

УДК 625.731

Физические основы упаковки мерзлых комьев грунта в грунтовых массивах в транспортных и гидротехнических сооружениях

А. Н. Шуваев, М. В. Панова*, Я. А. Пронозин

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: panovamv@tyuiu.ru*

Аннотация. Действующие нормативные документы по строительству транспортных и гидротехнических сооружений указывают на применение только талых, в основном песчаных грунтов. При возведении насыпей в зимний период допускается ограниченное количество применяемых мерзлых грунтов. В этом случае снижаются устойчивость и прочность грунтового массива. Отсутствие талых грунтов в районах Сибири и Арктики требует расширения видов применяемых грунтов, одним из которых являются твердомерзлые грунты. Разработанные авторами конструкции земляного полотна позволяют использовать мерзлые грунты, заключенные в геосинтетические обоймы или без них. Одной из научных задач, решаемых в данной статье, является увеличение устойчивости и прочности насыпи за счет создания плотного скелета грунта. Это создается посредством применения теории зернистых сред. В основу формирования плотных систем из мерзлых грунтов на практике предлагается два принципа: способ плотных смесей и способ пропитки, где основной слой из мерзлого грунта пропитывается сверху сухомерзлыми грунтами. Практически подбором состава можно добиться максимальной плотности.

Ключевые слова: агрегаты; грунт; грунтовый массив; контакты; коэффициент уплотнения; плотность

Physical bases of packing of frozen clods of soil in ground massifs in transport and hydraulic structures

Anatoly N. Shuvaev, Marina V. Panova*, Yakov A. Pronozin

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: panovamv@tyuiu.ru*

Abstract. The current regulatory documents for infrastructure construction indicate the use of only thawed, mainly sandy soils. When erecting embankments during the winter period, a limited number of applied frozen soils are allowed. In this case, the stability and strength of the soil massif decrease. The absence of thawed soils in the regions of Siberia and the Arctic requires an expansion of the types of soils used, one of which is frozen soils. We have developed the designs of the subgrade that allow using frozen soils, enclosed in geosynthetic cages or without them. Increasing the stability and strength of the embankment by creating a dense soil skeleton is one of the scientific issues, which is solved in this article by applying the theory of granular media. In practice, the formation of dense systems from frozen soils is based on two principles: the method of dense mixtures and the method of impregnation, where the main layer of frozen soil is impregnated from

above with dry frozen soils. Almost by selection of the composition, you can achieve the maximum density.

Key words: aggregates; soil; soil mass; contacts; compaction coefficient; density

Введение

Научные исследования по созданию транспортной сети и объектов капитального строительства в Сибири начаты с начала 60-х годов прошлого века и были связаны с освоением Западно-Сибирского топливно-энергетического комплекса и невозможностью использовать традиционные методы строительства в особых природно-климатических и грунтово-геологических условиях — на болотах (48 % территории РФ) и в условиях вечной мерзлоты (65 % территории РФ) [1, 2].

Отставание от международного технического уровня в транспортной отрасли РФ на 30–50 лет является сдерживающим фактором социально-экономического развития Арктики и Сибири и освоения природных рудных и нерудных ресурсов Сибири.

Объект исследований

Основным руководящим документом для проектирования автомобильных дорог является СП 34.13330.2012¹, который указывает на применение талых песчаных грунтов, с ограниченным использованием твердомерзлых грунтов. Допускается применение не более 30 % сухомерзлых песков с включением мерзлых комьев размером до 30 см. Однако практика показывает, что исключение комьев размерами более 30 см сдерживает темпы отсыпки насыпей и ведет к непроизводительным затратам. При этом отсутствуют рекомендации по технологии возведения земляного полотна из сухо- и твердомерзлых грунтов с их уплотнением в зимний период [3, 4]. Этот документ также допускает наличие в насыпи «нестабильного слоя», который может быть из мерзлых комьев или талого переувлажненного грунта с коэффициентом уплотнения до 0,95 при высоте насыпи до 3,0 м. Не указана нижняя граница коэффициента уплотнения грунта, что дает возможность возводить земляное полотно самоуплотнением, которое до требуемых параметров достигается годами. Так, для песчаных грунтов это составляет от 0,5 до 2 лет, а для глинистых от 2 до 8 лет в зависимости от их влажности.

В настоящий период отсутствие технологии для уплотнения мерзлых грунтов не обеспечивает требуемый коэффициент уплотнения грунта рабочего слоя более 0,95. Такая степень уплотнения при существующей грунтоуплотняющей технике достигается, как известно, только при использовании талых грунтов. Это значительно ограничивает применение наиболее распространенных видов мерзлых грунтов в районах строительства для возведения земляного полотна, что увеличивает сроки и стоимость строительства.

¹ СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85 [Электронный ресурс]. – Введ. 2013-07-01. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200095524>

Недостаточно изучены их прочностные и деформационные характеристики, а также динамика формирования плотности грунта в насыпи. Принципиальное отличие формирования насыпей из талых и из мерзлых грунтов состоит в том, что уплотненная насыпь из рыхлых горных пород (грунтов) при воздействии нагрузок и погодно-климатических факторов стабильна во времени, а из мерзлых грунтов может подвергаться существенным деформациям при оттаивании — замерзании грунтов насыпи. Необходимо также отметить, что влажность мерзлых комьев грунта в два–три раза выше оптимальной, поэтому устойчивость и прочность оттаявшей переувлажненной насыпи не могут быть обеспечены только за счет плотной упаковки зерен.

Научные исследования и накопленный производственный опыт за последние 50 лет указывают на возможность решения проблемы применения переувлажненных связных, торфяных грунтов, как в талом, так и в мерзлом состояниях, при отсыпке насыпей в особых условиях Арктики и Сибири [2, 3]. Появление на рынке геотехнических материалов стало революцией в транспортном строительстве, в том числе и в области создания новых конструкций земляного полотна на болотах и вечной мерзлоте. Применение геотехники позволило использовать местные некондиционные грунты и сохранять физико-механические свойства сыпучих строительных материалов.

За последние 20 лет разработаны конструкции земляного полотна транспортных и гидротехнических сооружений и площадок, а также технологии их строительства в зимний период из талых и мерзлых местных «некондиционных» грунтов в особых условиях Арктики и Сибири [5–7]. В отличие от традиционных грунтовых массивов получены комбинированные конструкции насыпи, где «некондиционный» грунт заключен в геосинтетические обоймы, которые в зависимости от конструктивных особенностей могут быть как «распорными», так и «безраспорными» системами (рис. 1).

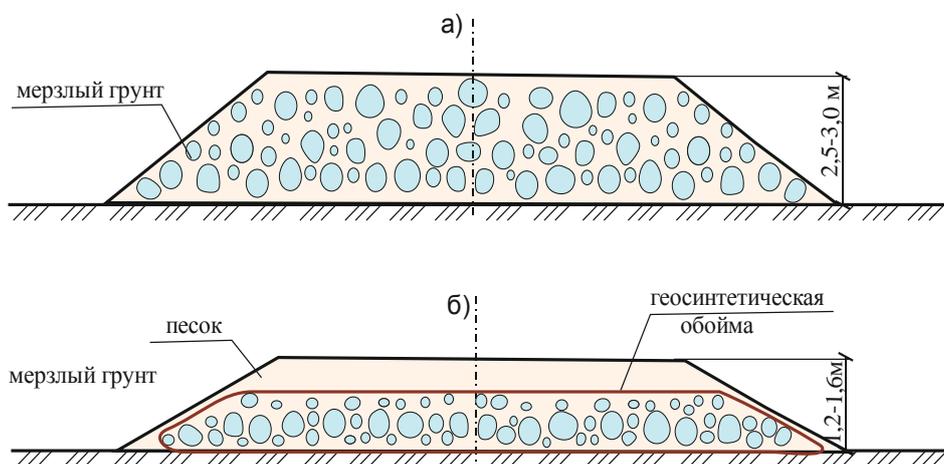


Рис. 1. Конструкции насыпи с применением мерзлых грунтов:
 а) насыпь из мерзлого грунта полного объема (безраспорная система);
 б) насыпь с мерзлым грунтом в геосинтетической обойме (распорная система)

Методология исследований

Задачей представленных в данной статье исследований является повышение прочности и надежности конструктивных слоев грунтовых массивов из мерзлых комковатых грунтов за счет повышения плотности упаковки зерен. Сложность задачи обусловлена не только формированием земляного полотна, полностью возведенного из мерзлых комьев, но и необходимостью обеспечить надлежащую устойчивость насыпи при ее оттаивании в последующие летние периоды.

Грунтовый массив с одинаковыми размерами мерзлых грунтовых зерен по взаимно-перпендикулярным направлениям будет дискретно изотропным. Средний (эффективный) размер частиц в этом случае будет определяться не только наибольшими, но и наименьшими размерами каждого зерна по различным направлениям. Если же вероятность расположения каждой частицы в пространстве не одинакова по всем направлениям, то частицы при образовании структуры материала будут стремиться занять наиболее вероятное положение. Грунтовый массив, образованный такими частицами, будет анизотропным телом. Таким образом, различные по форме частицы могут образовывать различные по свойствам среды. Обычно при представлении грунта как среды грунтовыми частицам придают форму шара [8, 9].

Грунт как многофазная система состоит из комплекса твердых частиц, воды, льда и воздуха. Отдельные твердые частицы, образующие грунтовый скелет, соединены друг с другом весьма разнообразными связями, зависящими от размеров частиц, их формы, влажности грунта и т. д. [10, 11]. Мерзлые грунты по своему строению представляют весьма сложное физическое тело. Взаимное расположение и характер соединения комьев мерзлого грунта друг с другом и заполнителя в виде находящихся в порах грунта и газа образуют структуру грунта, которая является одним из важнейших факторов, определяющих механические и физические свойства грунта. Зерна грунта отличаются между собой геометрическими параметрами и конфигурацией. В нормативных документах транспортного строительства для различных композиционных материалов, где горные породы являются минеральным остовом, разработаны составы оптимальных искусственных смесей. Одним из требований при обосновании составов является обеспечение устойчивости грунтовых массивов под нагрузкой. Распределение напряжений в грунтовом массиве зависит прежде всего от формы зерен грунта [12–16]. Мерзлые грунтовые комья представлены неправильными многогранниками с разными размерами по взаимно-перпендикулярным направлениям. Для частиц с одинаковыми размерами зерен по взаимно-перпендикулярным направлениям при постоянной плотности грунта число этих частиц на единицу длины во всех направлениях грунтового массива будет приблизительно одинаковым. Для частиц, у которых размеры по разным направлениям различны, число их на единицу длины в грунтовом массиве будет зависеть от ориентировки их относительно принятых осей координат. Взаимодействия частиц в грунтовом массиве осуществляются по точкам контактов. Эти взаимодействия могут быть представлены нормальной и касательной силами. Нормальные и касательные реактивные силы в каждой точке контакта являются составляющими одной силы взаи-

модействия двух частиц, направленной в общем случае под углом к поверхности контакта [17, 18].

Аналитические исследования

Для решения вопроса о наиболее вероятном взаимном расположении зерен среднего (эффективного) размера необходимо рассмотреть число рабочих контактов каждой частицы. Наиболее плотная упаковка зерен возникает при шести контактах для плоской постановки задачи. Менее плотная с пятью. Структура, где каждая частица касается четырех окружающих ее частиц, также образует наиболее плотную упаковку путем укладки частиц с некоторыми промежутками. Число контактов у каждой частицы не зависит от размеров промежутков между частицами, если этот промежуток не превышает величины частицы. Структура с тремя контактами также образует наиболее плотную упаковку, если контакты расположены через один. Структура с двумя рабочими контактами является более рыхлой, но в то же время устойчивая. Таким образом, для плоской задачи из круглых частиц одинакового размера можно создать структуры с шестью, пятью, четырьмя, тремя и двумя контактами каждого зерна. Причем с шестью и в меньшей степени с пятью является наиболее редчайшей. Структура с четырьмя контактами наиболее предпочтительна и имеет высокую вероятность получения плотной структуры зерен грунта. В этом случае просвет между зернами должен быть в пределах $0 < A < a$ (где A — просвет; a — размер зерна). С точки зрения сохранения структуры системы зерен с пятью и шестью контактами являются жесткими. Такие системы возможны лишь при одном варианте укладки зерен. С геометрической точки зрения структура с четырьмя контактами зерен по сравнению со структурой с шестью и пятью контактами более вероятна. Структура с тремя контактами частиц не является жесткой в смысле строгого соблюдения свободных расстояний между зернами. Не образуют структуры частицы с двумя рабочими контактами. С тремя рабочими контактами статическая устойчивость частицы зависит только от взаимного положения рабочих контактов. При трех рабочих контактах у частицы в 55 случаях из 100 можно ожидать статически устойчивого ее положения и почти в 45 случаях — статически неустойчивого положения. Для частицы с четырьмя, пятью и шестью рабочими контактами вероятность статической устойчивости равна единице. Наибольшее внимания заслуживает изучение влияния гранулометрического состава на плотность и упаковку мерзлых зерен разных размеров. Наиболее сложной является связь между плотностью и грансоставом мерзлого грунта. Как правило, для теоретического анализа смесь шаров одинакового размера принимается в качестве модели крупнообломочного материала [4]. Плотность системы шаров вычисляется по формуле

$$D_m = \pi / (6(1 - \cos\alpha) \sqrt{1 + 2\cos\alpha}). \quad (1)$$

Образованный гранями ромбоэдра угол α , меняясь в пределах от 60° до 90° , создает плотность упаковки в пределах от 0,741 до 0,524. В этом случае можно определить пористость структуры по формуле

$$n_m = 1 - D_m. \quad (2)$$

Результаты

Увеличение плотности структуры грунта возможно двумя способами:

- 1) последовательное заполнение всех пустот между шарами, образующими скелет смеси, другими шарами, диаметры которых соответствуют размерам пор;
- 2) заполнение этих же пустот более мелкими шарами, поры между которыми заполнены еще более мелкими шарами.

Наибольшая плотность формируется вторым способом. При этом каждый последующий диаметр шара должен быть в 7 раз меньше предыдущего, то есть плотность упаковки шаров различного диаметра возрастает по прогрессии $1/7$, $1/7^2$, $1/7^3$ и т. д. Плотность смесей различных шаров можно теоретически рассчитать, исходя из условия, что объем каждой последующей по размеру фракции будет равен пористости предыдущей.

Превращение нестабильного слоя из мерзлого грунта в стабильный за счет увеличения плотности и снижения пористости характеризуется осадкой, которую необходимо предусмотреть в проектах. Однако в настоящее время отсутствуют обоснованные данные по расчету осадок при оттаивании и грунта под нагрузкой. Так, ВСН 84-89² рекомендует определять осадку насыпи из мерзлых грунтов по общеизвестной формуле с учетом плотности скелета грунта после укладки с уплотнением и после оттаивания и стабилизации. Если определение плотности талого грунта в настоящее время нормировано, то определение плотности скелета мерзлого грунта после уплотнения изучено недостаточно. Численное значение этой величины можно предварительно определять расчетом как средневзвешенное значение плотности скелета грунта насыпи по формуле

$$\rho_n = \rho_3(1-n_3)(1+W_3)K_p\beta + \rho_m(1-n_m)(1+0,9W)(1-K_p), \quad (3)$$

где ρ_3 и ρ_m — плотность грунта заполнителя и твердомерзлого грунта; n_3 и n_m — пористость грунта заполнителя и твердомерзлого грунта; K_p — коэффициент разрыхления твердомерзлого грунта; β — коэффициент заполнения порового пространства между комьями твердомерзлого грунта; W_3 — суммарная влажность грунта заполнителя; W — суммарная влажность комьев твердомерзлого грунта.

При объеме заземленного воздуха в пределах 4–5 % формируется максимальная плотность. В этом случае грунтовый массив характеризуется максимальной устойчивостью и прочностью. Чрезвычайно остро стоит задача достижения максимальной плотности мерзлых грунтов в насыпи. Такие грунты разрабатываются в карьерах механизированным способом или с помощью взрыва, в результате получается грунтовая масса, состоящая как из грунтовых частиц, так и из цементированных льдом агрегатов. Формы и размер агрегатов разнообразны и зависят от множества факторов: способа разработки, текстуры, влажности, температуры и т. д. [2, 19]. Поэтому в основу формирования плотных систем из мерзлых грунтов на

² ВСН 84-89. Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты [Электронный ресурс]. – Введ 1989-03-30. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200006860>

практике могут быть заложены два принципа: способ плотных смесей и способ пропитки, где основной слой из мерзлого грунта пропитывается сверху сухомерзлыми грунтами. Практически подбором состава можно добиться пустотности 15–20 %. Однако это требует больших затрат.

Выводы

Таким образом, формирование устойчивых грунтовых массивов из мерзлых грунтов требует дальнейших и детальных научных исследований. Одной из основных и первоочередных задач является создание устойчивых «распорных» и «безраспорных» грунтовых систем. Теоретической основой должны быть «Теория зернистых сред», «Механика грунтов», «Теплофизика» и «Теория упругости», которые позволят разработать теоретические и практические способы и методы применения твердомерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов при возведении земляного полотна транспортных и гидротехнических сооружений.

Библиографический список

1. Шуваев, А. Н. Анализ принципов проектирования земляного полотна автомобильных дорог в районах распространения вечномерзлых грунтов в Западной Сибири / А. Н. Шуваев, М. В. Панова, С. В. Картавый. – DOI 10.31660/0445-0108-2020-1-114-121. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 1. – С. 114–121.
2. Шуваев, А. Н. Физико-математическое моделирование грунтовых насыпей из мерзлых грунтов / А. Н. Шуваев. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 5 (58). – С. 167–173.
3. Shuvaev, A. N. The Construction of Roadbeds on Permafrost and in Swamps from Reinforced Soils of Increased Strength / A. N. Shuvaev, A. P. Smirnov, S. V. Kartavy. – DOI 10.28991/cej-2020-03091592. – Текст : непосредственный // Civil Engineering Journal. – 2020. – Vol. 6, Issue 10. – P. 1922–1931.
4. Shuvaev, A. N. Construction of the road bed of the motor road on the bogs with the use of geosynthetic materials and "substandard" soils / A. N. Shuvaev. – Текст : непосредственный // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, Issue 7. – P. 860–866.
5. Kulikov, A. V. Investigation of physical and mechanical properties of peat / A. V. Kulikov, V. V. Vorontsov, A. N. Shuvaev. – DOI 10.14419/ijet.v7i3.12999. – Текст : непосредственный // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, Issue 3. – P. 1056–1058.
6. Шуваев, А. Н. Надежность и долговечность автомобильных дорог в сложных природных условиях / А. Н. Шуваев, М. В. Панова. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог : сборник научных трудов ОАО «ГИПРОДОРИИ». – 2013. – Вып. 4 (63). – С. 14–19.
7. Шуваев, А. Н. Перспективные транспортные конструкции и технологии при обустройстве месторождений / А. Н. Шуваев. – Текст : непосредственный // Строительный вестник Тюменской области. – 2012. – № 3 (61). – С. 45.
8. Дересевич, Г. М. Механика зернистой среды / Г. М. Дересевич. – Текст : непосредственный // Проблемы механики : сборник статей / Под ред. Р. Мизеса, Т. Кармана ; пер. с англ., под ред. С. В. Валландера [и др.]. – Москва ; Ленинград : Изд-во иностранной литературы, 1961. – Вып. 3. – С. 91–158.
9. Кандауров, И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И. И. Кандауров. – 2-е изд., испр. и перераб. – Ленинград : Стройиздат : Ленингр. отд-ние, 1988. – 280 с. – Текст : непосредственный.
10. Harr, M. E. Mechanics of particulate media. A probabilistic approach / M. E. Harr. – McGraw-Hill Companies, 1977. – 543 p. – Текст : непосредственный.
11. Drap, G. Essai sur les affaissements de surface et les mouvements interieurs d'un milieu soumis au dehouillement / G. Drap. – Текст : непосредственный // La Revue de l'Industrie Minerale. – 1957. – № 2. – P. 167–171.

12. Радовский, Б. С. Вопросы расчета слоистых оснований с позиции механики зернистых сред / Б. С. Радовский. – Текст : непосредственный // Труды координац. совещ. по гидротехнике. – Ленинград : Энергия, 1972. – Вып. 77.
13. Семенов, В. А. Проектирование дорожных конструкций с учетом их однородности / В. А. Семенов. – Текст : непосредственный // Труды ТГУ. – 1976.
14. Тулаев, А. Я. К проблеме уплотнения зернистых материалов / А. Я. Тулаев, В. А. Семенов, Б. Г. Аксенов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1980. – № 1. – С. 81–86.
15. Konrad, J. M. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils / J. M. Konrad, N. R. Morgenstern. – DOI 10.1139/t80-056. – Текст : непосредственный // Canadian Geotechnical Journal. – 1980. – Vol. 17, Issue 4. – P. 473–486.
16. Konrad, J. M. Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils / J. M. Konrad, N. R. Morgenstern. – DOI 10.1139/t84-008. – Текст : непосредственный // Canadian Geotechnical Journal. – 1984. – Vol. 21, Issue 4. – P. 100–115.
17. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. – Москва : Наука, 1987. – Ч. I. – 464 с. – Текст : непосредственный.
18. Fedá, J. Mechanics of particulate materials. The principle / J. Fedá ; Translation from Czech ; Czechoslovak Academy of sciences, Institute of theoretical and applied mechanics (Prague). – Elsevier Scientific Publishing Company (Amsterdam, Oxford, New York), 1982. – 444 p. – Текст : непосредственный.
19. Шуваев, А. Н. Земляное полотно из мерзлых грунтов = Permafrost roadbed / А. Н. Шуваев. – Москва : Недра, 1997. – 154 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Shuvaev, A. N., Panova, M. V., & Kartavy, S. V. (2020). Analysis of the subgrade design concept in areas of permafrost soil distribution in Western Siberia. *Oil and Gas Studies*, (1), pp. 114-121. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2020-1-114-121
2. Shuvaev, A. N. (2016). Physical and Mathematical simulation of Frozen soil Embankments. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*, (5(58)), pp. 167-173. (In Russian).
3. Shuvaev, A. N., Smirnov, A. P., & Kartavy, S. V. (2020). The Construction of Roadbeds on Permafrost and in Swamps from Reinforced Soils of Increased Strength. *Civil Engineering Journal*, 6(10), pp. 1922-1931. (In English). DOI: 10.28991/cej-2020-03091592
4. Shuvaev, A. N. (2018). Construction of the road bed of the motor road on the bogs with the use of geosynthetic materials and "substandard" soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), pp. 860-866. (In English).
5. Kulikov, A. V. Vorontsov, V. V., & Shuvaev, A. N. (2018). Investigation of physical and mechanical properties of peat. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3), pp. 1056-1058. (In English). DOI: 10.14419/ijet.v7i3.12999
6. Shuvaev, A. N., & Panova, M. V. (2013). Reliability and durability of highways in difficult environmental conditions. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomobil'nykh dorog: sbornik nauchnykh trudov OAO "GIPRODORNII"*, (4(63)), pp. 14-19. (In Russian).
7. Shuvaev, A. N. (2012). Perspektivnye transportnye konstruksii i tekhnologii pri obustroystve mestorozhdeniy. *Stroitel'nyy vestnik Tyumenskoy oblasti*, (3(61)), pp. 45. (In Russian).
8. Derezevich, G. M. (1961). *Mekhanika zernistoy sredy. Problemy mekhaniki: sbornik statey*. Vypusk 3. Moscow, Leningrad, Inostrannaya literatura Publ., pp. 91-158. (In Russian).
9. Kandaurov, I. I. (1988). *Mekhanika zernistykh sred i ee primeneniye v stroitel'stve*. 2nd edition, fixed and revised. Leningrad, Stroyizdat. Publ., 280 p. (In Russian).
10. Harr, M. E. (1977). *Mechanics of particulate media. A probabilistic approach*. McGraw-Hill Companies, 543 p. (In English).
11. Drap, G. (1957). *Essai sur les affaissements de surface et les mouvements interieurs d'un milieu soumis au dehouillement*. *La Revue de l'Industrie Minerale*, (2), pp. 167-171. (In French).
12. Radovskiy, B. S. (1972). *Voprosy rascheta sloistykh osnovaniy s pozitsii mekhaniki zernistykh sred*. *Trudy koordinats. soveshch. po gidrotekhnike*, (77). Leningrad, Energiya Publ. (In Russian).
13. Semenov, V. A. (1976). *Proektirovaniye dorozhnykh konstruksiy s uchetom ikh odnorodnosti*. *Trudy TGU*. (In Russian).

14. Tulaev, A. Ya., Semenov, V. A., & Aksenov, B. G. (1980). K probleme uplotneniya zernistykh materialov . Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura, (1), pp. 81-86. (In Russian).
15. Konrad, J. M., & Morgestern, N. R. (1980). A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 17(4), pp. 473-486. (In English). DOI: 10.1139/t80-056
16. Konrad J. M., & Morgestern, N. R. (1984). Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils. Canadian Geotechnical Journal, 21(4), pp. 100-115. (In English). DOI: 10.1139/t84-008
17. Nigmatulin, R. I. (1987). Dinamika mnogofaznykh sred. Chast' I. Moscow, Nauka Publ., 464 p. (In Russian).
18. Feda, J. (1982). Mechanics of particulate materials. The principle. Translation from Czech; Czechoslovak Academy of sciences, Institute of theoretical and applied mechanics (Prague). Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 444 p. (In English).
19. Shuvaev, A. N. (1997). Permafrost roadbed. Moscow, Nedra Publ., 154 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Шуваев Анатолий Николаевич, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Панова Марина Владимировна, к. т. н., доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: panovamv@tyuiu.ru

Пронозин Яков Александрович, д. т. н., профессор кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Anatoly N. Shuvaev, Doctor of Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen

Marina V. Panova, Candidate of Engineering, Associate Professor, Industrial University of Tyumen, e-mail: panovamv@tyuiu.ru

Yakov A. Pronozin, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen