ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

DOI 10.15593/2409-5125/2016.04.08

УДК 624.195: 624.139.22

О.В. Третьякова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

МЕТОДИКА СНИЖЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ АВТОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ УРАЛА И СИБИРИ

В условиях современного мегаполиса, перегруженного наземным транспортом, использование подземного пространства является актуальным. Предметом исследования являются автодорожные тоннели мелкого заложения. Для эффективного функционирования тоннелей необходимо обеспечить их безаварийность и безопасность при эксплуатации. Проанализировано состояние вопроса безопасной эксплуатации автотранспортных тоннелей в действующих российских нормативных документах. Проведенный анализ позволил обозначить в качестве основной задачи технического проектирования недопущение признаков предельных состояний конструкций сооружений. В регионах Урала и Сибири, в силу климатических и гидрогеологических условий, основной причиной достижения конструкциями мелкозаглубленных тоннелей предельных состояний и, как следствие, аварийности является такое опасное природное явление, как морозное пучение грунтов. Цель данной работы – снижение негативного влияния сил морозного пучения на тоннели мелкого заложения, обеспечение их целостности. Предложена методика защиты тоннеля от влияния промерзающего грунта свайным фундаментом с использованием буронабивной сваи с верхним обратным конусом. Конструкция сваи обеспечивает снижение влияния морозного пучения грунта на тоннельные сооружения. Применение обратного конуса значительно повышает сопротивление сваи выдергиванию силами морозного пучения за счет появления составляющих этих сил, удерживающих сваю от подъема, обеспечивая тем самым сохранение целостности конструкции тоннеля. Главная идея сваи – расчетное преобразование сил пучения в позитивные удерживающие силы за счет конструкции сваи, без дополнительных элементов и мероприятий. Использование разработанной сваи с обратным конусом в основании тоннелей мелкого заложения приведет к сниже-

нию аварийности сооружений в пучинистом грунте с уменьшением стоимости их возведения и эксплуатации.

Ключевые слова: автодорожный тоннель, аварийность, предельное состояние, морозное пучение, нормальные и касательные силы, напряженно-деформированное состояние, выдергивающая нагрузка, буронабивная свая, обратный конус.

Рост количества транспортных средств в современном мегаполисе наряду с увеличением уровня жизни людей влечет за собой такие негативные последствия, как многочасовые затруднения дорожного движения, загазованность жилых кварталов и территорий общественной инфраструктуры. Разрешить эти вопросы можно за счет использования подземного пространства городов. Поэтому видится актуальным проектирование автодорожных тоннелей различного назначения – от небольших переходов и элементов автомобильных развязок до транспортных веток значительной длины.

Удешевление строительства и эксплуатации тоннельных сооружений при одновременном выполнении требований безопасности, установленных в «Техническом регламенте о безопасности зданий и сооружений» (№ 384-ФЗ), является сегодняшней задачей технического проектирования. Поставленным условиям отвечают автодорожные тоннели мелкого заложения. Это объясняется снижением стоимости возведения сооружений, уменьшением расходов на обслуживание и эксплуатацию, повышением уровня комфортности при пользовании транспортными линиями, не требующими спуска на большую глубину. За последние годы мелкозаглубленные тоннели приобретают все большую значимость, как для гражданской застройки, так и для промышленного комплекса страны.

Тоннельные сооружения расположены ниже дневной поверхности, вне обзора и находятся под постоянным влиянием окружающего их грунта. Эти условия повышают вероятность нарушения целостности и аварий сооружений, что создает опасность для жизни и здоровья людей, а также увеличивает эксплуатационные расходы. Исключение факторов, приводящих к аварийности, является залогом безопасного и эффективного функционирования автодорожных тоннелей. Обеспечение безопасности тоннельных коммуникаций – актуальный вопрос для ученых-исследователей, проектировщиков, строителей и эксплуатирующих организаций.

С позиции Федерального закона № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» критериями безопас-

ности является недопущение ни одного из признаков предельных состояний конструкций, прежде всего путем учета опасных природных процессов.

Наиболее сложными в части климатических и гидрогеологических условий являются регионы Урала и Сибири. Значительные массивы глинистых грунтов, обводненность территорий, длительный период отрицательных температур создают условия для возникновения такого явления, как морозное пучение грунтов. Силы морозного пучения, вызывая неравномерный подъем сооружений, служат причиной аварий автодорожных сооружений в холодных районах. Вместе с этим заметим, что конструкция тоннеля является малонагруженной, так как вес конструкции, включая засыпку и нагрузку от дорожного покрытия, значительно меньше веса грунта, взятого в объеме сооружения. Эти факторы требуют учета влияния сил морозного пучения грунтов, не уравновешенных внешней нагрузкой, при проектировании. Необходимость учета влияния сил пучения усложняет процесс проектирования и возведения автодорожных коммуникаций, удорожает их эксплуатацию.

Негативное влияние промерзающего грунта на тоннели обозначено в действующих нормативных документах. Однако взаимодействие заглубленных сооружений с промерзающим грунтом недостаточно освещено в нормативной литературе, и эта проблема остается актуальной темой исследований.

Изучением влияния сил морозного пучения на тоннели мелкого заложения занимались многие российские ученые, в их числе – Р.Ш. Абжалимов, О.Р. Голли, В.Д. Карлов, Б.Е. Славин, В.Е. Соколов [1–5]. Авторы констатируют, что в суровых климатических условиях в зимний период под воздействием холодного фронта со стороны дневной поверхности в тоннелях устанавливается отрицательная температура. Вследствие этого окружающий грунт промерзает, возникает опасность нарушения целостности конструкций сооружения под влиянием сил морозного пучения грунта. В работах отмечены аварии и повреждения легких сооружений мелкого заложения, возводимых на сезонно промерзающих грунтах. Изучению закономерностей возникновения сил морозного пучения вокруг тоннелей посвящен ряд работ зарубежных исследователей [6, 7, 15].

Несмотря на многочисленные разработки, тема защиты тоннелей мелкого заложения от морозного пучения грунта требует дальнейшего развития, направленного на повышение практической применимости полученных результатов.

Объектом проведенного автором исследования стали мелкозаглубленные автодорожные тоннели, эксплуатируемые в сезонно промерзающих глинистых грунтах Урала и Сибири, подверженных морозному пучению.

Целью работы является снижение влияния промерзающего грунта на тоннели мелкого заложения, возводимые в холодных районах. Для достижения этой цели решались задачи нейтрализации сил морозного пучения грунта, действующих на тоннельные сооружения, снижения затрат на их возведение и эксплуатацию.

Для нахождения оптимального метода защиты тоннелей мелкого заложения от влияния промерзающего грунта необходимо проанализировать, как распределяются силы морозного пучения в массиве промерзающего грунта, прилегающем к тоннелю, выявить конструкции сооружения, наиболее подверженные действию этого опасного природного явления [8–10].

Проведенное исследование показало, что характер промерзания грунта вокруг тоннеля мелкого заложения обусловлен распределением потоков холодного воздуха и материалом конструкций. Охлаждение прилегающего к тоннелю массива грунта происходит за счет двух холодных фронтов. Один из них распространяется от дневной поверхности вследствие сезонного промерзания грунта, второй – изнутри сооружения. Внутрь тоннеля холодный воздух попадает через выходы на поверхность. Кроме того, охлаждение грунта вокруг тоннеля происходит за счет высокой теплопроводности бетонных конструкций.

Холодный воздух внутри тоннеля вызывает промерзание грунта через железобетонные стены и пол. По законам конвекции холодный фронт, попадающий в тоннель, перемещается к полу, вызывая в первую очередь промерзание грунта под днищем тоннеля.

Холодный фронт, распространяющийся от дневной поверхности при ее промерзании, приводит к охлаждению грунта за стеной. Накоплен опыт теплотехнических исследований грунтового массива, прилегающего к тоннелю мелкого заложения, которые были

проведены российскими и зарубежными учеными в разные периоды [11, 12]. Исследования показали, что стена тоннеля находится в зоне выровненного температурного режима. Охлаждение грунта за стеной тоннеля вблизи дневной поверхности компенсируется за счет перемещения более теплого внутреннего воздуха к перекрытию тоннеля. С увеличением глубины выравнивание температуры грунта происходит за счет роста массивности его слоя.

Опираясь на проведенный анализ и накопленный опыт теплотехнических исследований, отметим, что охлаждение грунта за стеной тоннеля незначительно. Зона грунта под днищем тоннеля охлаждается как открытая для холода поверхность и подвержена промерзанию, приводящему к интенсивному морозному пучению. Для восприятия этого негативного фактора в рамках исследования применялось свайное основание, как более экономичное в альтернативу конструкциям «стена в грунте». Конструкция рассматриваемого тоннеля показана на рис. 1.

Рис. 1. Конструктивное решение тоннеля с применением свай, имеющих обратный конус: 1 – колонна; 2 – стена тоннеля; 3 – дорожные плиты; 4 – разделительная полоса; 5 – свайный ростверк среднего ряда; 6 – свайный ростверк крайнего ряда; 7 – свая среднего ряда; 8 – свая крайнего ряда; 9 – дорожное покрытие; 10 – подсыпка из песчано-гравийной смеси; 11 – георешетка; 12 – дренажная труба

В общем случае свайные фундаменты нейтрализуют касательные силы пучения за счет трения по боковой поверхности сваи, расположенной в талом грунте. Это неэффективно, так как требует значительной длины свай. Уменьшение длины свай возможно при снижении сил пучения за счет *оптимизации* конструктивного решения свай, их *формы* [13, 14]. Исследования в этой области перспективны, но недостаточны для практического применения и требуют дальнейшего развития.

Предложен метод снижения выдергивающих усилий в зоне интенсивного пучения, расположенной под основанием тоннеля, свайным фундаментом с применением свай с верхним обратным конусом. Методика защиты конструкции тоннеля (см. рис. 1) от сил морозного пучения, развивающихся в нижней части стены и под основанием сооружения, заключается в следующем. Дорожные плиты, выполненные по дренирующей подсыпке, опираются на ростверки колонн и стен. Тем самым плиты проезжей части освобождаются от влияния нормальных сил морозного пучения под днищем тоннеля. Все постоянные и временные нагрузки, а также усилия от морозного пучения грунта, действующие на тоннель, воспринимают свайные фундаменты применяемой конструкции, устойчивой к действию сил морозного пучения. Конструктивное решение и расчетная схема сваи показаны на рис. 2. Свая имеет расчетные геометрические параметры, выполнена по буронабивной технологии. Буронабивная свая оптимальна при устройстве протяженных тоннельных линий, отдаленных от промышленных участков производства сборных железобетонных элементов.

Основная идея и научная новизна исследования заключается в расчетном преобразовании горизонтальных нормальных сил морозного пучения в позитивные силы, удерживающие сваю в грунте при ее выдергивании касательными силами пучения. Удерживающая составляющая возникает в пределах конусной части сваи, имеющей расчетный угол наклона. Горизонтальные нормальные силы пучения определены как функция пористости и избыточной влажности грунта.

Для оценки показателей рассматриваемой сваи проведены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых установлено повышенное сопротивление выдергиванию силами морозного пучения сваи с верхним обратным конусом.

Рис. 2. Расчетно-конструктивная схема сваи с верхним обратным конусом: σ_f – напряжения морозного пучения, направленные по нормали к боковой поверхности сваи; L_1 – длина части сваи постоянного сечения, расположенной в мерзлом грунте; L_2 – длина части сваи постоянного сечения, расположенной в талом грунте; L_k – длина верхнего обратного конуса сваи; $F_{св1}$, $F_{св2}$ – площади боковой поверхности участков сваи постоянного сечения, расположенных в мерзлом и талом грунте соответственно; выдергивающие силы: τ_f – касательные напряжения морозного пучения, действующие на участке сваи, расположенном в мерзлом грунте; силы, удерживающие сваю в грунте: P – сумма внешней постоянной нагрузки и собственного веса сваи; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи в талой зоне; $\sigma_f \sin \alpha$ – составляющая напряжений пучения, направленные по нормали к боковой поверхности сваи, в пределах обратного конуса, расположенного в мерзлом грунте

Экспериментальными исследованиями подтверждено возникновение в пределах конической части вертикальной составляющей горизонтальных нормальных сил морозного пучения. Указанная составляющая возникает за счет наклона поверхности конусной части сваи и удерживает сваю от подъема при морозном пучении грунта. Определены вертикальные перемещения сваи с верхним обратным конусом и сваи без конуса при сезонном промерзании грунта. Перемещения первой составили меньшую величину.

Кроме перечисленных основных факторов в формировании напряженно-деформированного состояния сваи с верхним обратным конусом происходит еще ряд явлений. В конусном элементе

при действии касательных сил морозного пучения развивается реактивный отпор грунта, также предотвращающий подъем сваи. При выдергивании сваи с обратным конусом некоторый объем грунта над ней в виде усеченного конуса выпирания перемещается вверх вместе со свайей. Этот фактор также оказывает на сваю удерживающее влияние. Неучтенные в расчете нагрузки от конуса выпирания, силы сопротивления грунта отрыву, действующей по его боковой поверхности, создают некоторый запас прочности для сваи с обратным конусом.

Получена формула для вычисления оптимального угла наклона конуса сваи. Для глинистых грунтов определен угол наклона обратного конуса 5–8 град. Угол наклона сваи вычисляется из условия равновесия сваи в грунте при ее выдергивании касательными силами морозного пучения.

Уравнение равновесия сваи в грунте:

$$\tau_f \cdot F_k + \tau_f \cdot F_{св1} - f_i \cdot F_{св2} - P - \sigma_f \cdot \sin \alpha \cdot F_k = 0, \quad (1)$$

где σ_f – нормальное напряжение морозного пучения грунта на боковой поверхности сваи; τ_f – касательное напряжение морозного пучения грунта, оказывающее на сваю выдергивающее действие; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи в талом грунте, оказывающее на сваю удерживающее действие; P – сумма внешней нагрузки и собственного веса сваи; $F_{св1}$ – площадь боковой поверхности сваи в мерзлом грунте без учета конуса; $F_{св2}$ – площадь боковой поверхности сваи в талом грунте; F_k – площадь боковой поверхности конусной части сваи; α – угол наклона боковой поверхности конусной части сваи.

Выражение (1) после преобразования примет вид квадратного уравнения (2):

$$\sigma_f \cdot \pi \cdot L^2 \cdot \sin^2 \alpha + (-\sigma_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - \tau_f \cdot \pi \cdot L^2) \cdot \sin \alpha + (\tau_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - d) = 0, \quad (2)$$

где L – длина верхнего обратного конуса сваи; R – больший радиус верхнего обратного конуса.

Корнями уравнения будет $\sin \alpha$ – синус угла наклона верхнего обратного конуса сваи, необходимый для выполнения условия равновесия сваи в грунте:

$$\begin{aligned}
 x_{1,2} = \sin \alpha &= \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2 \cdot a}, \\
 x_2 = \sin \alpha &= \frac{(2 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L \cdot R + \tau_f \cdot \pi \cdot L^2)}{2 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2} - \\
 &- \frac{\sqrt{\tau_f^2 \cdot \pi^2 \cdot L^4 + 4 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2 \cdot (\sigma_f \cdot \pi \cdot R^2 - \tau_f \cdot \pi \cdot L \cdot R + d)}}{2 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Правильно подобранные геометрические параметры верхнего конуса сваи создают условия для формирования комплекса удерживающих сил, превышающего сумму выдергивающих нагрузок, позволяя обеспечить целостность надфундаментных конструкций.

Критерием оценки устойчивости сваи к действию сил морозного пучения является величина подъема сваи – вертикального перемещения. Такие ежегодные перемещения, не являясь полностью обратимыми, приводят к нарушению целостности конструкции тоннеля.

Подъем свайного фундамента при морозном пучении грунта происходит преимущественно за счет касательных сил, формирование которых определяется силами смерзания грунта с боковой поверхностью фундамента. Развивающиеся вокруг сваи силы пучения стремятся переместить сваю вверх. При этом происходит сдвиг мерзлого грунта относительно фундамента. Статические связи смерзания грунта с фундаментом нарушаются. Возникают динамические связи сваи с грунтом, определяемые сопротивлением смещению слоя мерзлого грунта относительно сваи – касательными силами пучения. Получена формула для определения вертикального перемещения сваи с верхним обратным конусом при действии сил морозного пучения:

$$\sum \Delta z_i = \frac{z_1}{E_1} \cdot \left(-\sigma_f \cdot \sin \alpha + \tau_f \cdot \cos \alpha - \frac{P}{F_k} \right) + \frac{z_2}{E_2} \cdot \tau_f - \frac{z_3}{E_3} \cdot f_i, \tag{4}$$

где σ_f – напряжение морозного пучения грунта, нормальное к боковой поверхности сваи; τ_f – касательное напряжение морозного пучения грунта; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи в талой зоне; P – сумма внешней нагрузки и собственного веса сваи; E_1, E_2, E_3 – средние модули упругости слоев мерзлого и талого грунта, окружающего обратный конус, участки сваи постоянного сечения в мерзлом и талом грунте; z_1, z_2, z_3 – высота об-

ратного конуса, участка сваи постоянного сечения в мерзлом грунте, участка сваи постоянного сечения в талом грунте соответственно; F_k – площадь боковой поверхности конусной части сваи.

Заключение. Методом защиты автодорожных тоннелей мелко-го заложения в холодных районах от влияния промерзающего грунта является применение свай с расчетным обратным конусом, обладающих повышенным сопротивлением выдергиванию силами морозного пучения. Наличие обратного конуса в конструкции сваи приводит к возникновению составляющей горизонтальных нормальных сил пучения, удерживающих сваю от подъема при действии касательных сил этой же природы. Нормальные силы пучения определены как функция пористости и избыточной влажности грунта. Данное конструктивное решение подкрепляется результатами теоретических расчетов и натурных экспериментов.

Оптимальность решения заключается в управляемом использовании для борьбы с пучением составляющих этих сил. Применение свай с обратным конусом позволяет преобразовать силы морозного пучения в позитивные удерживающие за счет конструкции сваи, без дополнительных элементов и мероприятий, что существенно снижает затраты на возведение и эксплуатацию автодорожных тоннелей, увеличивает сроки их безаварийной эксплуатации.

Библиографический список

1. Абжалимов Р.Ш. Закономерности взаимодействия пучинистого грунтового основания с фундаментами малоэтажных зданий и подземными сооружениями и методы их расчета: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2011. – 47 с.
2. Голли О.Р. Некоторые условия проектирования и строительства транспортных тоннелей в условиях сурового климата // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2012. – № 5. – URL: <http://www.georec.spb.ru/journals/05/18/18.htm> (дата обращения: 08.10.15).
3. Карлов В.Д. Сезонно промерзающие грунты как основания сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1998. – 349 с.
4. Славин Б.Е., Молчанов В.С. Воздействие сурового климата на конструкции тоннелей метрополитенов // Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 60-летию НИИЖТ. – Ч. 2. Проблемы железнодорожного транспорта Сибири. – Новосибирск, 1992. – С. 5–6.
5. Соколович В.Е. Влияние морозного пучения на разрушение заглубленных конструкций // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 6. – С. 22–23.
6. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation / Ping Yang, Jie-ming Ke, J.G. Wang, Y.K. Chow, Fen-bin Zhu // Computers and Geotechnics. – 2006. – № 33. – P. 330–340.

7. Zhe Ji, Kangcheng Lu, Chaochao Ma. Classification, Causes of Tunnel Frost Damages in Gold Region and Several New Technologies to Prevent Them // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 170-173. – P. 1504–1510.

8. 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. 53–62.

9. Третьякова О.В. Величины нормальных напряжений морозного пучения, развивающихся в глинистых грунтах // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2016. – № 1. – С. 125–141.

10. Третьякова О.В., Юшков Б.С. Вопросы оптимизации формы свай тонких подпорных стен // *Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика: материалы XIII всерос. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2016. – С. 522–533.

11. Рымаров А.Г., Лушин К.И. Особенности расчета теплового режима линейных подземных сооружений на примере автотранспортного тоннеля // *Наука. Строительство. Образование*. – 2011. – № 2. – С. 1–4. – URL: <http://www.nso-journal.ru> (дата обращения: 10.09.2014).

12. Рымаров А.Г., Титков Д.Г. Особенности расчета теплового режима подземного коммуникационного коллектора // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. – 2015. – № 4(40). – С. 1–4. – URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/> (дата обращения: 17.09.2016).

13. Юшков Б.С. Экспериментально-теоретические основы расчета фундаментов из двухконусных свай, устраиваемых в сезонно промерзающих грунтах: моногр. – Пермь: ОТ и ДО, 2015. – 311 с.

14. Пат. RU 153643 U1 Рос. Федерация, МПК E02D 5/44/. Противопучинистая свая / Зекин В.Н., Соргутов И.В., Березнев В.А., Третьякова О.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГСХА им. ак. Д.Н. Прянишникова. – № 2014140627/03; заявл. 07.10.2014; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21. – 5 с.

15. Пат. 3703812 A United States, МПК E02D 5/44, E02D 5/22. Heave-proof Arctic piling / George R. Newton, Tulsa, Okla. Amoco Production Company. – № 93764; заявл. 13.11.1970; опубл. 28.11.1972.

References

1. Abzhalimov R.Sh. Zakonomernosti vzaimodejstviya puchinistogo gruntovogo osnovaniya s fundamentami maloetazhnykh zdaniy i podzemnymi sooruzheniyami i metody ikh rascheta [Legitimacies interaction heaving soil foundation with the foundations of low-rise buildings and underground structures and methods of their calculation]. Abstract of the thesis of doctor's degree dissertation. Moscow, 2011. 47 p.

2. Golli O.R. Nekotorye usloviya proektirovaniya i stroitel'stva transportnykh tunnelej v usloviyakh surovogo klimata [Some conditions of the design and construction of transport tunnels in harsh climate]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2012, no. 5, available at: <http://www.georec.spb.ru/journals/05/18/18.htm> (accessed 8 October 2015).

3. Karlov V.D. Sezonno promerzayushchie grunty kak osnovaniya sooruzhenij [The seasonally freezing soils as the base of facilities]. Thesis of doctor's degree dissertation. Saint Petersburg, 1998. 349 p.

4. Slavin B.E., Molchanov V.S. Vozdejstvie surovogo klimata na konstruksii tonnelej metropolitenov [Exposure to the harsh climate in the construction of subway tunnels]. *Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoj konferentsii, posvyashchennoj 60-letiyu NIIZhT. Vol. 2. Problemy zheleznodorozhnogo transporta Sibiri*. Novosibirsk, 1992, pp. 5–6.
5. Sokolovich V.E. Vliyanie moroznogo pucheniya na razrushenie zaglublennykh konstruksij [Impact of frost heaving on the destruction of the buried structures]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2000, no. 6, pp. 22–23.
6. Ping Yang, Jie-ming Ke, J.G. Wang, Y.K. Chow, Fen-bin Zhu. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation. *Computers and Geotechnics*, 2006, no. 33, pp. 330–340.
7. Zhe Ji, Kangcheng Lu, Chaochao Ma. Classification, Causes of Tunnel Frost Damages in Gold Region and Several New Technologies to Prevent Them. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 170–173, pp. 1504–1510.
8. Yushkov B.S., Tretyakova O.V., Rebrov S.A. Ratsional'nye podkhody k proektirovaniyu zaglublennykh transportnykh tonnelej v usloviyakh moroznogo pucheniya gruntov [Rational approaches to the design of buried transport tunnels under frost heaving soils]. *Dorogi i mosty*, 2015, no. 2, pp. 53–62.
9. Tretyakova O.V. Velichiny normal'nykh napryazhenij moroznogo pucheniya, razvivayushchikhsya v glinistyykh gruntakh [The values of the normal stresses of frost heaving, growing in clay soils]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, 2016, no. 1, pp. 125–141.
10. Tretyakova O.V., Yushkov B.S. Voprosy optimizatsii formy svaj tonkikh podpornykh sten [Questions about optimizing the shape of piles of thin retaining walls]. *Materialy XIII vserossiiskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Ekologiya i nauchno-tekhnicheskij progress. Urbanistika»*. Perm, 2016, pp. 522–533.
11. Rymarov A.G., Lushin K.I. Osobennosti rascheta teplovogo rezhima linejnykh podzemnykh sooruzhenij na primere avtotransportnogo tonnelya [Features of the calculation of the thermal regime of linear underground structures on the example of road tunnel]. *Nauka. Stroitel'stvo. Obrazovanie*. 2011, no. 2, pp. 1–4, available at: <http://www.nso-journal.ru> (accessed 10 September 2014).
12. Rymarov A.G., Titkov D.G. Osobennosti rascheta teplovogo rezhima podzemnogo kommunikatsionnogo kollektora [Peculiarities of calculation of thermal regime of underground communication commutator]. *Internet-vestnik VolgGASU*, 2015, no. 4(40), pp. 1–4, available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/> (accessed 17 September 2016).
13. Yushkov B.S. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy rascheta fundamentov iz dvukhkonusnykh svaj, ustraivaemykh v sezonno promerzajushchikh gruntakh [Experimental and theoretical basis of the calculation of the foundations of the biconical piles, arranged in seasonally freezing soils]. Perm: OT i DO, 2015. 311 p.
14. Zekin V.N., Sorgutov I.V., Bereznev V.A., Tretyakova O.V. Protivopuchinstaya svaya [Against frost heave pile]. Patent 153643 RF. 2015.
15. George R. Newton, Tulsa, Okla. Heave-proof Arctic piling. Patent 3703812 A United States. 1972.

Получено 13.10.2016

O. Tretyakova

**METHODS OF REDUCING THE ACCIDENT RATE
OF SHALLOW LOCATED VEHICULAR TRAFFIC TUNNELS
IN THE URAL AND SIBERIAN REGIONS**

In modern megapolises overloaded with land transport the use of underground space is relevant. The subject of the study is the shallow located vehicular traffic tunnels. It is necessary to ensure fail-safety and operational safety of tunnels. The standards of safe operation of vehicular traffic tunnels in the existing Russian regulatory documents were analyzed. According to the analysis, the main objective for the technical design is to prevent constructions from the signs of limit states. In the regions of the Urals and Siberia the main reason for shallow located vehicular tunnels to achieve limit states leading to accidents is a dangerous natural phenomenon called the frost heave of soil occurring due to climatic and hydrogeological conditions. The aim of this work is to reduce the negative impact of frost heaving forces on shallow tunnels, thus ensuring their integrity. Method of protecting tunnels from the influence of freezing soil by using the foundation with inverted-cone piles is proposed. The inverted-cone pile design decreases the influence of frost heaving of soil on the tunnel structure. This pile reduces the effects of frost heaving of the soil at the tunnel construction. The use of the inverted cone greatly increases the pull-out resistance of the pile to frost heaving due to the appearance of the components of these forces that resist the pile rising, thus preserving the integrity of tunnel construction. The main idea of the pile is the calculated transformation of the frost heave negative forces into the positive forces due to the pile construction without any additional elements and activities. Using the inverted-cone piles at the base of shallow tunnels will reduce the accidents rate for structures used in heaving soils and decrease their construction and operation costs.

Keywords: vehicular traffic tunnel, accident rate, limit state, frost heave, normal and tangential forces, stress-strain state, pull-out load, bored pile, inverted cone.

Третьякова Ольга Викторовна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры автомобильных дорог и мостов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 19а, e-mail: Olga_wsw@mail.ru).

Tretyakova Olga (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student of Automobile Roads and Bridges Department, Perm National Research Polytechnic University (614013, 19a Akademika Koroleva street, Perm, Russian Federation, e-mail: Olga_wsw@mail.ru).