

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТРАНСПОРТНЫХ НАГРУЗОК НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Асн. МЕЛЬНИКОВА И. С.

Белорусский национальный технический университет

Автомобильная дорога представляет собой комплекс инженерных сооружений и устройств, предназначенных для обеспечения непрерывного и безопасного перемещения транспортных средств. Конструирование и расчет дорожных одежд – слоистых конструкций, укладываемых на земляное полотно в пределах проезжей части, – являются наиболее трудоемкими процессами на стадии проектирования дорог. Конструкции дорожной одежды принимаются различными в зависимости от категории будущей дороги, типа местности по увлажнению, вида подстилающего грунта и других факторов. Однако даже самый полный учет всех факторов при проектировании не позволяет предотвратить возникновение и развитие повреждений слоев конструкции на стадии ее эксплуатации.

Согласно анализу статистических данных, по результатам ежегодной диагностики магистралей Республики Беларусь, проводимой РУП «Белорусский дорожный инженерно-технический центр», установлено, что 59 % от всех возникающих на поверхности покрытий повреждений и разрушений составляют трещины (одиночные, частые, сетка трещин), различные по своей природе, размерам, расположению относительно оси автомобильной дороги. В связи с этим проблема повышения трещиностойкости дорожных покрытий является одной из наиболее актуальных.

В работах многих белорусских и зарубежных ученых – В. А. Веренько, В. Н. Яромко, А. М. Богуславского, Л. Б. Гезенцвея, Н. В. Горельшева, В. Д. Казарновского, Б. С. Радовского, Д. Соуза, П. Пэриса, К. Моносмита, Р. Литтона – называются различные причины возникновения трещин в дорожных асфальтобетонных

покрытиях [1–5]. Основными же факторами, способствующими образованию трещин, можно считать нагрузки от транспортных средств и влияние погодных-климатических воздействий, особенно температуры окружающего воздуха. При действии колесной нагрузки в результате работы покрытия на изгиб максимальные растягивающие напряжения возникают в нижней зоне слоя покрытия, а при переходе колеса с одного края трещины на другой при вертикальном сдвиге нижнего трещиноватого слоя возникает вероятность появления отраженных трещин в верхнем слое покрытия. Частый переход температуры воздуха через 0 °С, низкие отрицательные температуры вызывают растяжение асфальтобетонных слоев от несвободного сжатия при охлаждении, изгиб, коробление нижних слоев покрытия [6, 7].

Трещины могут как появляться непосредственно на поверхности покрытия, так и отражаться, прорасти из нижних зон слоя покрытия. Эти процессы целесообразно рассматривать путем физико-математического моделирования работы слоев дорожного покрытия с применением метода конечных элементов (МРЭ) в качестве расчетного метода при определении температур, перемещений, деформаций и напряжений вследствие воздействия температуры и транспортной нагрузки.

В статье рассмотрена модель дорожной одежды в системе аналитического проектирования SolidWorks, задачи статики в линейной постановке решены посредством пакета конечно-элементного анализа CosmosWorks. Программное обеспечение основывается на использовании МКЭ – численного метода анализа технических конструкций. МКЭ может быть

принят в качестве стандартного благодаря его универсальности и пригодности для работы на компьютерах [8]. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при решении ряда сложных прикладных задач. Являясь синтезом вариационных и сеточных методов, МКЭ обладает прищими ему преимуществами [9].

С математической точки зрения МКЭ является одним из численных методов решения систем дифференциальных уравнений. Исследуемая модель – область изменения функций (перемещений, деформаций, напряжений) – разбивается на большое число малых частей простых форм, называемых элементами, эффективно заменяющими сложную задачу несколькими простыми, которые необходимо решить совместно. В зависимости от решаемой задачи конечные элементы могут быть линейными, плоскими или объемными и иметь различную форму: прямоугольную, треугольную в плоской задаче теории упругости или форму тетраэдра, гексаэдра в трехмерной задаче. Конечные элементы связывают между собой лишь определенным числом связей в отдельных точках, называемых узлами (рис. 1а). Число связей конечного элемента с окружающей областью называют числом степеней свободы, характеризующим возможность изменения искомой величины в узловой точке и в определенном направлении. Процесс деления модели на малые части называется созданием сетки (рис. 1б).

Поведение каждого элемента по всем возможным сценариям опоры и нагрузки хорошо известно. Реакция в любой точке элемента интерполируется из реакции узлов элементов. Каждый узел полностью описывается рядом параметров, зависящих от типа анализа и используемого элемента. Например, температура узла

полностью описывает его реакцию в термическом анализе (исследовании теплового потока и распределения температуры, обусловленных проводимостью, конвекцией и излучением).

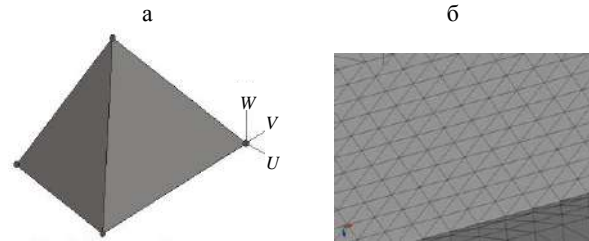


Рис. 1. К описанию сущности метода конечных элементов: а – пространственный тетраэдральный конечный элемент с четырьмя узлами в вершинах; б – конечно-элементная сетка

Для расчетов конструкции реакция узла представляется в целом тремя перемещениями и тремя вращениями (степени свободы, рис. 1а). Программное обеспечение разрабатывает уравнение, управляющее поведением каждого элемента, учитывая его соединения с другими элементами. Эти уравнения связывают реакцию с известными свойствами материала, ограничениями и нагрузками. Далее программа упорядочивает уравнения в большую систему совместных алгебраических уравнений и находит неизвестные (перемещения узловых точек). К примеру, для расчета напряжений решающая программа находит перемещения в каждом узле, а затем вычисляет деформации и конечное напряжение.

Геометрическая модель моделируемой дорожной одежды насчитывает пять слоев: два слоя асфальтобетона, слой щебня, слой песка средней крупности и слой суглинка (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические характеристики слоев дорожной одежды

Наименование слоя	Толщина слоя, м	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Асфальтобетон плотный мелкозернистый на битуме БНД 60/90	0,04	2100	3200	0,30	0,90
Асфальтобетон пористый на битуме БНД 90/130	0,08	2100	1400	0,25	1,40
Щебень фракционированный	0,30	1800	400	0,25	0,11
Песок средней крупности	0,40	1950	120	0,25	0,35
Суглинок тяжелый	0,80	2000	50	0,25	0,81

Для асфальтобетона при расчетах учитывались зависимости его модуля упругости, пределов прочности на сжатие и растяжение от температуры (рис. 2) [10–12].

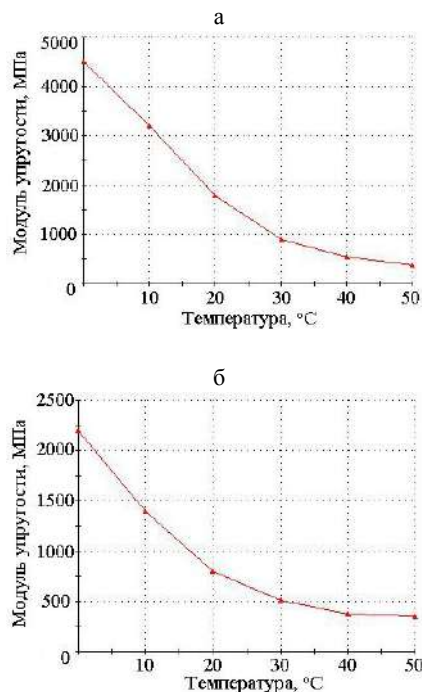


Рис. 2. Зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры: а – для плотного асфальтобетона; б – для пористого асфальтобетона

Подходы к решению данных задач методом конечных элементов были предложены как многими зарубежными, так и белорусскими учеными [13, 14]. Автор статьи предлагает рассматривать влияние нагрузок на распределение температуры и напряжений в слоях дорожной одежды с точки зрения вероятности появления и развития температурных и отраженных трещин в слоях дорожного покрытия.

На начальном этапе с целью проверки адекватности модели дорожной одежды моделировалось воздействие на конструкцию (рис. 3) температурной нагрузки и нагрузки от действия транспортных средств. Модель изучена в трех случаях при воздействии на покрытие:

- 1) температуры воздуха (линейное исследование);
- 2) колесной нагрузки (линейное исследование);
- 3) температуры воздуха и колесной нагрузки.

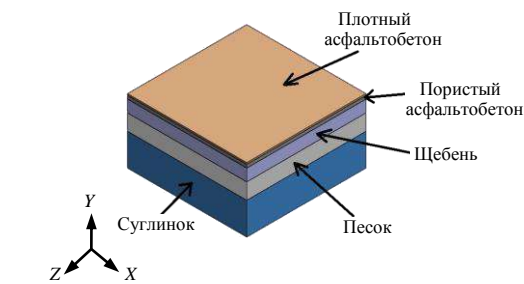


Рис. 3. Моделируемая конструкция дорожной одежды

Далее решалась задача определения полей распределения температур, деформаций, перемещений и напряжений при воздействии температуры и транспортной нагрузки на дорожную конструкцию при наличии трещин в верхней зоне слоя износа (слоя из плотного асфальтобетона). Ширина раскрытия и глубина трещин варьировались соответственно от 2,0 мм до 2,0 см и от 1,0 до 2,5 см. Рассматривалось напряженно-деформированное состояние конструкций также в трех случаях при воздействии:

- 1) температуры;
- 2) транспортной нагрузки;
- 3) одновременно нагрузок от температуры и транспорта.

Полный перечень исследуемых моделей конструкций:

- 1) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещины в слоях покрытия отсутствуют; приложенная нагрузка – температурная, температура верха покрытия (–11) °C;
- 2) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 2 мм и глубиной 1 см; приложенная нагрузка – температурная, температура верха покрытия (–11) °C;
- 3) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 1 см и глубиной 2 см; приложенная нагрузка – температурная, температура верха покрытия (–11) °C;
- 4) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 2,0 см и глубиной 2,5 см; приложенная нагрузка – температурная, температура верха покрытия (–11) °C;
- 5) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1, трещины в слоях покрытия отсутствуют; приложенная нагрузка – от транс-

порт-

ного средства; распределенная сила 2875 кН;

6) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 2 мм и глубиной 1 см; приложенная нагрузка – от транспортного средства; распределенная сила 2875 кН;

7) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 1 см и глубиной 2 см; приложенная нагрузка – от транспортного средства; распределенная сила 2875 кН;

8) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 2,0 см и глубиной 2,5 см; приложенная нагрузка – от транспортного средства; распределенная сила 2875 кН;

9) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещины в слоях покрытия отсутствуют; приложенные нагрузки – температурная и транспортная; значения такие же, как в случаях 1–8;

10) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 2 мм и глубиной 1 см; приложенные нагрузки – температурная и транспортная; значения такие же, как в случаях 1–8;

11) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 1 см и глубиной 2 см; приложенные нагрузки – температурная и транспортная; значения такие же, как в случаях 1–8;

12) пятислойная конструкция дорожной одежды по табл. 1; трещина в верхнем слое асфальтобетона шириной раскрытия 2,0 см и глубиной 2,5 см; приложенные нагрузки – температурная и транспортная; значения такие же, как в случаях 1–8.

Поставленные задачи решены на основании фактических данных о суточных изменениях температуры на метеорологических станциях г. Минска, предоставленных ГУ «Республиканский гидрометеорологический центр». При составлении модели для оценки воздействий транспортной нагрузки на дорожное покрытие рассматривалось действие двухскатного колеса

тяжелого грузового автомобиля КамАЗ-65117 с нагрузкой на заднюю наиболее загруженную ось 115 кН. С целью сокращения времени, затрачиваемого на решение, моделировался отпечаток одного колеса из четырех.

Для оценки напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции принята температура в зимние, наиболее холодные месяцы года. Это связано с особенностями свойств асфальтобетона как вязко-пластичного материала при высоких положительных температурах и упругого материала при низких отрицательных. В летний период высоких температур воздуха поверхность асфальтобетонных покрытий нагревается в условиях Республики Беларусь до 50–60 °С, превышающих температуру плавления битума, что приводит к размягчению асфальтобетона и образованию волн, наплывов, колеи. Образование же трещин температурного характера и проявление в верхних слоях покрытия отраженных трещин связаны прежде всего с явлением расширения – сжатия покрытия при охлаждении в зимний период [1, 15].

Далее подробно рассмотрим начальные условия для построения физико-математической модели и полученные результаты моделирования.

Конструкции дорожной одежды 1–12 при составлении моделей нагружались неодинаково: как указано выше, рассматривались три случая нагружения – воздействие температуры, транспорта и их совместное действие.

1. Моделирование воздействия на дорожную конструкцию температуры воздуха. При оценке влияния температуры воздуха на температуру в слоях покрытия и температурных напряжений в качестве начальных условий было выбрано: регион – г. Минск: 53,89 град. с. ш.; время года – зима, январь; температура воздуха (–15,6) °С. Температура на поверхности покрытия составила (–11,1) °С в соответствии с формулой Я. Н. Ковалева [16]

$$T_{\text{п}} = 0,71T_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура покрытия; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха.

Полученные результаты моделирования воздействия отрицательной температуры на конст-

рукцию представлены в табл. 2. Для оценки адекватности полученных температурных полей распределению в асфальтобетонных слоях дорожной одежды температуры были рассчитаны аналитически в соответствии с формулой [17]

$$T_z = T_n \exp(-7,727z), \quad (2)$$

где T_z – температура покрытия, °С, на глубине z , м.

Сравнительный анализ полученных результатов представлен в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение данных расчета температуры асфальтобетона по [17] и МКЭ

Глубина, см	Температура покрытия, °С	
	по формуле (2)	по МКЭ
0	-11,1	-11,1
1	-10,3	-10,3
2	-9,5	-9,5
3	-8,8	-8,7
4	-8,1	-7,9
5	-7,5	-7,3
6	-7,0	-6,8
7	-6,4	-6,3
8	-6,0	-5,8
9	-5,5	-5,3
10	-5,1	-4,5
11	-4,7	-4,2
12	-4,4	-3,7

Поле температурных напряжений при воздействии на конструкцию дорожной одежды отрицательной температуры воздуха (-15,6) °С отображено на рис. 4а. Верхняя часть слоя износа (около 1,5 см) представлена зоной растягивающих напряжений, достигающих 3,0 МПа при пределе прочности на растяжение плотного асфальтобетона не менее 6,8 МПа при температуре (-10) °С. Превышение предела прочности может произойти при охлаждении покрытия в условиях более низких отрицательных температур, что, в свою очередь, означает неизбежное возникновение трещин в верхней части слоя износа. Максимальные сжимающие напряжения сосредоточены в зоне контакта асфальтобетонных слоев. Однако, учитывая уве-

личение предела прочности асфальтобетона на сжатие с понижением температуры, это явление не опасно с точки зрения трещинообразования.

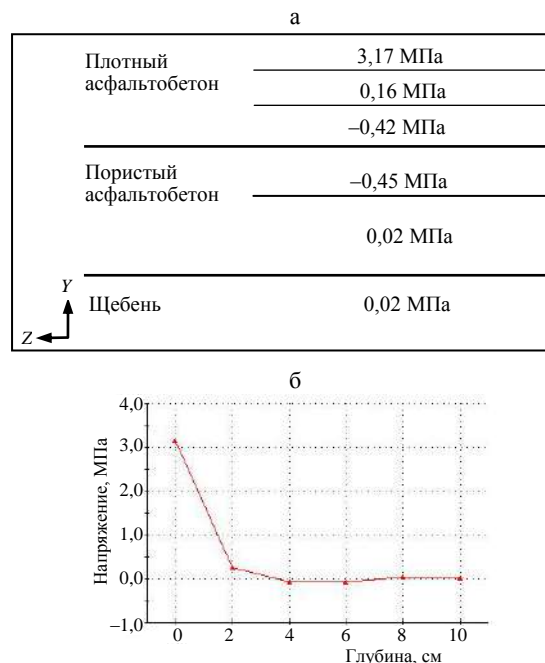


Рис. 4. Результаты моделирования для асфальтобетонных слоев покрытия: а – поле температурных напряжений в горизонтальной плоскости (средние значения по зонам); б – распределение температурных напряжений с глубиной при установившейся температуре поверхности покрытия (-25) °С

Сравнивая значения максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, получим: с понижением температуры поверхности покрытия от (-11) до (-20) °С величина растягивающих напряжений увеличивается в два раза (составляет более 6 МПа), сжимающих – в два раза (составляет около 2 МПа); с изменением температуры ниже (-30) °С величина растягивающих напряжений увеличивается в 2,5 раза (составляет более 8 МПа), сжимающих – в 2,5 раза (составляет более 2 МПа). Максимальные растягивающие напряжения сосредоточены в 1,5 см верхней зоны слоя износа (плотный асфальтобетон), максимальные сжимающие напряжения – в зоне между двумя слоями асфальтобетона. Следовательно, наибольшая вероятность нарушения сплошности асфальтобетонного слоя, возникновения трещин температурного характера наблюдается непосредственно на самой поверхности слоя износа и при значительном понижении температур (ниже (-30) °С).

Полученные при моделировании и расчете методом конечных элементов величины максимальных температурных напряжений в значительной степени соответствуют температурным напряжениям при охлаждении покрытия, опубликованным в [18] и рассчитанным по формуле

$$\sigma_t = \frac{(\alpha_n - \alpha_o)(t_t - t_o)E v_{\max}}{(1 - \mu)v_0} K_r, \quad (3)$$

где σ_t – температурное напряжение, возникающее в покрытии при охлаждении; $(\alpha_n - \alpha_o)$ – разность коэффициентов линейного расширения покрытия и основания в интервале температур $(t_t - t_o)$; E – модуль упругости асфальтобетона при 0 °С; v_{\max} – максимальная скорость охлаждения воздуха, наблюдаемая в данной местности при снижении температуры не менее чем на 5 °С; v_0 – равновесная скорость охлаждения; μ – коэффициент поперечного расширения асфальтобетона; K_r – коэффициент запаса прочности.

Значения максимальных температурных напряжений по [18] при 0 °С варьируются от 0,87 до 2,18 МПа в зависимости от состава асфальтобетона. Рассчитанные по МКЭ максимальные температурные напряжения при 0 °С различаются от 1,1 до 2,3 МПа. Результаты моделирования воздействия температуры на слои дорожной одежды можно считать адекватными.

2. Моделирование воздействия на дорожную конструкцию транспортной нагрузки. При оценке воздействий колесной нагрузки на дорожное покрытие рассматривалось действие двухскатного колеса тяжелого грузового автомобиля КамАЗ-65117 с нагрузкой на заднюю наиболее загруженную ось 115 кН. Моделировался отпечаток одного колеса размером 285×230 мм, нагрузка на колесо – в виде распределенной силы 2875 кН (четверть нагрузки на ось, так как у автобуса данной модели двухскатные колеса).

Эпюра напряжений для рассматриваемых моделей представлена на рис. 5а, как и распределение температурных напряжений от глубины слоев. Эпюры во всех случаях приложения транспортной нагрузки имеют следующий общий вид: зону максимальных сжимающих напряжений на участке приложения нагрузки (до -1,25 МПа), две симметрично расположен-

ные зоны растягивающих напряжений и зону максимальных растягивающих напряжений на границе основного слоя покрытия (пористый асфальтобетон) и слоя щебня (0,24 МПа).

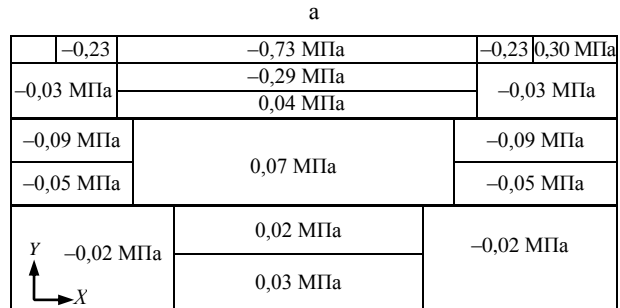


Рис. 5. Результаты моделирования для асфальтобетонных слоев покрытия: а – поле напряжений от действия транспортной нагрузки (жирной линией отмечены границы слоев, сверху вниз – плотный асфальтобетон, пористый асфальтобетон, щебень); б – распределение температурных напряжений с глубиной при действии транспортной нагрузки

3. Моделирование совместного воздействия температуры воздуха и колесной нагрузки. К исследуемой дорожной конструкции были приложены воздействия отрицательной температуры и колесной нагрузки от транспортного средства КамАЗ-65117 с нагрузкой на заднюю наиболее загруженную ось 115 кН.

Результаты расчета напряжений, возникающих в слоях конструкции, и прогибов сведены в табл. 3, перечень моделей представлен выше. В первой части табл. 3 отражены результаты расчета температурных напряжений для моделей конструкций 1–4. Вторая часть табл. 3 представляет полученные результаты при приложении транспортной нагрузки в случаях 5–8. В третью часть табл. 3 сведены значения максимальных напряжений и прогибов в случае воздействия температуры и транспортной нагрузки для моделей 9–12.

Распределение напряжений при совместном действии температуры и транспортной нагрузки на конструкцию дорожной одежды при отсутствии трещин в слое износа в зависимости от глубины представлено на рис. 6.

Таблица 3

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния дорожной одежды

Номер модели	Слой	Напряжение, МПа		Прогиб, м
		Максимальное сжимающее	Максимальное растягивающее	
1. Под воздействием температуры (плотный асфальтобетон – слой 1, пористый асфальтобетон – слой 2)				
1	1	-0,9769	3,5655	-
	2	-0,9769	0,0828	
2	1	-0,9403	3,4458	-
	2	-0,0286	0,4582	
3	1	-1,2348	3,6466	-
	2	-0,1517	0,8951	
4	1	-0,8592	3,4510	-
	2	-0,3371	0,8580	
2. Под воздействием транспортной нагрузки				
5	1	-0,9942	0,2837	0,0004194
	2	-0,9480	0,2300	
6	1	-0,9599	0,3130	0,0003885
	2	-0,8787	0,1682	
7	1	-0,8923	0,2595	0,0003705
	2	-0,7641	0,1877	
8	1	-0,9214	0,3196	0,0004319
	2	-0,6961	0,1736	
3. Под воздействием температуры и транспортной нагрузки				
9	1	-1,3318	4,4191	0,0003381
	2	-1,3318	0,8774	
	1	-2,4707	5,1406	

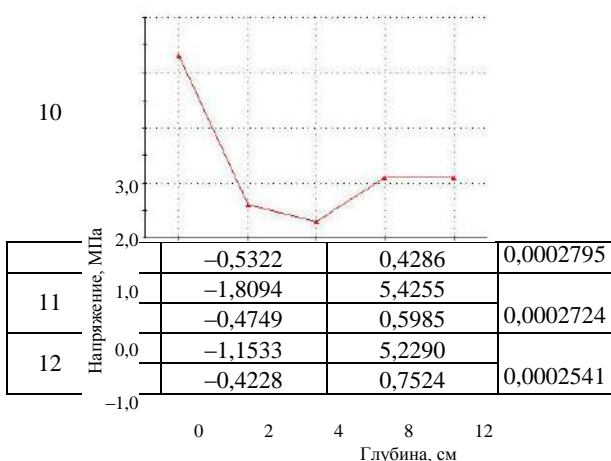


Рис. 6. Распределение напряжений при одновременном действии транспортной нагрузки и температуры

При воздействии температуры на исследуемые конструкции дорожной одежды во всех

четырех случаях значения максимальных растягивающих и сжимающих напряжений зафиксированы в пределах от 3,45 до 3,65 МПа. Такая же разница в значениях в 0,2 МПа наблюдается при оценке воздействий лишь транспортной нагрузки. Однако во втором случае, в отличие от первого, в слое износа наиболее значимыми являются сжимающие напряжения, особенно в верхней зоне, превосходящие максимальные растягивающие в 3–4 раза. При воздействии температуры же, наоборот, растягивающие напряжения, возникающие также в верхней зоне слоя износа, превосходят в значениях сжимающие в 3–4 раза. Кроме того, сравнивая значения максимальных напряжений в обоих случаях приложения нагрузок, отметим, что растягивающие напряжения от транспорта в асфальтобетонном слое износа в 11–13 раз превышают аналогичные от действия температурной нагрузки.

При одновременном действии транспорта и температуры на дорожную конструкцию без трещин на поверхности или уже с ними несколько возрастают максимумы сжимающих напряжений в верхней зоне слоя износа, величины растягивающих напряжений также в 1,5 раза больше напряжений при действии лишь только температуры. Максимальные прогибы дорожной одежды зафиксированы при действии транспортной нагрузки. Однако их значения близки как для конструкции с трещиной в верхней зоне слоя износа шириной раскрытия 2,0 см и глубиной 2,5 см, так и для конструкции без нарушений сплошности верхнего слоя.

Следует также отметить, что на эпюрах температурных напряжений прослеживаются «зоны действия» трещин – некоторые области в горизонтальной плоскости по обе стороны от оси трещины, в пределах которых наблюдаются зоны более низких растягивающих напряжений (рис. 7). Размеры этих зон для различных моделей установлены следующие: 1) при наличии трещины в верхней части слоя износа шириной раскрытия 2 мм и глубиной 1 см – 4,1 см в каждую сторону от оси симметрии трещины при приложении температурной нагрузки; 2) при наличии трещины в верхней части слоя износа шириной раскрытия 1 см и глубиной 2 см – 5 см в каждую сторону от оси симметрии трещины; 3) при наличии трещины в верхней части слоя износа шириной раскрытия 2,0 см и глубиной 2,5 см – 5,9 см в каждую сторону от оси симметрии трещины. На размеры этих зон

и распределение напряжений также влияет степень разрушения кромок трещин.

Результаты проведенного исследования позволяют получить более четкое представление о физических процессах, происходящих в дорожной конструкции при ее нагружении. Несответствие полученных в ходе расчетов значений напряжений и пределов прочности слоев конструкции на растяжение или сжатие позволяет обнаружить зоны нарушения прочности при моделировании уже существующей автомобильной дороги в определенных условиях нагружения.

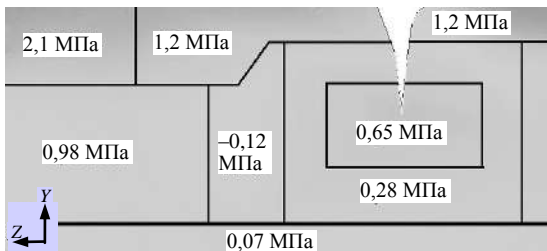


Рис. 7. Поле напряжений вблизи трещины шириной раскрытия 2 см и глубиной 2 см под воздействием температуры

Регулирование физических свойств и прочностных характеристик слоев дорожной одежды, их толщины в процессе решения задач методом конечных элементов позволяет еще на стадии проектирования автомобильной дороги оценить прочность всей конструкции. Использование данного подхода при необходимости усиления слоя дает возможность сделать это более обоснованно, правильно, в соответствии со всеми требованиями.

ВЫВОДЫ

На основании изложенных выше результатов теоретических и экспериментально-аналитических исследований можно сделать следующие выводы.

1. Процесс образования трещин в асфальтобетонных покрытиях является достаточно сложным и связан с характером и величиной внешних транспортных нагрузок, температурным режимом воздуха, структурой и свойствами дорожной конструкции. Для раскрытия закономерностей этого процесса целесообразно использовать физико-математическое моделирование, в том числе метод конечных элементов. Применение данного метода позволяет в короткие сроки с помощью компьютера решать термические и статические задачи, задачи линейной динамики и др.

Это дает возможность проверять конструкции на прочность, подбирать физико-механические свойства слоев конструкции, их толщины в соответствии с прикладываемыми транспортными и температурными нагрузками.

2. Задача оценки конструкции дорожной одежды на вероятность образования и развитие трещин в асфальтобетонных слоях под действием транспортной и температурной нагрузок решена в объемной постановке. В результате получены общий вид моделей, деформированных под воздействием температуры и транспортной нагрузки, эпюры распределения в них напряжений.

3. Моделирование напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции под воздействием отдельно температуры и транспортной нагрузки и их совместным воздействием позволило установить численные значения напряжений сжатия и растяжения и прогибов конструктивных слоев. Они варьируются в некоторых пределах, и эти вариации приведены в табл. 3 и на рис. 5, 6.

4. Проведенные исследования подтвердили гипотезу о том, что в целях увеличения прочности материала покрытия на растяжение целесообразно устраивать армирующую прослойку из геосинтетических или других материалов в нижней зоне асфальтобетонных слоев. Это связано с тем, что, несмотря на большие величины растягивающих напряжений в верхней части слоя износа при действии температуры, одновременное воздействие с ней транспортной нагрузки приводит к возникновению в той же зоне максимальных сжимающих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веренько, В. А. Деформации и разрушения дорожных покрытий: причины и пути устранения / В. А. Веренько. – Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2008. – 304 с.
2. Яромко, В. Н. К вопросу определения трещиностойкости асфальтобетона / В. Н. Яромко, И. Л. Жайлович // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 4. – С. 22–25.
3. Богуславский, А. М. Оценка сдвигоустойчивости и трещинообразования асфальтобетонных покрытий / А. М. Богуславский // Автомобильные дороги. – 1973. – № 9. – С. 10–12.
4. Гезенцев, Л. Б. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцев. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
5. Sousa, J. An Approach for investigating Reflective Fatigue Cracking in Asphalt-Aggregate Overlays / J. Sousa, S. Shatwai, J. Cox // Reflective Cracking in Pavements. Pro-

ceedings of the Third International RILEM Conference. – 1996. – P. 103–112.

6. **Прочность** и долговечность асфальтобетона / под ред. Б. И. Ладыгина. – Минск: Наука и техника, 1972. – 187 с.

7. **Mukhtar, M.** Interlayer Stress Absorbing Composite (ISAC) for Mitigating Reflection Cracking in Asphalt Concrete Overlays, Project IHR-533, Report No. UILU-ENG-96-2006, Illinois Cooperative Highway Research Program, Illinois Department of Transportation / M. Mukhtar, B. Dempsey. – 1996.

8. **Алямовский, А. А.** SolidWorks/COSMOSWorks: Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.

9. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование поведения технологических систем на стадии их проектирования / А. А. Жолобов, В. А. Попковский, Д. В. Попковский. – Могилев: МГТУ, 2000. – 150 с.

10. **Руденский, А. В.** Повышение трещиностойкости асфальтобетонных покрытий / А. В. Руденский, А. С. Рыльков // Дороги и мосты. – 2007. – № 18 (2). – С. 214–223.

11. **Телтаев, Б. Б.** Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов / Б. Б. Телтаев // Дорожная техника. – 2010. – С. 130–137.

12. **Богуславский, А. М.** Асфальтобетонные покрытия / А. М. Богуславский, Л. Г. Ефремов. – М.: МАДИ, 1981. – 145 с.

13. **Макаревич, А. А.** Восстановление дорожных одежд улиц способом холодной регенерации на месте: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / А. А. Макаревич. – Минск, 2010. – 181 с.

14. **Reflective** and Thermal Cracking Modeling of Asphalt Concrete Overlays / E. V. Dave [et al.] // International Conference of Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials. – 2007. – Vol. 1. – P. 1241–1252.

15. **Бонченко, Г. А.** Асфальтобетон: сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером / Г. А. Бонченко. – М.: Машиностроение, 1994. – 176 с.

16. **Ковалев, Я. Н.** К вопросу определения зимней расчетной температуры асфальтобетонных покрытий / Я. Н. Ковалев, В. Д. Акельев // Известия вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1966. – № 5. – С. 145–147.

17. **Ковалев, Я. Н.** Активационно-технологическая механика дорожного асфальтобетона / Я. Н. Ковалев. – Минск: Вышэйш. шк., 1990. – 180 с.

18. **Кравченко, С. Е.** Низкотемпературные напряжения как критерий влияния компонентов асфальтобетонной смеси на трещиностойкость асфальтобетонных покрытий / С. Е. Кравченко, Д. Л. Сериков // Автомобильные дороги и мосты. – 2010. – № 2 (6). – С. 70–77.

Поступила 29.12.2011