

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

2016, Том 3, №4 / 2016, Vol 3, No 4 <http://t-s.today/issues/vol3-no4.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/02TS416.pdf>

DOI: 10.15862/02TS416 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS416>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Апталаев М.Н., Жалко М.Е. Влияние водно-теплового режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 3, №4 (2016)
<http://t-s.today/PDF/02TS416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02TS416

For citation:

Aptalaev M.N., Zhalko M.E. [Effect of the water-and-thermal regime of the auto-road base on the pavement state] Russian journal of transport engineering, 2016, Vol. 3, no. 4. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS416.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/02TS416

УДК 624.1:625.7:656.1

Апталаев Марат Назимович¹

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Филиал в г. Лысьва, Россия, Лысьва²
Старший преподаватель
E-mail: Aptalaev_lfpstu@mail.ru

Жалко Михаил Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Филиал в г. Лысьва, Россия, Лысьва
Старший преподаватель
E-mail: Mihailz-49@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=806450

Влияние водно-теплового режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды

Аннотация. Представленная статья посвящена изучению влияния состояния дорожной одежды дорог с усовершенствованным покрытием на безопасность автомобильного движения. Актуальность изучаемого вопроса подтверждается как статистическими данными Государственной инспекции безопасности дорожного движения, так и значительным перечнем научных трудов, посвященных вопросам водно-теплового баланса грунтового массива. В рамках статьи рассматриваются как дороги, расположенные в черте города, так и загородные участки.

В работе показано влияние температуры и влажности на процесс промерзания грунта и непосредственно на целостность дорожного покрытия. Представлены математические модели, отражающие процессы распределения температуры и фильтрационное движение жидкости в грунте.

Также предложены два варианта улучшения технико-эксплуатационных качеств автомобильных дорог, что в свою очередь окажет положительное влияние на безопасность и плавность дорожного движения.

¹ <https://vk.com/id171565685>

² Россия, Пермский край, г. Лысьва, ул. Ленина 2

Ключевые слова: безопасность дорожного движения; водно-тепловой режим; морозное пучение; основание автомобильной дороги; внутригрунтовые источники тепла; инженерная конструкция; коллектор

Введение

Одной из причин высоких показателей аварийности на территории Российской Федерации является неудовлетворительное состояние дорожного полотна. ГИБДД РФ ежемесячно подводит итоги аварийности на дорогах страны с учётом причин. Динамика ДТП по причине неудовлетворительного состояния дорог и улиц (НДУ) представлена на рисунке 1.

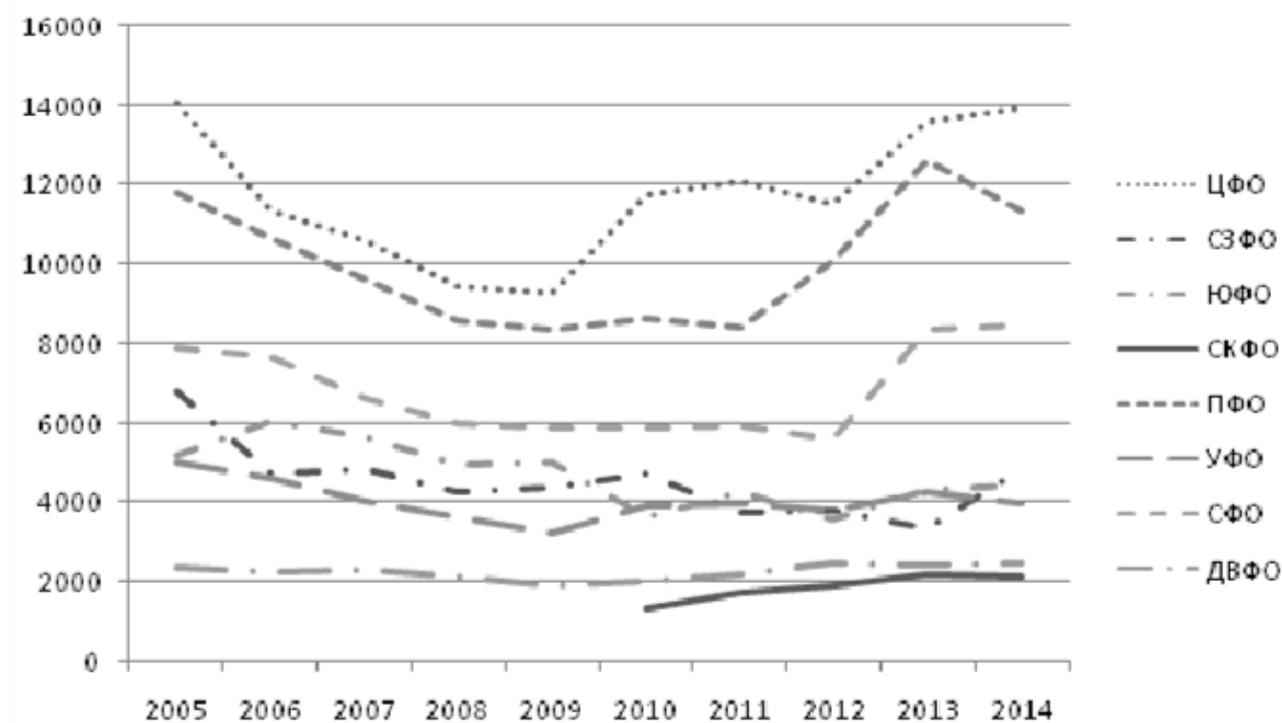


Рисунок 1. Динамика количества ДТП по причине НДУ

На основании результатов обработки статистической информации можно сделать вывод о том, в большинстве регионов наблюдается положительная динамика показателя аварийности по причине неудовлетворительного состояния дорожной одежды. Улучшение обстановки с 2005 г. по 2010 г. связано с реализацией программы модернизации транспортного комплекса России. Однако, на данный момент износ и разрушение дорог вновь оказывают существенное влияние на безопасность дорожного движения.

Вопросы разрушения автомобильных дорог рассматривались на протяжении многих лет. Так, коллектив авторов под руководством проф. ПНИПУ Б.С. Юшкова отмечает: «После ввода автомобильной дороги в эксплуатацию уже в первый год на поверхности покрытия наблюдаются поперечные трещины (морозобойные), располагающиеся с шагом через 40...60 м, после двух лет – 10...30 м и при этом без признаков износа и образования колеи» [1].

На верхнюю часть земляного полотна в большей степени воздействуют погодноклиматические факторы, вызывая существенные изменения свойств грунта. В земляное полотно проникает часть влаги при выпадении атмосферных осадков и стоке поверхностных вод, а также в результате капиллярного поднятия влаги при наличии грунтовых вод. Интенсивность изменения количества влаги в грунте земляного полотна зависит от вида

грунта, количества атмосферных осадков, продолжительности увлажнения поверхностными или грунтовыми водами и от температурного режима.

Наиболее неблагоприятными для земляного полотна являются средние климатические условия, зоны избыточного увлажнения, для которых характерны сравнительно длительные зимние периоды. Осенний дождливый период с последующим медленным промерзанием создает наиболее благоприятные условия для влагонакопления и морозного пучения грунтов.

Основной причиной разрушения дорожной одежды является морозное пучение.

Горная энциклопедия приводит следующее определение данного процесса: «*Морозное пучение грунтов — процесс увеличения объёма и деформирования дисперсных грунтов при промерзании и образования выпуклых форм на их поверхности*». [12]

При проектировании, строительстве, эксплуатации и ремонте дорог необходимо учитывать влияние многих факторов, определяющих состояние УДС. Во время эксплуатации на дорогу действуют нагрузки от проезжающих транспортных средств, грунтовые и поверхностные воды, природно-климатические факторы, хозяйственная деятельность людей в области расположения дороги.

Одним из основных требований к дороге является ее устойчивость к воздействию нагрузок от проходящих транспортных средств. Данные нагрузки являются динамическими.

Крайне опасно воздействие нагрузок подобного рода на дорожную одежду в период сильного увлажнения и переувлажнения ее основания и земляного полотна.

Самым негативным образом на состоянии дорожной одежды сказывается промерзание влажного грунта. Промерзание может распространяться на 1,0-2,5 метра в глубину грунта, в зависимости от климатических условий. Вода в грунте может замерзнуть до глубины промерзания, что вызывает увеличение ее объема на десять процентов [6]. Поскольку в связанном грунте нет места для увеличения объема, грунт начинает подниматься вверх. Наблюдается, так называемое, морозное пучение, обусловленное образованием ледяных линз. Подобные движения грунта могут приводить к значительным разрушениям дорожных покрытий.

О влиянии внутригрунтовых источников тепла на водно-тепловой режим грунтового массива (дорожной одежды)

Наличие подземных инженерных коммуникаций (водо- и теплопроводов) вблизи дорог и улиц способствует удлинению талого периода для грунта земляного полотна, и, следовательно, увеличению периода накопления остаточных деформаций в дорожном полотне. Прокладка подземных теплопроводов увеличивает число циклов замерзания-оттаивания грунта, что вызывает еще большую прогрессию в накоплении остаточных деформаций земляного полотна. Также в области действия внутригрунтовых источников тепла может наблюдаться незначительное увеличение влажности грунта по сравнению с обычными участками, что также сказывается на темпе накопления деформаций в системе «дорожная одежда-земляное полотно» [12].

Исключить пересечение подземных инженерных коммуникаций с УДС города практически невозможно. В нормативно-технической документации вопросы размещения подземных теплопроводов относительно УДС и взаимного влияния компонентов системы «подземный трубопровод – грунтовой массив – дорожная одежда» освещены крайне скудно, поэтому выработка рекомендаций по прокладке трубопроводов и их влияние на состояние дорожного покрытия УДС является важной задачей.

Для решения задачи распространения тепла от теплопровода в грунте земляного полотна в первую очередь понадобится определить изменение температуры без учета внутригрунтового источника тепла. Был проведен анализ многих методов температурных расчетов и определения глубин промерзания грунта земляного полотна.

Все методы условно делятся на три группы:

- точные математические методы (предложены В.Г. Меламедом и А.И. Рубенштейном);
- достаточно точные уравнения для практических целей, полученные с использованием закона теплопроводности Фурье (методы В.С. Лукьянова и М.Д. Головки [5], А.Я. Тулаева [11], И.А. Золотаря [3], В.М. Сиденко, Е.И. Шелопаева и др.);
- эмпирические методы расчёта, основанные на параболической зависимости между глубиной и продолжительностью промерзания (метод проф. Н.А. Пузакова [8]), а также на косвенных показателях с учётом снегового покрова, среднемесячной и среднегодовой температур воздуха, климатического показателя увлажнённости и др.

В задачу теплового расчета входит решение следующих вопросов:

- 1) определение тепловых потерь теплопровода;
- 2) расчет температурного поля вокруг теплопровода, т.е. определение температур изоляции, воздуха в канале, стен канала, грунта;
- 3) расчет падения температуры теплоносителя вдоль теплопровода;
- 4) выбор толщины тепловой изоляции теплопровода.

Тепловые потери 2-трубных тепловых сетей, расположенных в грунте на одинаковом расстоянии от поверхности до оси труб H , m , определяются по формулам

$$q_1 = \frac{(t_{B1} - t_H) \cdot (R_{из2} + R_{гр2}) - (t_{B2} - t_H) \cdot R_0}{(R_{из1} + R_{гр1}) \cdot (R_{из2} + R_{гр2}) - R_0^2} \cdot K, \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{(t_{B2} - t_H) \cdot (R_{из1} + R_{гр1}) - (t_{B1} - t_H) \cdot R_0}{(R_{из1} + R_{гр1}) \cdot (R_{из2} + R_{гр2}) - R_0^2} \cdot K, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где: q_1 , q_2 – линейные плотности теплового потока от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м^2 ;

t_{B1} , t_{B2} – температуры подающего и обратного трубопроводов, $^{\circ}\text{C}$;

t_H – температуры наружной среды, $^{\circ}\text{C}$;

K – коэффициент дополнительных потерь, принимаемый по таблице;

$R_{из1}$, $R_{из2}$ – термические сопротивления изоляции подающего и обратного трубопроводов, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/Вт}$;

λ – теплопроводность изоляции в конструкции, $\text{Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$;

$R_{гр1}$, $R_{гр2}$ – термическое сопротивление грунта, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/Вт}$, определяется по формуле (13):

$\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта, $\text{Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$;

H – глубина заложения - расстояние от оси труб до поверхности земли, m ;

R_0 – термическое сопротивление, обусловленное тепловым взаимодействием двух труб, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Для учета неоднородности конструктивных свойств слоев дорожной одежды и свойств изоляционного канала, был выполнен ряд преобразований, в результате чего, конечное выражение для расчета температуры точки грунтового массива в окрестностях двухтрубного теплопровода приняло вид, представленный формулой (3)

$$t = t_B + \frac{t_r - t_B}{R} \cdot R_{\Pi} + \frac{h_1}{\lambda_1} \cdot \frac{t_r - t_B}{R} + \frac{h_2}{\lambda_2} \cdot \frac{t_r - t_B}{R} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n} \cdot \frac{t_r - t_B}{R} + \frac{H}{H \cdot \lambda_{гп}} \cdot \frac{t_r - t_B}{R} + \frac{q_1}{\lambda_{гп}} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + (y+h)^2}}{\sqrt{x^2 + (y-h)^2}} + \frac{q_2}{\lambda_{гп}} \cdot \ln \frac{\sqrt{(x-b)^2 + (y+h)^2}}{\sqrt{(x-b)^2 + (y-b)^2}}, \quad \text{°C} \quad (3)$$

где: t_B – температура воздуха, °C ;

t_r – температура грунта на глубине H от поверхности дорожной одежды, °C ;

R_{Π} – термическое сопротивление слоев дорожной конструкции, назначается в зависимости от скорости ветра, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

R – термическое сопротивление слоев дорожной одежды, определяется по формуле (4), $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

$$R = R_{\Pi} + \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n}, \quad \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} \quad (4)$$

$h_1 \dots h_n$ – толщины конструктивных слоев дорожной одежды и неоднородных слоев грунтового массива, м ;

$\lambda_1 \dots \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности соответствующих конструктивных слоев дорожной одежды и неоднородных слоев грунтового массива, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$;

q_1, q_2 – удельные тепловые потери первой и второй трубы трубопровода, $\text{Вт}/\text{м}$.

Основные параметры полученной модели представлены на рисунке 2.

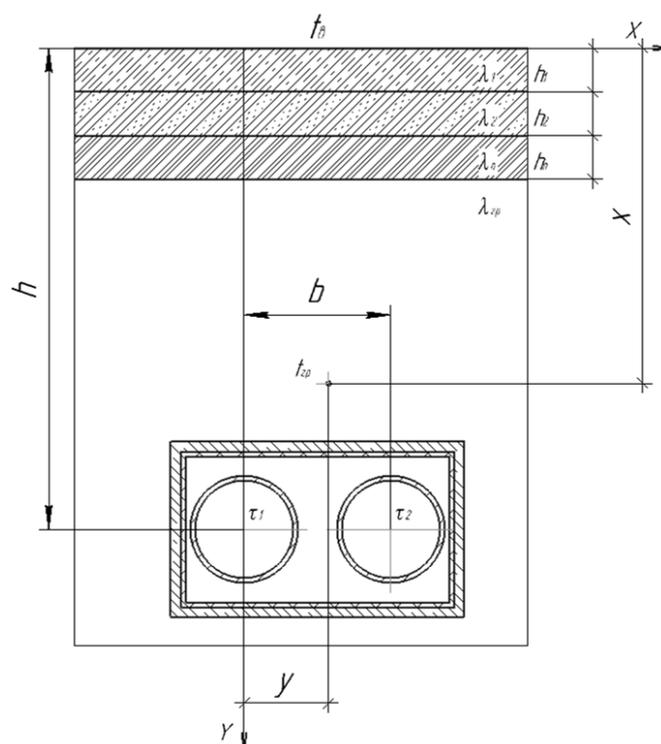


Рисунок 2. Модель системы «двухтрубный теплопровод – дорожная одежда»

Для оценки влияния втутригрунтового источника тепла на ход сезонного промерзания грунтового массива, был выполнен ряд расчетов. Расчёты выполнены для глубины заложения сети 2,0 м в двух вариантах: с наличием в грунте источника тепла и без него. Результаты представлены на рисунке 3.

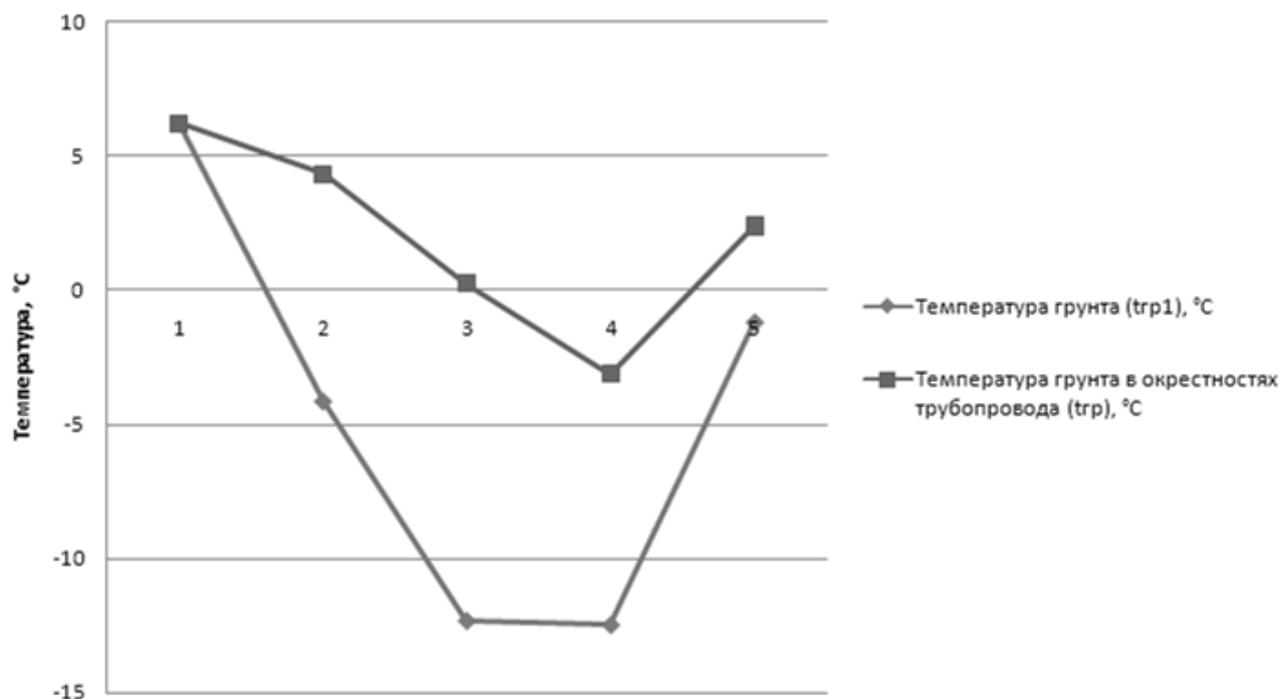


Рисунок 3. Зависимость температуры грунта от температуры воздуха

График демонстрирует значительное повышение температуры точки грунтового массива в окрестностях подземного теплопровода, по сравнению с температурой, полученной в ходе моделирования естественного промерзания грунта без наличия в нем искусственных источников тепла. Наличие втутригрунтовых источников тепла приводит к нарушению теплового баланса в системе «грунтовой массив (дорожная одежда) – окружающая среда».

Для снижения влияния подземных сетей инженерных коммуникаций на ход сезонного промерзания конструктивных слоев дорожных одежд и повышения их надежности и долговечности, В.А. Трефиловым и М.Н. Апталаевым была предложена конструкция железобетонного канала для прокладки инженерных коммуникаций всех типов. [7]

Конструкция коллектора представлена на рисунке 4, где 1 – лотковый элемент, 2 – гидро- и теплоизоляция, 3 – кронштейн для монтажа подземных коммуникаций, 4 – трубопровод, 5 – электрический кабель, 6 – кабельная линия системы контроля, 7 – грунтовой массив, 8 – плита покрытия канала с изолированным разъемом для подключения коммутационной станции, 9 – коммутационная станция, 10 – датчик дистанционного контроля.

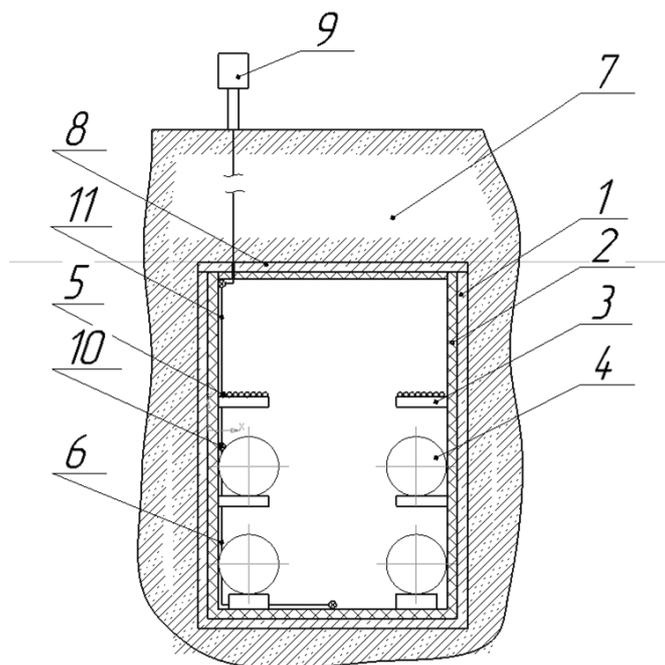


Рисунок 4. Общий вид коллектора

О регулировании влажности грунтовых оснований автомобильных дорог

Водно-тепловой режим дорожного полотна автомобильной загородной дороги существенно отличается от режима городских дорог.

Связано это не только со спецификой движения транспортного потока по загородным участкам, но и с требованиями, предъявляемыми к основаниям дорог. В частности, загородные автомобильные дороги, как правило, не имеют в основании пересечений с теплопроводами. Следовательно, в грунтовом массиве нет внутренних источников тепла. Данный факт выводит на первый план необходимость обеспечения водоотведения.

Нормативной документацией разбиение всех дренажных систем на два основных вида [10]:

- сооружения открытого водоотвода;
- сооружения закрытого водоотвода.

К сооружениям открытого водоотвода относят канавы, кюветы, а также водосбросные лотки. Основная задача данных сооружений – не допустить аккумуляции воды на поверхности дорожной одежды.

К дренажным конструкциям, обеспечивающим подземное водоотведение, относят перехватывающие, подкюветные, врезные и др. дренажи.

Основной целью мероприятий по регулированию водно-теплого режима работы земляного полотна является уменьшение амплитуды колебания влажности [4].

На основе конструктивных особенностей и назначения все мероприятия по регулированию влажности грунтового массива можно разделить на четыре группы. Классификация представлена на рисунке 5.



Рисунок 5. Методы регулирования увлажнения грунтового основания

В рамках данной работы рассмотрена проблема обеспечения дренирования основания дорожной одежды.

В целях изучения процесса движения воды в грунте была решена фильтрационная задача.

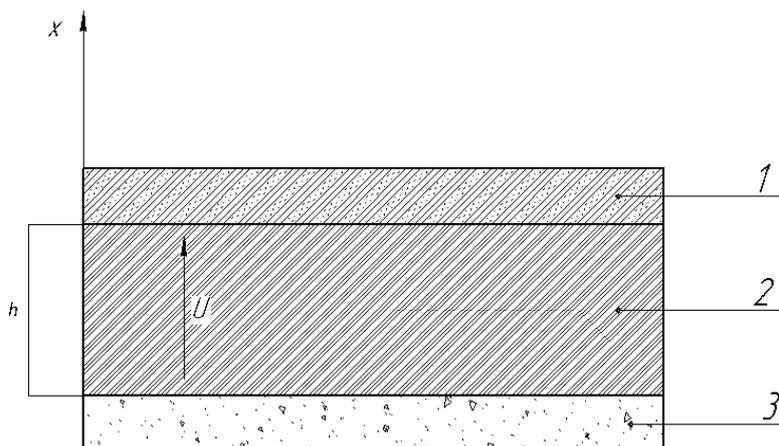


Рисунок 6. Расчетная схема задачи фильтрации

где: 1 – граница дренируемого объема грунта, 2 – подстилающий грунт, 3 – уровень грунтовых вод, h – высота столбика грунта.

В качестве базового уравнения примем уравнение движения флюида в пористой среде, предложенное А.И. Цаплиным и В.Н. Нечаевым:

$$\frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left(u \frac{\partial U}{\partial z} + V \frac{\partial U}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - u \frac{V}{k} + VU, \quad (5)$$

Применимо к расчетной схеме уравнение примет следующий вид:

$$\frac{1}{m^2} u \frac{d u}{d x} = \frac{v}{k} u - g, \quad (6)$$

где: m – пористость грунта;

K – проницаемость грунта;

U – проекция скорости подъема воды на ось x , м/с;

ρ – плотность воды, кг/м³;

V – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Исследование функции на экстремум показывает, что скорость подъема воды по высоте слоя грунта непостоянна и изменяется от нуля на уровне грунтовых вод до максимального значения, а затем уменьшается до нуля. При этом максимальная и средняя в пределах слоя толщиной δ скорости определяются соотношениями:

$$u_{\max} = gk / (2v), \quad (7)$$

$$u_{\text{ср}} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} u dx = \frac{2m}{3} \sqrt{2g\delta} - \frac{m^2 v \delta}{2k}, \quad (8)$$

При многослойной конструкции дорожного основания по высоте локальные скорости на границах контакта слоев равны, поэтому распределение скорости подъема воды в i -м слое может быть найдено по формуле:

$$u_{i+1} = u_i + m_i \sqrt{2g \left(x - \sum_{i=1}^n \delta_i \right) - \frac{m_i^2 v}{k_i} \left(x - \sum_{i=1}^n \delta_i \right)}, \quad (9)$$

где: i – номер слоя, $i=1,2,\dots,n$;

n – количество слоев толщиной δ_i с однородной пористостью по высоте дорожного основания.

Расход воды плотностью ρ в любом слое дорожного основания для одного погонного метра полотна дороги полушириной B (рисунок 6) определяется формулой:

$$G_i = u_i \rho B \quad (10)$$

Одним из способов регулирования влажности грунта является устройство дренажных систем. В данной статье рассматривается решение, предлагаемое В.А. Трефиловым и М.Е. Жалко. [8]

Необходимо произвести расчёт оптимального расстояния между дренами по предлагаемой авторами схеме.

Расход воды в грунтовом основании из песка и супеси для одного погонного метра полотна дороги полушириной B определяется формулой:

$$G_{\text{грунта}} = u_{\max} \rho B = 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \cdot 10 \approx 6,3 \cdot 10^{-2}, \quad (11)$$

Массовый секундный расход воды в поперечном сечении дренажной трубы диаметром $d=0,1$ м, заполненной щебнем крупной фракции с песком, определяется действием только капиллярных сил, поэтому:

$$G_{\text{трубы}} = u_{\max} \cdot \rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot \frac{3,14 \cdot 10^{-2}}{4} \approx 4,9 \cdot 10^{-2}, \quad (12)$$

При этом дистанция между дренирующими трубами составляет:

$$L = G_{\text{трубы}} / G_{\text{грунта}} = 4,9 \cdot 10^{-2} / 6,3 \cdot 10^{-2} \approx 0,8 \text{ м.} \quad (13)$$

Полученные данные в достаточной степени коррелируются с результатами расчётов по методикам, используемым на данный момент.

Заключение

Результатом проведенной работы является не только всесторонний анализ причин морозного пучения и методов минимизации этого явления, но и решение ряда практических задач:

- получено выражение для определения температуры точек грунтового массива в окрестностях подземного теплопровода;
- предложена конструкция коллектора для подземной прокладки сетей инженерных коммуникаций;
- разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать скорость и объём фильтрационного подъёма воды в зависимости от типа грунта;
- представлено решение задачи оптимизации количества дрен в зависимости от ряда параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бургунутдинов А.М., Юшков Б.С., Бурмистрова О.Н., Воронина М.А. Причины образования деформаций и разрушений на покрытии автомобильных дорог // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2014. №1 (17). – С. 89–93.
2. Горячев М.Г., Довикян А.Н. Влияние бесканальных теплосетей в футляре на водно-тепловой режим земляного полотна // Наука и техника дорожной отрасли, №1, 2008 г – С. 45–47.
3. Золотарь И.А. Основы расчёта водно-тепловых процессов в земляном полотне автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых горных пород / И.А. Золотарь // Материалы VIII Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии (мерзлотоведению). – Якутск: Якутское книж. изд-во, 1966. – Вып. 8. – С. 95–107.
4. Кириллов Ф.А., Особенности регулирования водного режима земляного полотна и оснований дорожных одежд [Текст] / Ф.А. Кириллов // Технологии, машины и производство лесного комплекса: материалы международной научно-практической конференции / ВГЛТА. – Воронеж, 2004. – ч.П. – С. 52-56.
5. Лукьянов В.С. Расчёт глубины промерзания грунтов / В.С. Лукьянов, М.Д. Головки // Труды ЦНИС. – М.: Трансжелдориздат, 1957. – Вып. 23. – 164 с.
6. Нестле Х. Справочник строителя. Строительная техника конструкции и технологии. – М. Техносфера, 2007. – 394 с.
7. Патент РФ № 156225. Коллектор для прокладки инженерных коммуникаций. Трефилов В.А., Апталаев М.Н., опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
8. Патент РФ № 151370. Устройство водоотведения из-под дорожного полотна. Трефилов В.А., Жалко М.Е., опубл. 10.04.2015, Б.и. №10.
9. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н.А. Пузаков. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 168 с.
10. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги.
11. Регулирование водно-теплого режима земляного полотна в городских условиях / под общ. ред. А.Я. Тулаева. – М.: Высшаяшкола, 1972. – 121 с.
12. URL: <http://www.mining-enc.ru/m/moroznoe-puchenie> (дата обращения 22.05.2016).

Aptalaev Marat Nazimovich

Perm national research university
Lysva branch, Russia, Lysva
E-mail: Aptalaev_lfpstu@mail.ru

Zhalko Mikhail Evgen'evich

Perm national research university
Lysva branch, Russia, Lysva
E-mail: Mihailz-49@mail.ru

Effect of the water-and-thermal regime of the auto-road base on the pavement state

Abstract. The presented article is devoted to the study of effect of the pavement state of the roads with improved road surface on the safety of automobile traffic. Actuality of the issue under study is confirmed both by the statistical data of the State Road Traffic Safety Inspectorate and by a significant list of scientific works dealing with issues of the water and heat balance of the soil mass. Within a framework of the article the author considers both the roads located within the city and suburban road sections.

The work shows the influence of temperature and humidity on the process of straight-freezing and directly on the integrity of the road surface. The mathematical models reflecting the temperature distribution processes and filtration movement of fluid in the soil.

The author also suggests two options for improving technical and service performance of roads, which in turn will have a positive impact on the safety and smoothness of traffic.

Keywords: road-traffic safety; water and thermal regime; frost boil; base of the auto-road; intra-subsurface heat sources; engineering construction; collector

REFERENCES

1. Burgonutdinov A.M., Yushkov B.S., Burmistrova O.N., Voronina M.A. Prichiny obrazovaniya deformatsiy i razrusheniy na pokrytii avtomobil'nykh dorog // Izvestiya Komi NTs UrO RAN. 2014. №1 (17). – S. 89–93.
2. Goryachev M.G., Dovikyan A.N. Vliyanie beskanal'nykh teplosetey v futlyare na vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna // Nauka i tekhnika dorozhnoy otrasli, No1, 2008 g – S. 45–47.
3. Zolotar' I.A. Osnovy rascheta vodno-teplovyykh protsessov v zemlyanom polotne avtomobil'nykh dorog v rayonakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh gornyykh porod / I.A. Zolotar' // Materialy VIII Vsesoyuznogo mezhdudedomstvennogo soveshchaniya po geokriologii (merzlotovedeniyu). – Yakutsk: Yakutskoe knizh. izdvo, 1966. – Vyp. 8. – S. 95–107.
4. Kirillov F.A., Osobennosti regulirovaniya vodnogo rezhima zemlyanogo polotna i osnovaniy dorozhnykh odezhd [Tekst] / F.A. Kirillov // Tekhnologii, mashiny i proizvodstvo lesnogo kompleksa: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / VGLTA. – Voronezh, 2004. – ch.P. – S. 52-56.
5. Luk'yanov V.S. Raschet glubiny promerzaniya gruntov / V.S. Luk'yanov, M.D. Golovko // Trudy TsNIS. – M.: Transzheldorizdat, 1957. – Vyp. 23. – 164 s.
6. Nestle Kh. Spravochnik stroitelya. Stroitel'naya tekhnika konstruksii i tekhnologii. – M. Tekhnosfera, 2007. – 394 s.
7. Patent RF № 156225. Kollektor dlya prokladki inzhenernykh kommunikatsiy. Trefilov V.A., Aptalaev M.N., publ. 10.11.2015, Byul. № 31.
8. Patent RF № 151370. Ustroystvo vodootvedeniya iz-pod dorozhnogo polotna. Trefilov V.A., Zhalko M.E., publ. 10.04.2015, B.i. №10.
9. Puzakov N.A. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog / N.A. Puzakov. – M.: Avtotransizdat, 1960. – 168 s.
10. SNiP 2.05.02-85. Avtomobil'nye dorogi.
11. Regulirovanie vodno-teplovogo rezhima zemlyanogo polotna v gorodskikh usloviyakh / pod obshch. red. A.Ya. Tulaeva. – M.: Vysshayashkola, 1972. – 121 s.
12. URL: <http://www.mining-enc.ru/m/moroznoe-puchenie> (data obrashcheniya 22.05.2016).