Frost Heave Research (P. B. Black and M. J. Hardenberg, eds.) CRREL Special Report No.539 91-23, pp 37–157, 1991.
4. S. Akagawa. Experimental study of frozen fringe characteristics. Cold Regions Science and Technology, 15:209–223, 1988.
5. AL Nevzorov Foundations in seasonally freezing soils. М.: Publishing house of the DIA, 2000 – 152p.
6. Konrad J.M. Frost heave mechanics: Ph. D. Thesis, Edmonton Alberta. -1980. – 472 p.
7. Konrad J.M. Procedure for determining the segregation potential of freezing soils// Geotech. Testing J. – 1987. – V.10. - №2. – P. 51 – 58.
8. Guidelines for Accounting and prevention of deformations and forces of frost heaving of soils / PNIIS. - М.: Stroyizdat, 1986. - 72с.
9. S.A. Kudryavtsev Geotechnical modeling of the freezing and thawing of the soil Frost / SA Kudryavtsev. - St. Petersburg.; М.: DIA, 2004, 37с.
10. Charles V.D. Foundations for SEASONALLY soils / V.D.Karlov. - SPb.: Civil Engineering, 2007. - 362s.
11. Melnikov A.V. Sakharov I. Defining the parameters of the stress-strain state of the freezing heaving soils in multidimensional setting. VPO "Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering", St. Petersburg.
12. Tsytovich N.A. The mechanics of frozen soils. Moscow. Ed. Graduate School. 1963. 636p.
13. Deformations and stresses of freezing and thawing in rocks / Ed. Yershov E.D.- М: Univ. University Press, 1985. – 167p.
14. Yershov E.D. Physical chemistry and mechanics of frozen soils. М.: MGU, 1986. – 336p.
15. Tolkachev N.A. A study of normal forces of frost heaving of soils in laboratory and natural conditions. Notes Zabaykal. Phil. Geogr. the Society of the USSR, Vol. 91, 1973.
16. Grechishchev S.E., Chistotinov L.V., Shur Y.L. Fundamentals of modeling cryogenic physical and geological processes. - М.: Science, 1984 – 230p.