УДК 625.7/.8

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В МЕСТАХ ПЕРЕХОДА ВЫЕМКИ В НАСЫПЬ

Бургонутдинов А.М., Косолапов О.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, e-mail: koa@msa.pstu.ru

В настоящей статье рассмотрены причины образования морозобойных поперечных трещин на автомобильных дорогах в местах перехода из насыпи в выемку. В работе приведены результаты полевых исследований и расчетные модели теплофизических процессов, происходящих в дорожных конструкциях под воздействием температуры окружающей среды и динамических нагрузок. Применение методик авторов позволит разработать рекомендации по повышению эксплуатационных свойств автомобильных дорог. В статье приведены результаты исследований теплового состояния дороги, выполненные при помощи тепловизоров. Приведенные результаты измерения температур поверхностей автомобильных дорог коррелируются с результатами теоретических расчетов, выполненных при помощи программных продуктов GEOSTUDIO/TEMP (Канада) и ANSYS (США). Проведенные исследования позволяют объяснить причину образования морозобойных трещин на асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог.

Ключевые слова: автомобильная дорога, выемка, насыпь, теплопроводность, тепловлагообмен, поперечные морозобойные трещины, теплофизические и физические параметры грунтов и дорожной конструкции, тепловизор

THERMOPHYSICAL PROPERTIES CHANGES OF THE HIGHSWAYS IN THE CUT-TO-FILL LOCATIONS

Burgonutdinov A.M., Kosolapov O.A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: koa@msa.pstu.ru

The article describes the reasons of the ice-break butt cracks formation on the highways in the cut-to-fill locations. The paper gives the results of the field studies and design models of thermo physical process, occurring in the road structure under the temperature and fatigue stressing exposure. The use of authors' techniques will develop recommendations for improving the performance properties of roads. The results of studies of the thermal state of the road , made using thermal imagers . These measurements of the temperature of road surface are correlated with the results of theoretical calculations , made using GEOSTUDIO / TEMP (Canada) and ANSYS software products (US). The studies help to explain the reason for the formation of frost cracks in the asphalt concrete pavement roads.

Keywords: highways, digging, boarder levee, capacity of heat transmission, moisture structure and heat exchange, ice-break butt cracks, thermal and physical properties of the soil and road constructions, thermal imager

Климатические условия Пермского края обусловлены широким диапазоном изменения температуры воздуха от – 45 °С до + 35 °С. Для таких суровых климатических условий Урала характерно сезонное промерзание и оттаивание грунтов, кроме того, на значительной части территории имеются участки с неблагоприятными грунтово-гидрологическими условиями, что вызывает появление значительных деформаций на поверхности дорожной одежды автомобильных дорог, вызванных морозным пучением грунтов.

В слоях дорожной конструкции происходят интенсивные процессы тепломассообмена, вызванные резкими изменениями температур в переходный период и солнечными зимними днями, фазовыми превращениями воды, существенными изменениями влажности, особенно на участках перехода из выемки в насыпь в годовом цикле.

Термическое состояние асфальтобетонного покрытия определяется притоком (отводом) тепловой энергии. Основной причиной нагрева асфальтобетонного покрытия и прилегающей к дороге территории является лучистая энергия солнца, поглощаемая его поверхностным слоем. Распределение тепла зависит от минералогического состава покрытия, от рельефа, наличия растительности, степени и продолжительности солнечного освещения, влажности и пористости, определяющих теплофизические свойства почвы, и многих других параметров.

Высокие категории дорог проводят по секущей линии для уменьшения объема земляных работ и соблюдения нормативных требований. В результате чего на дороге имеются участки с насыпью и выемкой. В результате экспериментально-теоретических исследований установлено, что распределение тепловой энергии на этих участках происходит по-разному [1, 2].

В первый же год эксплуатации автомобильных дорог на участках сопряжения насыпь – выемка образуются морозобойные поперечные трещины [3, 4]. Проведенные полевые исследования с использованием

тепловизионной инфракрасной камеры промышленного назначения FLIR P620 подтвердили, что изменение теплофизических свойств поверхности автомобильной дороги на участке сопряжения насыпь – выемка происходит по различному механизму. Температура окружающей среды на момент замера составляла 9,2 °С. На поверхности участка насыпь температура края дороги вблизи обочины – 9,4 °С, на участке выемка – 8,9 °С (см. рис. 1–3).

На рис. 4 приведен внешний вид и температурный баланс трещины на стыке насыпь – выемка. Определено, что температура в трещине выше, чем на поверхности, на 1,8 °С и составила 11,2 °С. Данное явление свидетельствует об интенсивном тепло- и влагообмене внутри дорожной конструкции [5, 6, 7]. Поэтому в весенний период наблюдается максимальное раскрытие трещины. В холодное время суток (ночью) занесенное через трещину за день в слои дорожной конструкции тепло расходуется на испарение воды и нагрев окружающего пространства.

При составлении теплограммы дорожного покрытия от точки стыка насыпь – выемка до точки окончания выемки было установлено следующее:

1. Температура на входе в выемку и на выходе примерно одинакова (10,2 °С на проезжей части на расстоянии 1 метра от обочины);

2. На участке выемки температура изменялась по линейной зависимости с точкой перегиба. Наименьшая температура была зафиксирована посередине выемки и составила 8,3 °С.

3. На этом участке с наименьшей температурой произошло образование поперечной морозобойной трещины (см. рис. 5).

Таким образом, можно отметить закономерность образования морозобойных поперечных трещин на участках стыка выемка – насыпь, а также в середине выемки.

Рис. 1. Место стыка насыпь – выемка

Рис. 2. Температура поверхности (участок дороги в выемке)

Рис. 3. Место стыка на участке насыпь – выемка

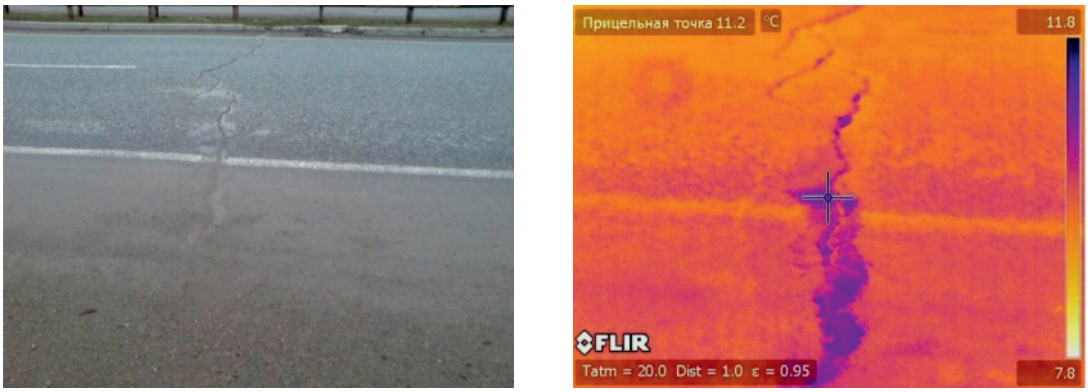


Рис. 4. Вид и теплограмма трещины на участке насыпь – выемка

Наличие трещин на участках перехода из насыпи в выемку, поперечной трещины на середине выемки большей частью связано с изменением теплопроводности материалов в самой дорожной конструкции под воздействием температуры окружающей среды и воздействием динамической нагрузки от пневматических колес автомобиля [4].

Рис. 5. Морозобойная трещина в середине выемки

В настоящее время существуют программные комплексы, учитывающие теплопередачи в слоях дорожной конструкции и позволяющие решать задачи теплопереноса, такие как GeoStudio (Канада); COSMOS/M (Россия); ANSIS (США) и др.

Термодинамические расчеты, выполняемые представленными комплексами, сводятся к решению основных дифференциальных уравнений термодинамики методом конечных элементов (МКЭ).

При выборе программных продуктов необходимо учитывать следующие основные требования и возможности программного комплекса:

– проведение термодинамических расчетов для грунтов, с учетом того, что грунт является многофазной системой;

– учет климатических данных конкретного района (температура воздуха, влажность, количество осадков и др.);

– возможность задания основных теплофизических (теплопроводность и теплоемкость) и физических (влажность, плотность) параметров грунтов и их изменения при процессах замораживания и оттаивания;

– возможность задания граничных условий различного рода (температура, тепловой поток, плотность теплового потока, функциями данных величин);

– возможность задания начальных условий модели – температуры в любой точке модели.

В частности, программный комплекс «GeoStudio/Temp» предназначен для решения плоских задач термодинамики грунтов, в том числе позволяет решать задачи в осесимметричной постановке.

При создании численной модели создаются области, состоящие из отдельных ячеек. Области могут разбиваться на структурированные ячейки правильной формы (квадратной, прямоугольной, трапециевидной и др.) и неструктурированные ячейки треугольной формы. Разбитие области на ячейки производится автоматически, тип ячеек (структурированные или неструктурированные) выбирается. Пример разбития области приведен на рис. 6.

Все ячейки области обладают одинаковыми характеристиками. Для каждой области задаются следующие характеристики:

– теплопроводность мерзлого и талого грунта;

– теплоемкость мерзлого и талого грунта;

– объемная влажность грунта;

– функция «влажности» при переходе грунта в мерзлое состояние.

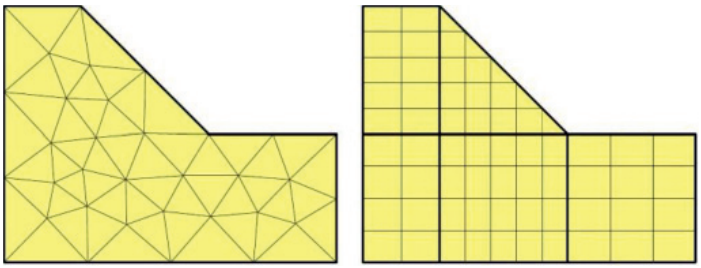
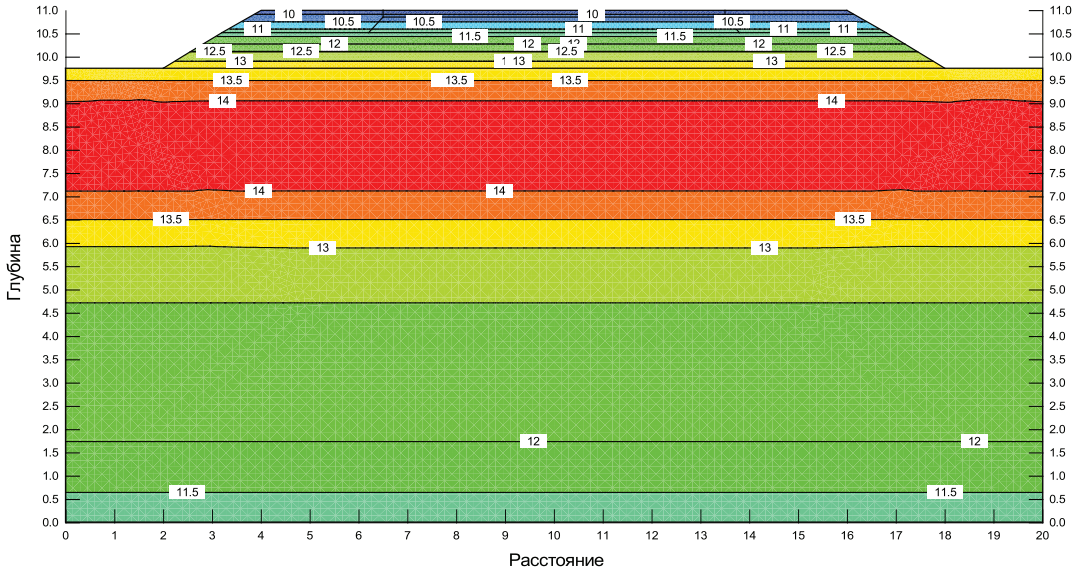
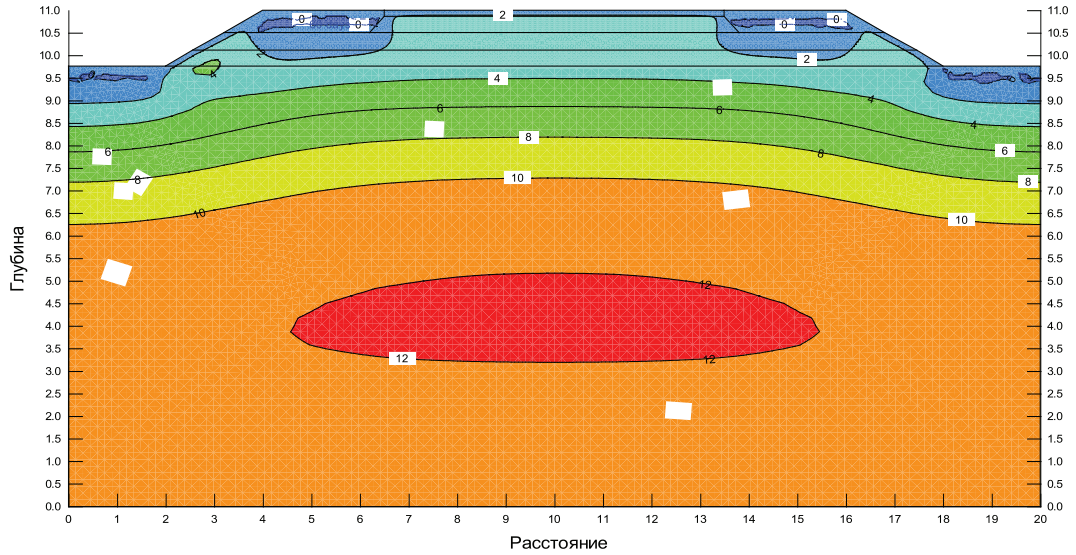


Рис. 6. Разбитые области на структурированные (справа) и неструктурированные ячейки



60 день ($t_{верх}$ = 0,6 град)



90 день ($t_{верх}$ = –11 град)

Рис. 7. Изменение температурного режима дорожной конструкции в период осень – зима

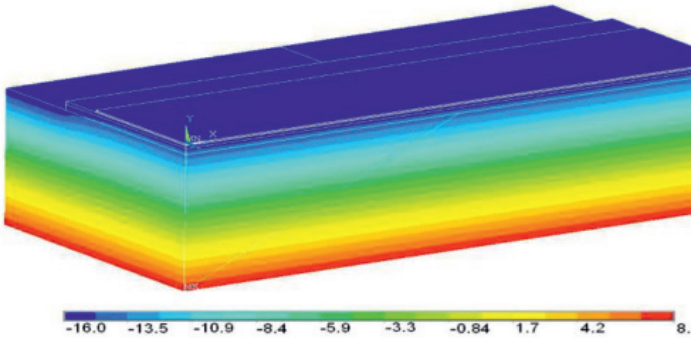


Рис. 8. Распределение поля температуры в расчетной области для зимнего времени

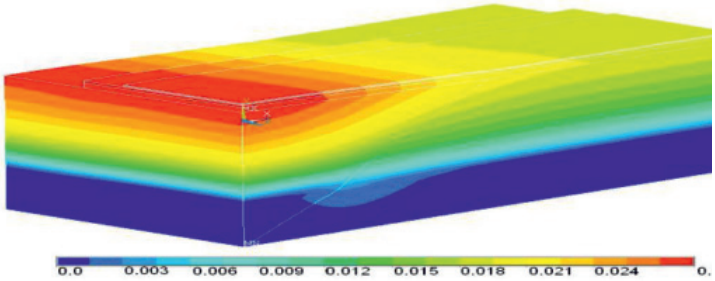


Рис. 9. Распределение поля полного перемещения расчетной области за счет перепада температур и избыточной влажности перемятого грунта в пространстве

Данный программный продукт позволяет использовать следующие виды граничных условий: $t = const$, $Q = const$, $q = const$, $t = f(\tau)$, $Q = f(\tau)$, $q = f(\tau)$, граничные условия климата. При этом граничные условия температуры t и теплового потока Q устанавливаются для конкретного узла модели, плотности теплового потока для конкретной границы ячейки модели.

Граничные условия климата могут быть применены только к поверхностной границе грунтового массива (границе ячеек модели). Климатические условия задаются в виде базы данных, которая включает следующие характеристики климата для каждого периода времени (дня): максимальная и минимальная температура воздуха, максимальная и минимальная влажность воздуха, общее количество осадков за период.

Ниже приведены полученные результаты изменения температуры в слоях дорожной конструкции с применением программного комплекса «GeoStudio/Temp» (рис. 7).

При использовании программного комплекса ANSYS были приняты ряд допущений и упрощений [8]. Область, содержащая основные элементы дороги (рис. 8), рассматривалась в двух состояниях: летний режим соответствует температуре окружающего воздуха + 30 °C;

Зимний режим соответствует температуре окружающего воздуха – 30 °C; это позволяет задавать граничные условия 3-го рода на верхней границе материала (асфальтобетон) и окружающего воздуха:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha \left(T - T_{\text{ср}} \right), \qquad (1)$$

где λ – теплопроводность, n – нормаль к поверхности, α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду с температурой $T_{\text{ср}}$, T – температура на поверхности.

Полученные данные были обработаны на сетке конечных элементов типа SOLID95, содержащих 20 узлов и позволяющих выполнять аппроксимацию искомых полей температуры и перемещений функциями 2-го порядка. Аппроксимация расчетной области потребовала 10000 конечных элементов (5000 сеточных узлов). Ниже приве-

дены результаты вычислительных экспериментов, которые представлены на рис. 8–9.

На рис. 9 отчетливо видно выпучивание части дороги, обусловленное перепадом температуры между летним и зимним режимами и избыточным количеством влаги в перемятом грунте.

Наибольшее значение подъема полотна дороги составляет более 2,8 см над первоначальной плоскостью. Максимальная интенсивность напряжения превышает 810 ГПа и достигается на кромке асфальтобетонного покрытия (выделено красным цветом).

Проведенные исследования позволяют математически объяснить причину образования морозобойных трещин на асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог, выяснить взаимную связь между процессами и определить мероприятия по ликвидации причины образования морозобойной трещины в нулевых отметках автомобильных дорог.

Изменение тепловых свойств в слоях дорожной конструкции автомобильной дороги под действием внешнего энергетического воздействия позволяет сделать вывод о том, что следует рассматривать выемку и насыпь как два различных физических тела, существенно отличающихся друг от друга по своим эксплуатационным свойствам.

Список литературы

1. Корнева И.А., Локощенко М.А. Многолетние изменения температуры грунта на разных глубинах в Москве // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты: тезисы докладов XVI международной школы-конференции молодых учёных, Звенигород, 28 мая – 1 июня 2012 г. – ИФА имени А.М. Обухова РАН, 2012. – С. 93.

2. Корнева И.А., Локощенко М.А. Температура почвы и грунта в Москве и её современные изменения // Метеорология и гидрология. – 2015. – Т. 40, № 1. – С. 38–50.

3. Бургонутдинов А.М., Клевеко В.И. Образование морозобойных трещин на автомобильных дорогах // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании ‘2011: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Одесса: Черноморье, 2011. – т. 3, Вып. 4. – С. 32–39.

4. Бургонутдинов А.М. Обоснование способов строительства и ремонта лесовозных автомобильных дорог, препятствующих образованию трещин (на примере Пермского края): дисс. … канд. техн. наук. – Йошкар-Ола, 2012. – 225 с.

5. Федоров В.И. Процессы влагонакопления и морозоопасность грунтов в строительстве. – Владивосток: ДальНИИС, 1992. – 178 с.

6. Оржеховская Р.Я. Анализ результатов статических испытаний грунтов оснований зданий и сооружений на основе модели упрочняющейся разномодульной среды: Дис. …канд. техн. наук. Свердловск, 1989. – 150 с.

7. Воронкевич С.Д. Физико-химические процессы техногенной эволюции грунтов. / С.Д. Воронкевич, Н.А. Ларионова. – М.: МГУ, 2000.

8. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005.

References

1. Korneva I.A., Lokoshhenko M.A. Mnogoletnie izmenenija temperatury grunta na raznyh glubinah v Moskve // Sostav atmosfery. Atmosfernoe jelektrichestvo. Klimaticheskie jeffekty: tezisy dokladov XVI mezhdunarodnoj shkoly-konferencii molodyh uchjonyh, Zvenigorod, 28 maja 1 ijunja 2012 g. IFA imeni A.M. Obuhova RAN, 2012. pp. 93.

2. Korneva I.A., Lokoshhenko M.A. Temperatura pochvy i grunta v Moskve i ejo sovremennye izmenenija // Meteorologija i gidrologija. 2015. T. 40, no. 1. pp. 38–50.

3. Burgonutdinov A.M., Kleveko V.I. Obrazovanie morozobojnyh treshhin na avtomobilnyh dorogah // Sovremennye problemy i puti ih reshenija v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii 2011: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Odessa: Chernomore, 2011. t. 3, Vyp. 4. pp. 32–39.

4. Burgonutdinov A.M. Obosnovanie sposobov stroitelstva i remonta lesovoznyh avtomobilnyh dorog, prepjatstvujushhih obrazovaniju treshhin (na primere Permskogo kraja): diss. … kand. tehn. nauk. Joshkar-Ola, 2012. 225 p.

5. Fedorov V.I. Processy vlagonakoplenija i morozoopasnost gruntov v stroitelstve. Vladivostok: DalNIIS, 1992. 178 p.

6. Orzhehovskaja R.Ja. Analiz rezultatov staticheskih ispytanij gruntov osnovanij zdanij i sooruzhenij na osnove modeli uprochnjajushhejsja raznomodulnoj sredy: Dis. …kand. tehn. nauk. Sverdlovsk, 1989. 150 p.

7. Voronkevich S.D. Fiziko-himicheskie processy tehnogennoj jevoljucii gruntov. / S.D. Voronkevich, N.A. Larionova. M.: MGU, 2000.

8. Basov K.A. ANSYS: spravochnik polzovatelja. M.: DMK Press, 2005.