

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

2014, Том 1, №1 / 2014, Vol 1, No 1 <http://t-s.today/issues/vol1-no1.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/02TS114.pdf>

DOI: 10.15862/02TS114 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS114>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сергеев А.С., Юшков Б.С. О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 1, №1 (2014)
<http://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02TS114

For citation:

Sergeev A.S., Yushkov B.S. [On the freezing of clay soil and water migration into the pavement design] Russian journal of transport engineering, 2014, Vol. 1, no. 1. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (In Russ.)
DOI: 10.15862/02TS114

Адрес для связи с авторами:

614097, Пермский край, г.Пермь, ул.Строителей 46 кв. 40.

УДК 624.131.137

Сергеев Андрей Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Аспирант кафедры САД
E-mail: Zzverdvd@mail.ru

Юшков Борис Семенович

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

О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды

Аннотация. Промерзание поверхностных слоев земной коры обуславливает объемное деформирование грунта, выражается в увеличении объема и неравномерном поднятии их поверхности вследствие замерзания воды и образования ледяных включений. Недоучет морозного пучения грунтов, а также несвоевременное назначение противопучинных мероприятий наносят огромный ущерб народному хозяйству: снижают сроки и ухудшают условия эксплуатации автомобильных дорог, непроизводительные затраты труда, строительных материалов и финансовых средств. В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что после 4 этапов промораживания-оттаивания изменяются физические свойства глинистого грунта: происходит образование линз льда размерами 2-3 мм на стыке глинистого грунта и песка; количество и размеры линз льда увеличиваются при дальнейшем подтягивание влаги до 5-6 мм; формируются 3 зоны, связанные с интенсивностью промерзания.

Ключевые слова: морозное пучение; миграция воды; лёд; линзы; исследования; песок; глинистый грунт; датчики; влажность; температура; циклы; объем; зоны; обезвоживание

Введение

При замерзании грунтов происходит миграция воды в зону промерзания, что приводит к морозному пучению пылевато-глинистого грунта. Инженерное прогнозирование параметров морозного пучения грунтов, несмотря на многочисленность исследований этого вопроса,

развито в недостаточной степени. Это объясняется неясностью физической стороны процессов, сопровождающих криогенное пучение, что затрудняет математическую формулировку задачи. Для изучения деформации дорожной поверхности, приводящие к появлению трещин в асфальтобетоне, были проведены лабораторные исследования на кафедре Автомобильные дороги и мосты, целью которых являлось установление зависимости интенсивности пучения от скорости промерзания при различных термовлажностных режимах.

Вопрос о достоверности получаемых данных процесса промораживания с уменьшением числа экспериментальных опытов часто увеличивается погрешность измерений. Необходимо знать в каждом частном случае возможные границы уменьшения числа опытов и получаемую при этом достоверность. Постановка экспериментов часто связано с тем, что организация их является трудоёмкой и дорого стоящей задачей.

Минимальное необходимое число экспериментов можно определить, пользуясь формулой и задавая желательными пределами отклонения измеряемой величины от арифметической средней и доверительной вероятностью [1].

$$n_{min} = \frac{V^2}{P_{min}}$$

С уменьшением вероятности уменьшается число необходимых опытов, так при доверительной вероятности:

$$\beta = 0,95, \quad n_{min} = 8$$

$$\beta = 0,9, \quad n_{min} = 6$$

$$\beta = 0,8, \quad n_{min} = 4$$

Для экспериментальных исследований принимаем доверительную вероятность $\beta = 0,8$, при которой число минимальных этапов равно 4 [2].

Для экспериментальных исследований по определению скорости миграции воды и сил морозного пучения были изготовлены два экспериментальных лотка размерами 15x15x90 см (Рис. 1), в которых была имитирована конструкция сопряжения дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги. На дно контейнера было уложено 50 см глинистого грунта, а сверху чистый песок средней крупности мощностью 40 см. Глинистый грунт имел следующие физико-механические свойства: Плотность P 1,92 кН/м³, плотность сухого грунта P_d 1,58 г/см³, природная влажность W 0,22, удельный вес частиц грунта γ_s 15,52 кН/м³, коэффициент пористости e 0,738, плотность частиц грунта P_s 2,75 г/см³, пористость n 0,42, степень влажности Sr 0,82, полная влагоёмкость W_{sat} 0,27, предел текучести I_L 0,65, влажность на границе раскатывания W_p 0,11, число пластичности I_p 0,17, влажность на границе текучести W_L 0,28.

Песок имел следующие физико-механические свойства: Плотность P 1,54 кН/м³, плотность сухого грунта P_d 1,27 г/см³, природная влажность W 0,20, удельный вес частиц грунта γ_s 12,49 кН/м³, коэффициент пористости e 1,081, плотность частиц грунта P_s 2,65 г/см³, пористость n 0,52, степень влажности Sr 0,49, полная влагоёмкость W_{sat} 0,41.

Для того чтобы стенки были гладкими, гидрофобными и обладали антифрикционными свойствами на внутреннюю поверхность лотков был нанесен слой смазки "Литол 24" толщиной 0,5 мм с рабочей температурой от -40°C до +120°C.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторном холодильно-морозильном шкафу "Зил" создавая процесс промораживание-оттаивание грунта (как в зимне-весенний период года) при температурах от +5 до -20 °C.



*Рисунок 1. Экспериментальные лотки в холодильной камере
(фото авторов)*

Для того, чтобы промораживание грунтов происходило сверху вниз дно и нижние боковые стороны контейнеров были теплоизолированы плитами толщиной 25 мм из экструзионного пенополистирола, по нормативной литературе термическое сопротивление теплоизоляционного кожуха должно быть не менее $0,8 \text{ м}^2\text{К/Дж}$ [2], (Рис. 2).



*Рисунок 2. Теплоизоляция плитами из экструзионного пенополистирола
(фото авторов)*

Увлажнение глинистого грунта было организовано снизу с непрерывным подтоком воды к дну экспериментального лотка. Температура воды регулировалась системой автоматизированного контроля, которая поддерживала её положительной до +2°C [2].

С внутренней стороны по всей высоте экспериментального лотка к грунтам были прикреплены термодатчики и датчики измерения влажности, (Рис. 3).

Для измерения температуры использовалась система мониторинга Ситис: "Спрут", датчики располагались через каждые 10 см по высоте, (Рис. 4).

Для измерения влажности в грунте использовалась система на базе "Arduino" с датчиками "DFRobot", расположенных по высоте через каждые 15 см, (Рис. 4).

Скорость подтягивания влаги в зону промерзания грунта фиксировалась по вертикальной шкале линейки прикрепленной на стенке экспериментального лотка и датчиками влажности.

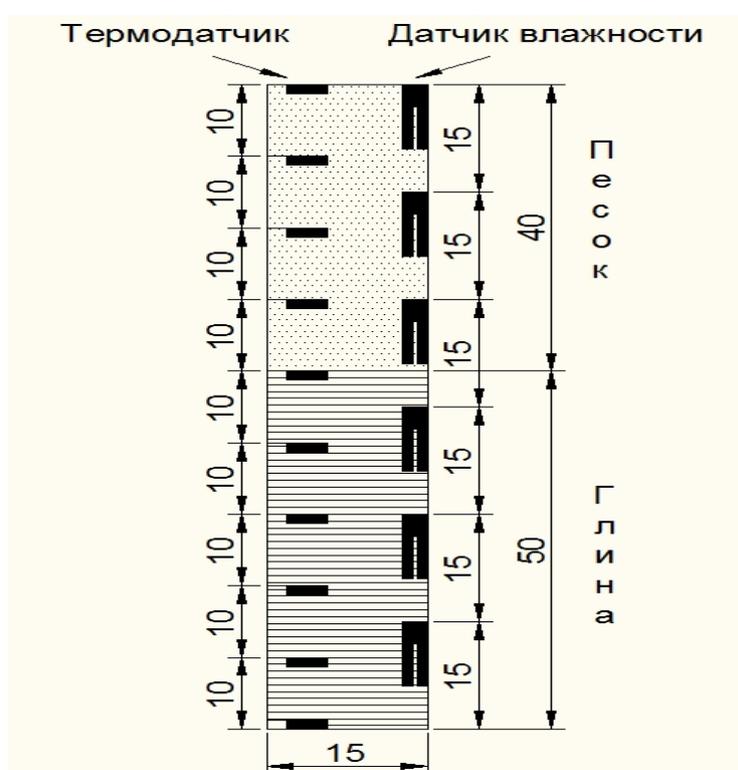


Рисунок 3. Схема размещения термодатчиков и датчиков влажности



Система Ситис "Спрут" с термодатчиками



Датчики влажности "DFRobot"

Рисунок 4. Системы для измерения влажности в грунте
(фото авторов)

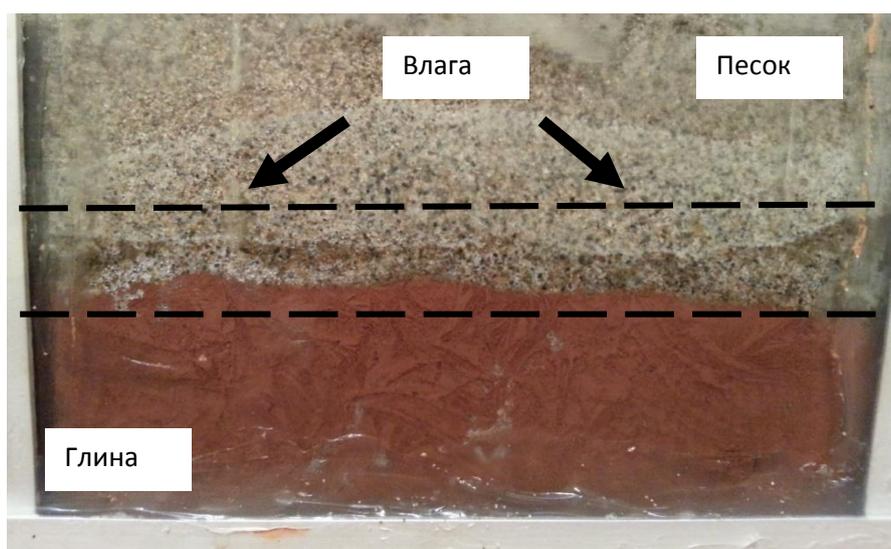
Экспериментальные исследования проводились в течении 208 суток. Один этап промораживания-оттаивания включал в себя 4 цикла температурных перепадов, (Таб. 1).

Таблица 1

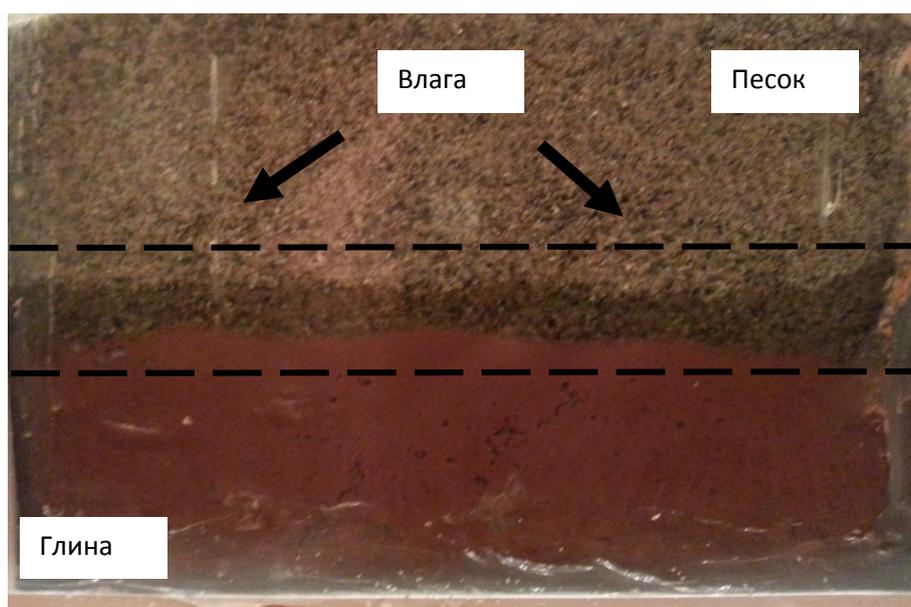
1 Этап промораживания-оттаивания

| 1 цикл | 12 суток | 2 цикл | 12 суток | 3 цикл | 12 суток | 4 цикл | 12 суток |
|--|----------|--------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|--|----------|
| 24 часа | | 24 часа | | 24 часа | | 24 часа | |
| понижение температуры с +5 до -1 °С - 12ч. с -1 до -5 °С - 12ч. | | понижение температуры с -5 до -20 °С | | повышение температуры с -20 до -5 °С | | повышение температуры с -5 до -1 °С - 12ч. с -1 до +5 °С - 12ч. | |

В 1 цикле при понижении температуры до -5°С происходило подтягивание влаги в зону промерзания из глинистого грунта на границу с песком со скоростью 0,95 см/сут при отношении природной влажности к влажности на границе раскатывания равная 0,96, (Рис. 5). Во 2 цикле при дальнейшем понижении температуры до -20°С происходило дальнейшее охлаждение грунта и подтягивание влаги со скоростью 0,61 см/сут. При повышении температуры в 3 цикле до -5°С происходило изменение скорости подтягивания влаги до 0,74 см/сут. В 4 цикле экспериментальных исследований происходило дальнейшее подтягивание влаги из глинистого грунта в зону промерзания со скоростью 0,76 см/сут. Согласно плану эксперимента промораживания-оттаивания этапы повторялись друг за другом. Через 52 суток промерзания грунта было обнаружено образование линз льда на стыке глинистого грунта и песка, (Рис. 7) [3].



*Рисунок 5. Контейнер №2 Подтягивание влаги в зону промерзания при температуре -5°C
(фото авторов)*



*Рисунок 6. Контейнер № 1 Подтягивание влаги в зону промерзания при температуре -5°C
(фото авторов)*

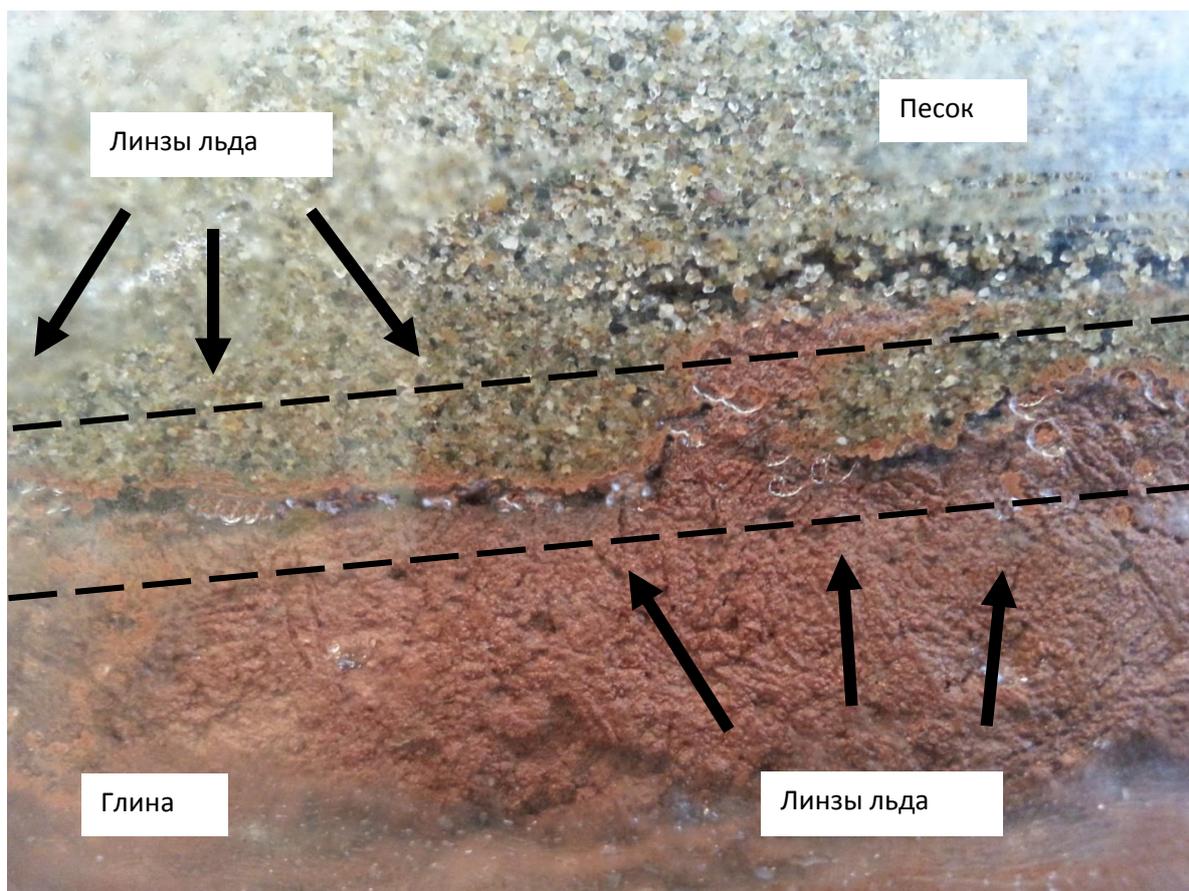


Рисунок 7. Образование линз льда
(фото авторов)

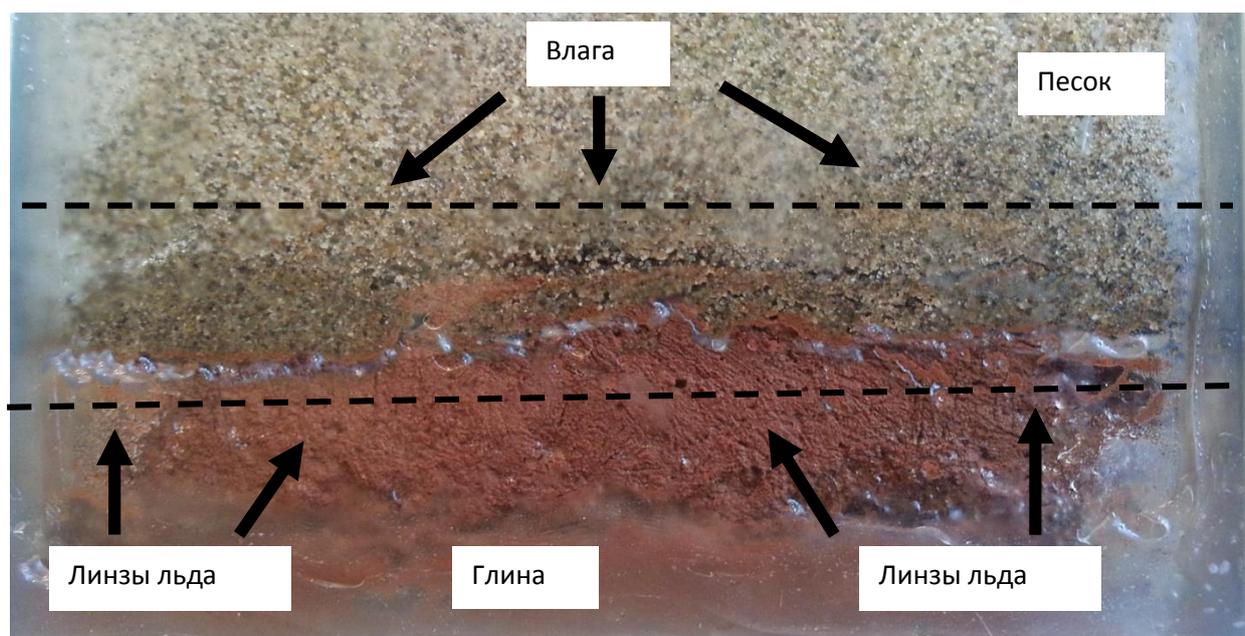


Рисунок 8. Увеличение размеров линз льда
(фото авторов)

Миграцию влаги в зону промерзания можно подсчитать исходя из суммы всех компонентов [4]:

$$F_{\text{пуч}} = F_{\text{масс}} + F_w + F_{\text{ус}}$$

где $F_{\text{пуч}}$ - величина пучения в верхней зоне

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

F_w - величина пучения за счет миграции влаги в верхнюю зону грунта

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

Ориентировочную протяженность верхней зоны промерзания глинистого грунта можно определить исходя из средней скорости промерзания грунта в первые 12 - 15 суток после начала понижения температуры воздуха:

$$S = V_{\text{пром}} * t_{\text{пром}} = 0,95 \frac{\text{см}}{\text{сут}} * 52 \text{ сут} = 49,4 \text{ см}$$

где $V_{\text{пром}}$ - скорость промерзания грунта

$t_{\text{пром}}$ - время промерзания грунта

Анализ экспериментальных исследований показал, что после 4 этапов промораживания-оттаивания были обнаружены существенные изменения физических свойств глинистого грунта:

1) произошло образование линз льда размерами 2-3 мм на стыке глинистого грунта и песка, (Рис. 7);

2) количество и размеры линз льда увеличиваются при дальнейшем подтягивание влаги до 5-6 мм, (Рис. 8).

После 4 этапов промораживания-оттаивания экспериментальные исследования не закончились. На 5 этапе был перекрыт подток воды к дну экспериментального лотка, промораживание пылевато-глинистого грунта продолжалось в течении 110 суток. Зафиксированы изменения физических свойств глинистого грунта по глубине из-за подтягивания влаги в зону промерзания. Изменялась влажность в нижней зоне (20 см от дна лотка) и таким образом грунт по показателю текучести изменялся с мягкопластичного на полутвёрдый, (Рис. 9,10) [5]. Изменение влажности зафиксировались датчиками, результаты приведены на графиках 1 и 2.

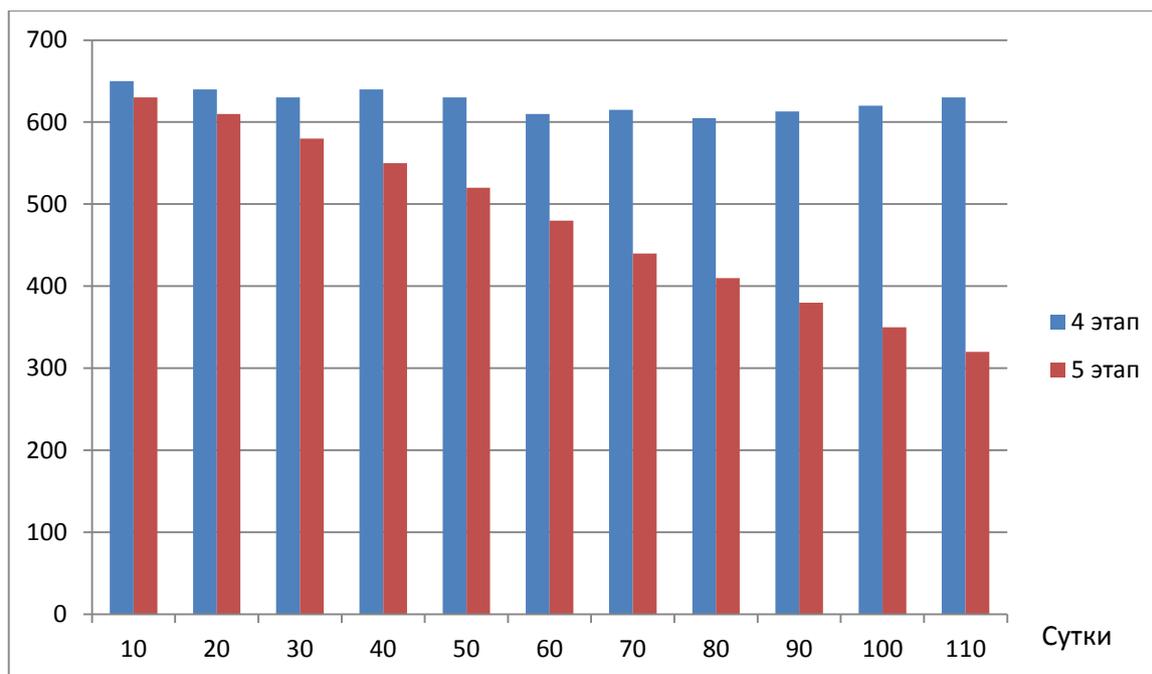


График 1. Показания датчика расположенного на дне контейнера

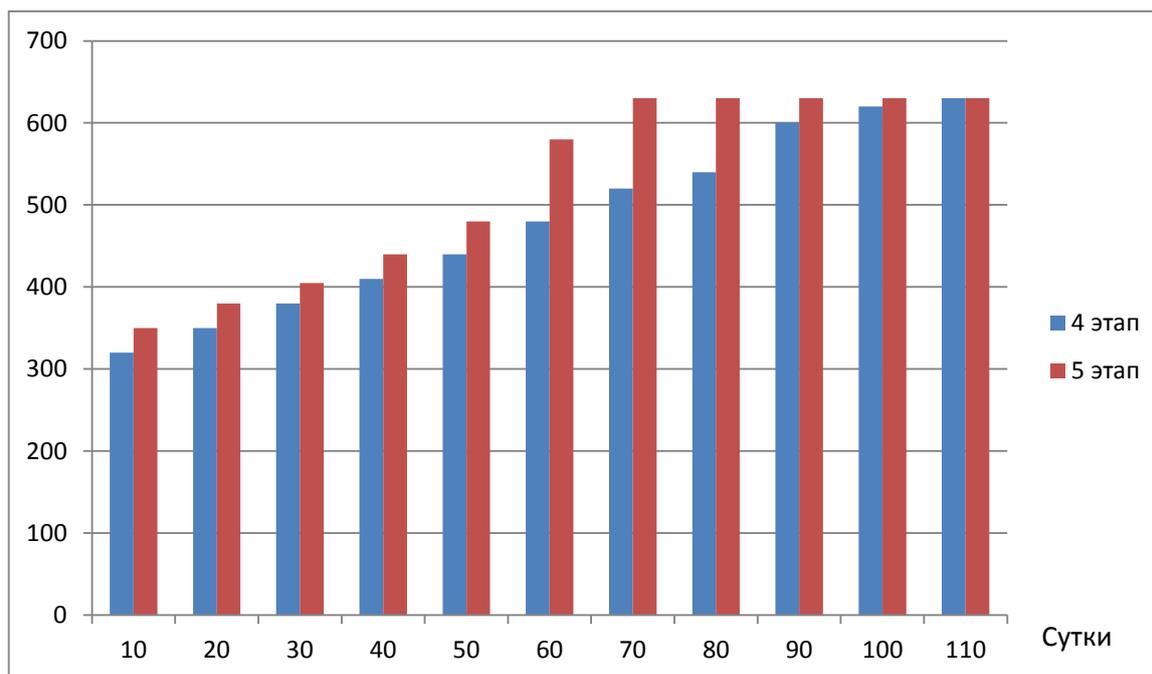


График 2. Показания датчика расположенного на стыке глинистого грунта и песка в контейнере

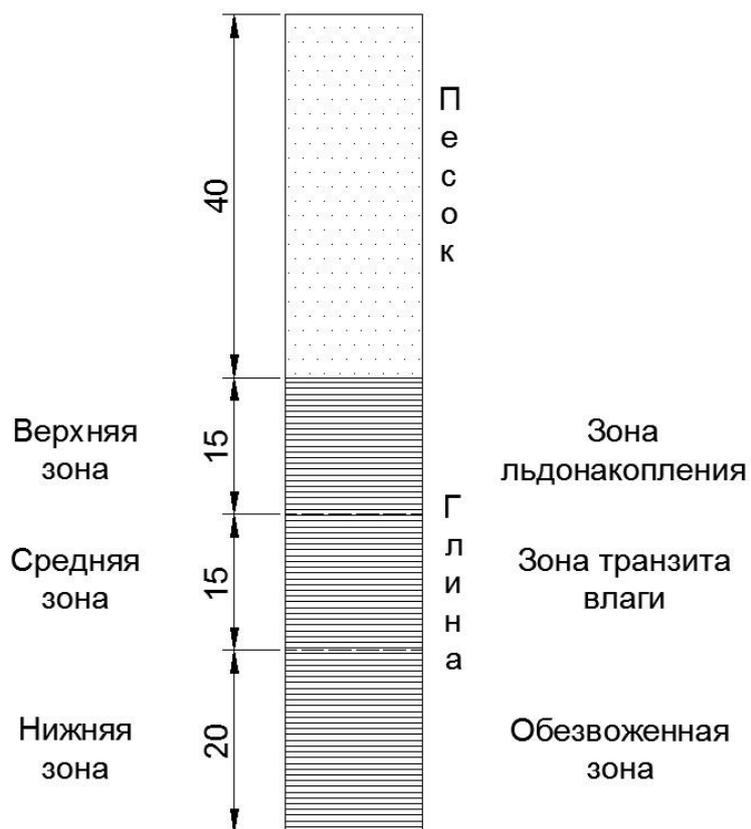


Рисунок 9. Схема формирования 3 зон глинистого грунта



Контейнер №2

Контейнер №1

Рисунок 10. Осушение глинистого грунта (фото авторов)

Анализ экспериментальных исследований показал, что после 4 этапов промораживания-оттаивания формируются 3 зоны, связанные с интенсивностью промерзания пылевато-глинистого грунта в период сезонного понижения температуры воздуха.

В верхней зоне силы морозного пучения образуются в результате массового пучения грунта при кристаллизации содержащейся в грунте воды и замерзании миграционной влаги. При кристаллизации воды в процессе перехода в лед ее объем увеличивается на 10-17 %, вызывая массовое пучение грунта. Массовое пучение определяется скоростью движения границ раздела фаз. При быстром промерзании пылевато-глинистого грунта величина сил пучения меньше, чем при медленном. Это объясняется тем, что при быстром промерзании вода фиксируется в порах грунта и ее миграция к фронту промерзания затрудняется [6]. Следовательно, процесс миграции воды в зону промерзания развивается не в полной мере. Чем медленнее углубляется фронт промерзания, тем большие напряжения развиваются в грунте. Увеличение напряжений по глубине объясняется высокой степенью обезвоживания промерзающего грунта при медленном промерзании. По результатам экспериментальных исследований основную долю пучения верхней зоны составляет миграционное льдонакопление. Эта величина составляет 60-90 % от суммарного льдонакопления. Такое увеличение льдонакопления связано с резким повышением плотности потока влаги по причине роста градиента температуры [7]. Миграционная влага поступает в верхнюю зону из талых зон, расположенных ниже, степень промерзания которой будет всегда меньше по отношению к рассматриваемой зоне. Это объясняется тем, что промерзание верхней зоны всегда будет проходить более интенсивно благодаря поступлению холодного воздуха. Из-за интенсивного промерзания у дневной поверхности верхней зоны, вызывающие на себя значительные миграционные потоки влаги, создаются условия для появления участков значительного обезвоживания пылевато-глинистого грунта. На фоне обезвоживания возникают деформации усадки, создающие условия для перемещения промерзающего грунта соседних участков в этом направлении. Обезвоженная промерзшая зона, испытывая давление промерзающего грунта уплотняется. Уплотнённая средняя зона вблизи фронта промерзания в дальнейшем не обезвоживается и становится зоной транзитного переноса влаги при постоянной плотности миграционного потока при достижении глинистым грунтом предельной влажности усадки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994, 381с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978, 447с.
3. Кузнецов Г.Б. Об одном подходе к описанию ползучести и релаксации материалов до разрушения. В кн.: Исследования по механике полимеров и систем. Свердловск, 1978. С.115-124.
4. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. М.: Недра, 1985, 342с.
5. Основания и фундаменты резервуаров. Под редакцией П.А.Коновалова. М.: Стройиздат, 1989, 223с.
6. Кузнецов Г.Б. О влиянии скорости в начале процесса на ползучесть и релаксацию материалов // Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений / Пермь. Перм.политехн.ин-т, 1972. С.21-24.
7. Бронин В.Н., Вишневецкий Г.Д. Прикладная теория ползучести грунтов: Учеб. Пособие. Л.: ЛИСИ, 1983, 49с.
8. Юшков. Б.С., Сергеев А.С. “Экспериментальные исследования затухающей ползучести грунтов в условиях компрессии”, Сборник Научно-технический Вестник Поволжья №6, г.Казань, 2012, 458с.
9. Юшков. Б.С., Сергеев А.С. "Проблемы выявления консолидационных параметров глинистых грунтов в основании автомобильной дороги", **«Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе», г.Пермь, 2013, 83с.**
10. Юшков. Б.С., Сергеев А.С. "Экспериментальные лабораторные исследования сдвиговой ползучести глинистых грунтов", Сбоник **«Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе», г.Пермь, 2013, 57с.**
11. Юшков. Б.С., Сергеев А.С. “Теории консолидации грунта в основании автомобильной дороги” Сборник Proceedings of the 1st International Academic Conference “Applied and Fundamental Studies”, St.Louis, Missouri, USA, 204с.

Sergeev Andrey Sergeevich

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

Yushkov Boris Semenovich

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

On the freezing of clay soil and water migration into the pavement design

Abstract. The freezing of the surface layers of the Earth's crust causes the volume deformation of soil and is expressed in the increase of volume and differential movement of their surface due to freezing of water and formation of ice inclusions. Underestimation of the frost heaving of soils, as well as the untimely application of anti - heaving measures cause the enormous damage to the national economy. All of this results in life reduction and condition deterioration of auto-road operation, as well as increase in non-manufacturing labor costs, building materials and financial means. During the experimental studies we have found that after four stages of freezing and defrosting the physical properties of clay soil change, i.e. the formation of 2-3 mm ice lenses is taking place at the junction of clay soil and sand. The number and dimensions of ice lenses increase with a further tightening of moisture up to 5-6 mm, and 3 zones related to the intensity of freezing are formed.

Keywords: frost heaving; migration of water; ice; lenses; research; sand; clay soil; sensors; moisture; temperature; cycles; volume; zones; dehydration

For citation:

Sergeev A.S., Yushkov B.S. [On the freezing of clay soil and water migration into the pavement design] *Russian journal of transport engineering*, 2014, Vol. 1, no. 1. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (In Russ.)

REFERENCES

1. Bartholomew AA Omelchak IM YUSHKOV BS Forecast sediment pile foundations. М.: Stroyizdat, 1994, 381s.
2. Vyalov SS Rheological basics of soil mechanics. М.: Higher School, 1978, 447s.
3. Kuznetsov GB On an approach to the description of creep and relaxation of materials to fracture. In the book.: Studies on the mechanics of polymers and systems. Sverdlovsk, 1978. S.115-124.
4. Meschyan SR Experimental rheology of clay soils. М.: Nedra, 1985, 342c.
5. Foundations tanks. Edited P.A.Konovalova. М.: Stroyizdat, 1989, 223s.
6. Kuznetsov GB On the influence of the speed at the start of creep and relaxation materials // Design, construction and operation of buildings and structures / Perm. Perm.politehn.in Press, 1972. S.21-24.
7. Bronin VN, Wisniewski G. Applied theory of soil creep: Proc. Allowance. L.: LISI, 1983, 49c.
8. YUSHKOV. BS, AS Sergeev "Experimental studies of transient creep soil under compression," Collection of Scientific and Technical Bulletin of the Volga №6, Kazan, 2012, 458s.
9. YUSHKOV. BS, AS Sergeev "The problems of identifying consolidation parameters of clay soils in the bottom of the road", "Modernization and research in the transport sector", Perm, 2013, 83c.
10. YUSHKOV. BS, AS Sergeev "Experimental laboratory studies of shear creep of clay soils" Sbonik "Modernization and research in the transport sector", Perm, 2013, 57c.
11. YUSHKOV. BS, AS Sergeev "The theory of consolidation of soil at the base of the road" Collection of Proceedings of the 1st International Academic Conference "Applied and Fundamental Studies", St.Louis, Missouri, USA, 204c.