

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

2014, Том 1, №3 / 2014, Vol 1, No 3 <http://t-s.today/issues/vol1-no3.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/01TS314.pdf>

DOI: 10.15862/01TS314 (<http://dx.doi.org/10.15862/01TS314>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Юшков Б.С., Третьякова О.В. Влияние анизотропии глинистых грунтовых массивов на напряженно-деформированное состояние транспортных тоннелей // Транспортные сооружения, Том 1, №3 (2014) <http://t-s.today/PDF/01TS314.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01TS314

For citation:

Yushkov B.S., Tretyakova O.V. [Anisotropy effect of the clay soil masses on the stress-strain state of transport tunnels] Russian journal of transport engineering, 2014, Vol. 1, no. 3. Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS314.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/01TS314

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

Влияние анизотропии глинистых грунтовых массивов на напряженно-деформированное состояние транспортных тоннелей

Аннотация. Показаны виды анизотропии глинистых грунтовых массивов в форме пространственной неоднородности свойств талых и мерзлых грунтов, неоднозначности величин морозного пучения и усадки в разных направлениях. Освещены вопросы анизотропии свойств глинистых грунтов при положительных температурах. Рассмотрена зависимость неоднородности физических и механических свойств мерзлых грунтов от криогенной текстуры, природного сложения, различных видов напластований, переслаивания пород. Отмечены показатели прочностной и деформационной анизотропии. Проанализированы возможности учета основных численных показателей явления пучения с точки зрения анизотропии свойств и процессов, присущих промерзающим грунтам, подстановкой в формулу деформации пучения. Отмечена неравномерность усадки талого грунта в вертикальном и горизонтальном направлении при промерзании верхнего слоя. Неравномерность усадки в разных направлениях связана с видом напряжений и криогенной текстурой. Анизотропия процесса морозного пучения рассматривается в условиях одномерной и неодномерной задачи в зависимости от количества фронтов промерзания и их направления.

Обобщено влияние проявлений анизотропии на напряженно деформированное состояние транспортного тоннеля. Сделан вывод, что результирующая неравномерность пучения и усадки в сочетании с анизотропными свойствами мерзлых грунтов, является весомой составляющей в комплексе силовых факторов, определяющих оптимальное конструктивное решение транспортного тоннеля.

Ключевые слова: льдообразование; миграция влаги; криогенная текстура; лед-цемент; шпильки льда; морозное пучение; анизотропия; напряженно-деформированное состояние (НДС)

Анизотропия грунтовых массивов в аспекте влияния на НДС транспортных тоннелей представляет собой совокупность ряда взаимосвязанных факторов и процессов. К ним относятся: анизотропия свойств *талого* и *мерзлого* грунта; анизотропия *явления морозного пучения* и *усадки* грунта; анизотропия *процесса оттаивания* грунта. Обобщение влияния воздействий позволяет создать фактическую расчетную схему работы тоннеля в глинистом грунте в различное время года.

Анизотропия глинистых грунтов непосредственно связана с их микроструктурой. Агрегаты глинистых частиц, в отличие от песка, взаимодействуют не по точкам, а по поверхностям контакта и имеют более высокую способность к деформированию. На микроуровне деформативность агрегатов глинистых частиц зависит от вида образованной ими структуры. На макроуровне разность свойств талых глинистых грунтов по разным направлениям обусловлена *природным сложением* грунта, *неоднородностью напластований* условиями их существования *во времени*.

Вопросы анизотропии свойств грунта при положительных температурах, т.е. в *талом* состоянии, освещены в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей. Существует несколько моделей анизотропного грунта [1...4]. Исследования неоднородности деформационных и прочностных свойств глинистых грунтов были проведены авторами [5...10]. При определении модуля деформации при различных углах приложения нагрузки было выявлено, что меньшей деформируемостью обладают образцы, у которых направление нагрузки не совпадало с направлением слоистости. Эксперименты показали различные модули деформации глин при напряжениях вдоль E_{\parallel} и поперек E_{\perp} слоев грунта. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели деформационной анизотропии глинистых пород

Table 1. Indices of deformation anisotropy for clay rocks

Автор	Вид глинистого грунта	E_{\parallel}/E_{\perp}
Atkinson J.H.	Лондонская глина	2
Franklin A.G., Mattson P.A.	Каолиновая	1.8 – 4.0
Graham J.	Виннипегская	1.78
Kirkpatrick W.M., Rennie I.A.	Иловая глина, Сан-Франциско	1.2-1.8
Lo K.Y., Leonards G.A., Yuen C.	Leda -глина	0.55
Saada A.S., Bianchini G.F., Palmer Shook L.	Каолиновая	1.25; 1.35

На основании оценки прочности было отмечено, что жесткость глинистого грунта вдоль слоев выше, чем поперек слоев.

Однако если для талых грунтов природная предрасположенность к пространственной неоднозначности механических свойств и учет напластований в достаточной степени освещены в технической литературе, то *анизотропные свойства мерзлых грунтов* не стали предметом пристального внимания исследователей и этому вопросу посвящено ограниченное количество работ [11...17].

Свойства грунтов при промерзании обусловлены двумя основными явлениями – *льдообразованием* и *анизотропией* кристаллов льда. Глинистые мерзлые грунты со

значительным льдовыделением отличаются выраженной анизотропией и неоднородностью физических и механических свойств. Объективная оценка свойств таких грунтов возможна только при комплексном изучении и учете криогенного строения путем моделирования льдообразования и исследования этого процесса на модели; а также методам полевых испытаний.

Криогенное строение связано с очень большим числом факторов, которые условно можно разделить на две большие группы: основные особенности талого грунта до промерзания и условия промерзания грунта. В зависимости от соотношения этих факторов образуется та или иная **криогенная текстура** глинистых грунтов с различной ориентацией прослоев льда.

Массивная текстура, образованная льдом-цементом, образуется при промерзании маловлажных глинистых грунтов. *Слоистая криогенная текстура*, созданная удлиненными параллельными друг другу шлирами льда, характерна для сильно увлажненных тонкодисперсных глин. *Сетчатая (блоковая) криогенная текстура* формируется в мерзлом массиве переслаивающимися удлиненными шлирами льда в виде решетчатых форм – ячеистых, плетенчатых, чешуйчатых. Сетчатые структуры часто встречаются в глинистых грунтах [12].

Знание криогенной текстуры помогает раскрывать многие закономерности анизотропии грунтовых массивов. Неоднородность механических свойств мерзлого грунта определяется *углом между направлением нагрузки и ориентацией шлиров льда*. Кроме того, существенную роль играет *площадь ледяных включений*, на которую распространяется действующие нагрузки и усилия. При взаимно перпендикулярном расположении плоскости сдвига и слоев льда в грунте, сопротивление породы сдвигу увеличивается с увеличением площади сдвиговой нагрузки, приходящейся на лед [11].

Одним из основных движущих механизмов морозного пучения является миграция влаги. Деформация пучения, обусловленная миграцией влаги, составляет [14].

$$h_{Iw} = 1.09k_{an}k_w\sigma_t^\phi \text{ grad } t \frac{\xi}{v_{np}}, \quad (1)$$

где k_{an} - коэффициент пропорциональности, численно равный косинусу угла наклона шлиров льда (коэффициент анизотропии, учитывающий характер распределения миграционной влаги в промерзающей зоне);

k_w - коэффициент диффузии влаги в мерзлой зоне грунта;

σ_t^ϕ – термоградиентный фазовый коэффициент;

ξ - мощность промерзающего слоя;

v_{np} - скорость промерзания.

В этой формуле заложены *основные численные показатели, определяющие деформацию пучения с точки зрения анизотропии свойств* и процессов, присущих промерзающим грунтам.

Учет различной *ориентации шлиров льда* при определении деформации пучения выполнен в формуле (1) при помощи коэффициента пропорциональности, численно равного косинусу угла наклона шлиров льда.

Рост горизонтальных прослоев льда затруднителен при высокой *скорости промерзания* V_{np} , что также может быть учтено в формуле (1).

Большое значение при изучении анизотропных свойств мерзлых грунтов имеет *степень первичной неоднородности* состава и сложения грунта, например *слоистости*. Неоднородность сложения увеличивает льдовыделение, предопределяет распределение ледяных включений, которые концентрируются по контактам разнородных по составу и

плотности горизонтов, по макропорам и первичным трещинам [17]. За счет этого могут возникать значительные несоответствия пространственного положения элементов криогенной текстуры и элементов первичного сложения.

Однако степень первичной неоднородности не всегда являются определяющим фактором анизотропии мерзлого грунта. При понижении температуры и миграции влаги природная ориентация микроблоков грунта нарушается сначала без изменения внутренней ориентации частиц. При дальнейшем понижении температуры происходит вымерзание воды и в тонких внутриагрегатных порах, *диспергация агрегатов* и полное *исчезновение ориентировки*.

Деформации пучения в случае *переслаивания пород*, характеризуются сложными зависимостями [14]. В *вертикальной* слоистой грунтовой системе при чередовании слоев каолинитовой и монтмориллонитовой глины перпендикулярно фронту промерзания влага мигрирует в каолининовый слой. В результате происходит интенсивное пучение каолининовой прослойки, усадка и низкий уровень пучения монтмориллонитовых слоев.

При промерзании системы с *горизонтальными* слоями каолинитовой и монтмориллонитовой глин, расположенных параллельно фронту промерзания, величина деформаций пучения бала незначительна за счет компенсации пучения верхнего каолинитового слоя усадкой нижнего монтмориллонитового.

Для выявления подобных закономерностей необходимы дальнейшие исследования процессов влагопереноса, льдовыделения, пучения и усадки в различных грунтовых системах.

При изменении температуры мерзлой породы происходят сложные температурные деформации, которые характеризуются *коэффициентом температурного расширения α* . Зависимость температурных деформаций мерзлых дисперсных грунтов от температуры не является нелинейной и определяется дисперсностью и влажностью грунта, его криогенной текстурой.

Существенными признаками анизотропии обладает процесс *усадки грунта* при его обезвоживании в процессе промерзания. Талый слой породы, расположенный ниже фронта промерзания, интенсивно обезвоживается. Частицы грунта и их агрегаты уплотняются и ориентируются вдоль направления миграционного потока, чтобы гидродинамическое сопротивление было минимальным. Межагрегатные поры увеличиваются в размере и приобретают вытянутую форму. В результате образуются «слабые» зоны, которые создают условия для появления градиентов локальных напряжений, «подтягивающих» миграционную влагу.

Это приводит к *неодинаковым деформациям усадки* как по вертикали и горизонтали, так и в пределах агрегатов грунта. Деформация усадки в вертикальном направлении на порядок выше, чем в горизонтальном.

Усадке в горизонтальном направлении препятствует сцепление частиц грунта с мерзлой частью. Проявлениями неравномерных по высоте деформаций усадки являются нормальные напряжения P_n , *растягивающие* грунт в горизонтальном направлении. Это приводит к образованию в промерзающем грунте *вертикальных шлиров* льда.

Прослой льда, параллельные фронту промерзания, зарождаются за счет развития в грунте горизонтальных зон *скальвающих* напряжений, которые превращаются в зоны локального разрушения грунта. Влага в этих зонах при местном разрыве грунта перестает испытывать напряжение и скачкообразно превращается в лед, создавая *горизонтальные шлиры* льда.

К вертикальным зонам концентрации напряжений влага движется под действием градиента растягивающих горизонтальных напряжений P_n , а к горизонтальным зонам – под действием градиента расклинивающего действия тонких пленок воды $P_{в пл.}$, вызванного $grad t$. Влияние величины *градиента температуры $grad t$* на величину пучения учитывается в формуле (1).

Рассмотрев анизотропные свойства грунтов в талом и мерзлом состоянии, закономерности усадки, необходимо отметить, что собственно явление морозного пучения грунта имеет свои особенности в вертикальном и горизонтальном направлении за стеной заглубленного сооружения, которые можно считать проявлениями *анизотропии морозного пучения*.

Явление морозного пучения непосредственно связано с возникновением и закономерностями развития фронтов промерзания, обусловленных распределением потоков холодного воздуха. Вследствие этого можно утверждать, что величина и характер промерзания грунта за стеной заглубленного сооружения, прежде всего зависит от количества фронтов промерзания – только в вертикальном направлении; или в вертикальном и горизонтальном направлении. Таким образом, в зависимости от количества фронтов промерзания формируются одно- или двухмерные задачи по определению величины морозного пучения.

В *одномерной задаче*, учитывающей только вертикальное промерзание, возникновение горизонтальных нормальных сил морозного пучения обусловлено анизотропией пучения, которая, в свою очередь, обусловлена пространственно неоднородными свойствами мерзлого грунта. В соответствии с исследованиями [19] коэффициент анизотропии определяется экспериментально и представляет собой соотношение

$$\psi_a = \frac{\varepsilon_{fh}}{\varepsilon_{fh\perp}}, \quad (2)$$

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

Рассматривая двустороннее промерзание стен тоннеля - в вертикальном направлении от дневной поверхности и горизонтально через стенку - можно говорить о *двустороннем промерзании, т.е. неоднородной задаче* [20].

В работе [18] по результатам экспериментов в закрытой системе в подтверждение вышесказанного был получен график зависимости коэффициента анизотропии морозного пучения от температуры для глинистого грунта (рис. 1).

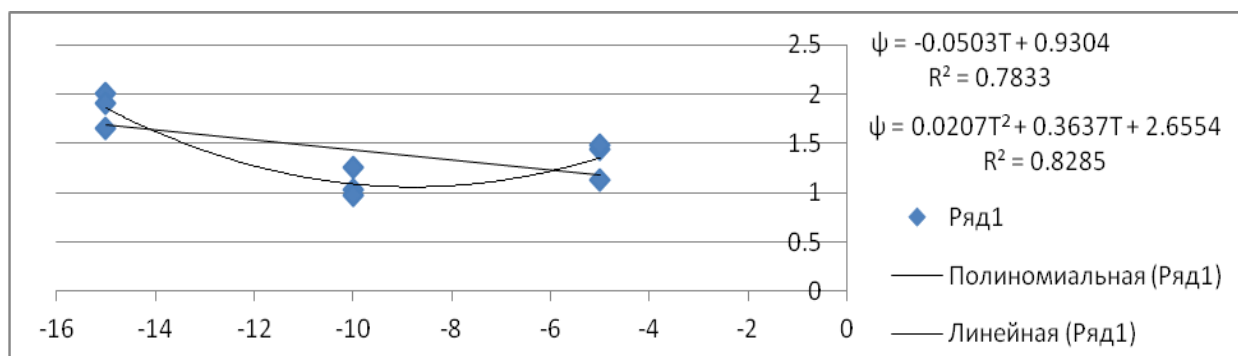


Рис. 1. График зависимости коэффициента анизотропии морозного пучения от температуры для глины [18]

Fig.1. A frost heaving anisotropy coefficient versus temperature plot for clay [18]

Авторы [16, 21] при *неоднородной постановке задачи*, определили близость значений вертикальной и горизонтальной деформации пучения при *двустороннем промерзании*. Т.е. при наличии *двух фронтов* на одной глубине вертикальные и горизонтальные деформации морозного пучения близки по величине и влиянию анизотропии незначительно.

Таким образом, проведен анализ явления анизотропии глинистых грунтовых массивов с точки зрения свойств грунтов и закономерностей явления морозного пучения.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что неоднородность физических и механических свойств мерзлых грунтов по разным направлениям массива, вызванные особенностями криогенной текстуры; пространственная неоднозначность процесса пучения вносят ощутимый вклад в формирование напряженно-деформированного состояния заглубленного сооружения. Учет анизотропии свойств грунта и процессов, происходящих при морозном пучении, производится подстановкой численных значений характеристик промерзающих грунтов в формулу для определения деформаций пучения (1).

Изучение анизотропии промерзающих грунтов создает возможность обрисовать фактическую картину деформаций пучения грунта на разных глубинах вокруг сооружения, определить направления усилий и деформаций относительно поверхностей тоннеля. Это позволяет оценить дополнительное влияние горизонтальных усилий, величину неравномерности сил пучения, допускаемую деформацию пучения для данного сооружения. Указанные величины являются ключом для подбора соответствующего поперечного сечения тоннеля по условия прочности и устойчивости.

Учет закономерностей анизотропии глинистых мерзлых грунтов и явления морозного пучения, позволяют уточнить НДС заглубленного сооружения, создаваемое природным давлением грунта в состоянии покоя. Такой комплексный подход к пониманию НДС транспортных тоннелей создает условия для их рационального и экономичного проектирования, защиты от аварий и повреждений. Проектирование оптимальных поперечных сечений транспортных тоннелей согласно распределению действующих усилий, а также безаварийная эксплуатации сооружений является залогом получения значительного экономического эффекта на пути совершенствования транспортной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов В.А., Софьин О.Е. Моделирование поведения глинистого основания на основе анизотропной упруговязкопластической модели грунта. Вестник ТвГТУ, 2012г, 180 (Вып. 20). стр. 79-84. ISSN 2224-6363.
2. Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений.
3. Карасев М.А. Теоретические предпосылки к созданию модели поведения грунтов, учитывающей анизотропию механических свойств /М.А. Карасев.- IS SN 0135-3500. Записки Горного института. Т.204. Санкт-Петербург. 2013.
4. T. Hueckel, R. Pellegrini. A note on thermomechanical anisotropy of clays. Engineering Geology 41(1996) 171-180.
5. Atkinson J.H. Anisotropic elastic deformation in laboratory tests on undisturbed London clay // Geotechnique. 1975. Vol.25. N.2. P.357-384.
6. Franklin A.G. Directional variation of elastic wave velocities in oriented clay/ A.G.Franklin, P.A.Mattson // Clay and clay minerals. 1972. Vol.20. P.285-293.

7. Graham J. Anisotropic elasticity of natural clay / J.Graham, G.T.Houlsby // *Geotechnique*. 1983. Vol.33. N 2. P.165-180.
8. Kirkpatric W.M. Directional properties of consolidated kaolin W.M.Kirkpatric, I.A.Rennie // *Geotechnique*. 1972. Vol.22. N.1. P.166-169.
9. Lo K.Y. Interpretation and significance of anisotropic deformation behavior of soft clays / K.Y.Lo, G.A.Leonards, C.Yuen // *Norwegian Geotechnical Institute*. 1977. N.117.
10. Saada A.S. The dynamic response of anisotropic clay. *Earthquake engineering and soil dynamics* / A.S.Saada, G.F.Bianchini, Palmer Shook L. // Pasadena, CA. 1978. Vol.1. P.777-801.
11. Ершов Э.Д. *Общая геокриология. Учеб./ Ершов Э.Д. – М. Изд-во МГУ, ISBN 5-211-04513-0. 2002 – 682 с. ил.*
12. *Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ. ISBN 5-211-06121-7. 2004. - 512 с: ил.*
13. *Полевые методы геокриологических исследований/ Под ред. Э.Д.Ершова и Г.И.Гордеевой. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 143 с.*
14. *Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Ершова Э.Д.- М: Изд-во Моск. ун-та, 1985. - 167с.*
15. Ершов Э.Д. *Физикохимия и механика мерзлых пород. М.; Изд-во МГУ, 1986. - 336с.*
16. Мельников А. В., Сахаров И. И. *Определение параметров напряженно-деформированного состояния промерзающего пучинистого грунта в неоднородной постановке. ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург. 2013.*
17. *Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72с.*
18. *Парамонов М.В. Напряженно-деформированное состояние системы «Основание – сооружение» при неоднородном промерзании грунтов: автореф. дис. ... к-та тех. наук: 05.23.02/ Парамонов Максим Владимирович; Санкт-Петербург. ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».2013г.*
19. *Кудрявцев С.А. Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания морозоопасных грунтов / С.А. Кудрявцев. – СПб.; М.: АСВ, 2004.-37с.*
20. *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.*
21. *Карлов В.Д. Основания и фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах / В.Д.Карлов. – СПб.: СПбГАСУ, 2007. – 362с.*

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

Anisotropy effect of the clay soil masses on the stress-strain state of transport tunnels

Abstract. The article considers the kinds of clay soil mass anisotropy in the form of the spatial heterogeneity of properties of thawed and frozen soils, ambiguity of the frost heaving values and shrinkage in different directions. The questions of anisotropy of the clay soil properties at the positive temperatures are reported. The dependence of the heterogeneity of the physical and mechanical properties of frozen soils from the cryogenic texture, natural arrangement, different types of stratification and interbedding is considered. Indexes of the strength and strain anisotropy are noted. The accounting possibilities of the basic numerical indexes of heaving phenomena from the standpoint of anisotropy of the properties and processes inherent in the freezing through soil are analyzed by substitution in the heaving strain formula. The unevenness of thawed soil shrinkage in vertical and horizontal directions is noted during the freezing of the top layer. The unevenness of shrinkage in different directions is connected with kind of stress and cryogenic texture. Anisotropy of the frost heaving process is considered in the context of one-dimensional and non-one-dimensional problem depending on the amount of the freezing fronts and their direction.

There is summarized the effect of anisotropy appearances on the stress-strain state of the transport tunnel. One can conclude that the resulting non-uniformity of heaving and shrinkage in conjunction with anisotropic properties of frozen soils, is a significant component in the complex of power factors determining the optimal design solution of a transport tunnel.

Keywords: ice formation; moisture migration; cryogenic texture; ice-cement; ice schliers; frost heaving; anisotropy; stress-strain state (SSS)

REFERENCES

1. Mironov V.A., Sofin O.E. Modeling the behavior of the clay foundation based on the model anisotropic elastoviscoplastic soil. Bulletin TvGTU, 2012, 180 (Vol. 20). pp. 79-84. ISSN 2224-6363.
2. Bugrov A.K., Golubev A.I. Anisotropic soils and foundation structures.
3. Karasev M.A. Theoretical Background of the behaviors of soil, taking into account the anisotropy of mechanical properties /M.A. Karasev.- IS SN 0135-3500. Notes of the Mining Institute. T.204. Saint Petersburg. 2013.
4. T. Hueckel, R. Pellegrini. A note on thermomechanical anisotropy of clays. Engineering Geology 41(1996) 171-180.
5. Atkinson J.H. Anisotropic elastic deformation in laboratory tests on undisturbed London clay // Geotechnique. 1975. Vol.25. N.2. P.357-384.
6. Franklin A.G. Directional variation of elastic wave velocities in oriented clay/ A.G.Franklin, P.A.Mattson // Clay and clay minerals. 1972. Vol.20. P.285-293.
7. Graham J. Anisotropic elasticity of natural clay / J.Graham, G.T.Houlsby // Geotechnique. 1983. Vol.33. N 2. P.165-180.
8. Kirkpatrick W.M. Directional properties of consolidated kaolin W.M.Kirkpatrick, I.A.Rennie // Geotechnique. 1972. Vol.22. N.1. P.166-169.
9. Lo K.Y. Interpretation and significance of anisotropic deformation behavior of soft clays / K.Y.Lo, G.A.Leonards, C.Yuen // Norwegian Geotechnical Institute. 1977. N.117.
10. Saada A.S. The dynamic response of anisotropic clay. Earthquake engineering and soil dynamics / A.S.Saada, G.F.Bianchini, Palmer Shook L. // Pasadena, CA. 1978. Vol.1. P.777-801.
11. Ershov E.D. General Geocryology. Proc. / ED Yershov - M. MGU, ISBN 5-211-04513-0. 2002 - 682 p. Ill.
12. Methods of permafrost studies: Studies. manual / Ed. E.D. Yershov. - M.: MGU. ISBN 5-211-06121-7. 2004. - 512 p: ill.
13. Field methods permafrost studies / Ed. E.D.Ershova and G.I.Gordeevoy. - M.: Izd. University Press, 1986. 143 pp.
14. Deformations and stresses of freezing and thawing in rocks / Ed. Yershov E.D.- M: Univ. University Press, 1985. – 167p.
15. Yershov E.D. Physical chemistry and mechanics of frozen soils. M.: MGU, 1986. – 336p.
16. 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.
17. Guidelines for Accounting and prevention of deformations and forces of frost heaving of soils / PNIIS. - M.: Stroyizdat, 1986. – 72p.

18. Paramonov M.V. Stress-strain state of the "Ground - construction" in the multidimensional freezing of soils: Author. Dis. ... A-tat of those. Sciences: 05.23.02 / Paramonov M.V .; Saint Petersburg. VPO "Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering" .2013.
19. S.A. Kudryavtsev Geotechnical modeling of the freezing and thawing of the soil Frost / SA Kudryavtsev. - St. Petersburg .; М .: DIA, 2004, 37p.
20. 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.
21. Charles V.D. Foundations for SEASONALLY soils / V.D.Karlov. - SPb .: Civil Engineering, 2007. – 362p.