РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Научная статья

УДК 625.84
EDN: ESGKYD

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОРОБЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Вадим Александрович Максимов[1]✉
Виктор Васильевич Ушаков[2]

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
ФАУ «РОСДОРНИИ, Москва, Россия
[1]Maksimov.Vadim.007@yandex.ru✉,
ORCID:0009-0000-1881-6639, SPIN-код: 3498-3242
[2]v.ushakov@madi.ru, SPIN-код: 9015-1817, Author ID: 705441

Аннотация: *В статье рассмотрены основные преимущества цементобетонных покрытий автомобильных дорог, благодаря которым они получили широкое распространение в ряде экономически развитых стран мира. Обосновано влияние температурного коробления на напряженно-деформационное состояние (НДС) цементобетонных покрытий. Рассмотрены основные факторы появления коробления бетонных плит. Проведен анализ влияния температурного режима цементобетонных покрытий на их НДС. Авторами показано, от каких факторов возникают наибольшие напряжения в дорожной бетонной плите. Представлены формулы и эмпирические зависимости для определения напряжений растяжения и сжатия. Кроме того, приводятся особенности температурного режима системы «покрытие – основание». Проведен анализ существующих способов определения температурных напряжений цементобетонных плит. В завершении сделаны выводы и даны соответствующие рекомендации.*

Ключевые слова: *автомобильные дороги, цементобетонные покрытия, температурное коробление, температурное напряжение.*

Для цитирования: Максимов В.А., Ушаков В.В. Влияние температурного коробления на напряженно-деформированное состояние цементобетонных покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2024. № 52/2. С. 151-168.

ROAD REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

INFLUENCE OF TEMPERATURE WARPING ON THE STRESS-STRAIN STATE OF CEMENT CONCRETE ROAD PAVEMENTS

Vadim A. Maksimov[1]✉
Viktor V. Ushakov[2]

[1,2]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
[2]FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia
[1]Maksimov.Vadim.007@yandex.ru✉,
ORCID:0009-0000-1881-6639, SPIN-код: 3498-3242
[2]v.ushakov@madi.ru, SPIN-код: 9015-1817, Author ID: 705441

Abstract: *The article provides the main advantages of cement concrete pavements due to which they have become widespread in a number of the world's advanced economies. The influence of temperature warping on the stress-strain state of cement concrete road pavements is justified. The main factors of concrete slab warpage occurrence are considered. The analysis of the influence of temperature regime of cement concrete pavements on their stressed state is carried out. The authors show which factors cause the greatest stresses in the road concrete slab. Formulas and empirical dependencies for determining tensile and compressive stresses are presented. Also, based on experimental studies, the peculiarities of the temperature regime of the «pavement – base» system are reviewed. An analysis of existing methods for determining the temperature stresses of cement concrete slabs is done. Finally, conclusions are drawn and appropriate recommendations are given.*

Keywords: *roads, cement concrete pavements, thermal warping, temperature stress.*

For citation: Maksimov V.A., Ushakov V.V. Influence of temperature warping on the stress-strain state of cement concrete road pavements // Roads and Bridges. 2024; (52/2): 151-168 (In Russ.).

Применение цементобетонных покрытий в дорожном строительстве началось в конце XIX века. Так, например, в Великобритании первая бетонная дорога была построена в 1865 г., в США – в 1884 г. (штат Огайо), а систематическое строительство нового типа дорог началось только с 1909 г. В Америке все внимание было сосредоточено на вопросах механизации строительства, а основной задачей стала замена в кратчайшие сроки слабых дорожных одежд прочным бетонным покрытием. С 1914-1915 гг. строительство дорог началось и в доминионах Британской империи – Канаде, Австралии и Новой Зеландии **[1]**.

В СССР в 1935 г. были построены опытные участки с цементобетонными покрытиями. В послевоенный период стала активно развиваться теория и практика цементобетонного дорожного строительства.

Вместе с тем, в последние годы в отечественной дорожной отрасли у многих сформировалось ошибочное мнение о нецелесообразности строительства автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями. К возможным причинам можно отнести сложность соблюдения требований технологии строительства, длительность набора прочности, высокие затраты на этапе строительства и т.д.

Таким образом, в дальнейшем, предпочтения при проектировании автомобильных дорог отдавались дорожным конструкциям с асфальтобетонным типом покрытия, аргументируя это большей экономичностью и меньшей трудоемкостью строительства, ремонта и реконструкции. Еще с 1980-х годов в стране стало сокращаться строительство дорожных цементобетонных покрытий, уменьшился выпуск машин и механизмов для укладки цементобетона, снизилось количество научных исследований в данной сфере. Соответственно, нормативная документация не обновлялась более 30 лет. За рубежом в то время, напротив, продолжали разработку соответствующих машин и механизмов, научные исследования в области применения высокоэффективных бетонов в

дорожном строительстве. В итоге были разработаны принципиально новые технологии строительства цементобетонных покрытий – эффективные укладчики со скользящими формами, оснащенные системами автоматизированной укладки и армирования цементобетонных покрытий, механизмами для отделки поверхности и уходом за уложенным покрытием в автоматизированном режиме и пр. **[2]**.

Одним из важнейших направлений технического прогресса в области дорожного хозяйства является повышение долговечности дорожных покрытий. За рубежом ставится задача по обеспечению потребительских свойств дорожных покрытий на срок более 50 лет. В России также утверждено Постановление Правительства РФ от 30 мая 2017 г. № 658, в соответствии с которым увеличиваются межремонтные сроки для автомобильных дорог федерального значения до 24 лет. Мировой опыт свидетельствует о том, что покрытия из цементобетона имеют больший срок службы, по сравнению с асфальтобетонными покрытиями. Для обеспечения длительных периодов работы дорожных конструкций необходимы более совершенные методики проектирования жестких дорожных одежд, в отличие от используемых в настоящее время.

В Европе сформировано содружество исследователей дорожной сферы из 11 стран – ELLPAG (European Long-life Pavement Group), которое направлено на изучение автомобильных дорог с длительным сроком службы. Расчеты содружества показывают, что для участка автомобильной дороги в 10 000 км с интенсивным движением при использовании Long-life pavement (англ. – долговечные дорожные покрытия), можно сэкономить более 300 млн евро. В США миллионы долларов направлены на изучение различных направлений совершенствования технологий устройства автомобильных дорог с цементобетонным покрытием и повышение их срока службы.

Следует обратить внимание на основные преимущества, благодаря которым цементобетонные покрытия стали широкого использоваться в ряде экономически развитых стран мира:

- независимость прочностных свойств цементобетона от температурных условий эксплуатации;
- невозможность возникновения пластичной колеи;
- обеспечение лучшей ориентации водителей в темное время суток благодаря светлой поверхности покрытия, что также позволяет сократить затраты на освещение;

- постоянство коэффициента сцепления покрытия с шинами автомобилей;
- значительно более высокие показатели прочности и жесткости по сравнению с асфальтобетоном;
- цементобетон – единственный строительный материал, набирающий прочность на протяжении всего срока службы;
- долгий срок службы покрытия до капитального ремонта (до 50 лет и более).

Последнее из перечисленного особенно актуально, учитывая Постановление Правительства РФ от 30 мая 2017 г. № 658 **[3]**, в котором отмечено вдвое увеличение межремонтных сроков для автомобильных дорог федерального значения. При возникшей необходимости обеспечивать такой длительный срок службы покрытий и дорожных одежд в целом, главным решением, несомненно, будет развитие и масштабное применение технологии устройства жестких дорожных одежд с цементобетонным поверхностным слоем на федеральных автомобильных дорогах.

Цементобетонные покрытия работают в условиях периодического динамического нагружения различными типами автомобилей и воздействия окружающей среды, что создает сложное напряженно-деформированное состояние (НДС) плит. При расчете цементобетонных покрытий необходимо учитывать возникновение дополнительных напряжений, вызываемых изменением температуры. В результате нагревания или охлаждения, плиты стремятся к линейным деформациям, в связи с чем возникают напряжения в покрытии. Кроме того, изменение площади одной стороны плиты относительно другой ведет к выгибанию ее краев в направлении относительно меньшей площади. Коробление представляет собой деформацию бетонной плиты, а именно, выгибание краев по направлению вверх или вниз, а сама плита приобретает изогнутую форму. Бетонная плита частично теряет площадь опоры на основание либо центральной части, либо краев, как показано на **рис. 1**, в результате их приподнятия. Площадь потери контакта подошвы с основанием зависит от размеров плит, величины деформации коробления и деформативных свойств основания. Отличия в показателях температуры и влажности верхней и нижней поверхностей покрытия приводят к такого рода деформациям. Степень изменения формы плиты обусловлена разницей линейных расши-

рений и/или сжатий покрытия и основания, обусловленных различными температурно-влажностными условиями для этих конструкций. Воздействие транспортного потока во время частичного отрыва покрытия от основания, приводит к образованию трещин и обламыванию краев плит при их выгибании вверх. Эффект коробления особенно заметен по периметру и углам плиты **[4, 5]**.

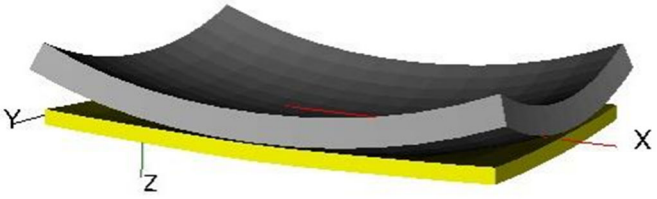

Рис. 1. Коробление цементобетонной плиты с потерей контакта с основанием

Наиболее чаще коробление обусловлено температурным перенапряжением в плитах из-за отсутствия или засорения швов расширения **[6]**. Кроме того, причиной возникновения коробления плиты вскоре после укладки бетонной смеси могут быть высокие годовые перепады температур воздуха. При этом происходит коробление с выгибанием краев плиты вверх. В ряде случаев эффект коробления проявляется на ранней стадии твердения бетона. Тем не менее, коробление может происходить и по истечении длительного периода времени. Иной причиной появления эффекта коробления является изменение температуры покрытия по его толщине **[7, 8]**. В отличие от предыдущего случая, температура покрытия, приводящая к короблению, не связана с нарушением технологии приготовления смеси и устройства покрытия. Перепады температур воздуха и количество солнечной радиации можно спрогнозировать, с учетом климатических данных района строительства. Это позволит рассчитать разницу температур поверхностей покрытия и напряжение от коробления и при проектировании жестких дорожных одежд учитывать такой показатель, как составляющую напряженного состояния покрытия. При изменении температуры по толщине цементобетонного покрытия плиты коробятся выпуклостью вниз или вверх в зависимости от направления теплового потока. Под воздействием солнечной радиации и температуры воздуха происходит нагрев и увеличение площади верхней поверхности плиты относительно нижней, имеющей более

низкую температуру. В результате чего возникает температурное коробление с выгибанием вверх. И, наоборот, в ночное время суток температура поверхности падает и происходит уменьшение площади верхней части плиты относительно ее подошвы основания. В этом случае выгибание от коробления направлено вниз.

Цементобетонные покрытия способны долгое время обеспечивать комфортное и безопасное движение транспортного потока по автомобильным дорогам за счет сохранения своих качеств в период эксплуатации, но при своевременном проведении работ по ремонту и содержанию **[9]**. Однако даже при выполнении вышеуказанных условий в ходе эксплуатации в цементобетонных покрытиях могут возникать повреждения различного вида : трещины, выбоины, разрушения кромок швов, уступы, отколы углов плит, шелушение и т.д. Одной из главных причин повреждений бетонных покрытий является воздействие нагрузок от движения автомобилей, вследствие чего возникают напряжения в плите. Величина таких напряжений зависит от интенсивности и скорости движения, состава транспортного потока, ровности покрытия и др. Другой причиной повреждения покрытий являются деформации цементобетона при усадке и изменении температуры, которые, в свою очередь, также вызывают напряжения **[10]**. Их величина зависит от качества укладки и ухода за покрытием на этапе строительства и климатических условий местности в процессе эксплуатации. Напряжения от температурных условий возникают в цементобетонных покрытиях по причине двух факторов. Первым является свойство цементобетона, как материала, изменять свою форму, подвергаясь температурным воздействиям. Величина коэффициента температурного расширения бетона, характеризующая степень изменения его размеров зависит от целого ряда причин. Цементный камень характеризуется большим значением указанного коэффициента, в отличие от природных заполнителей, таким образом доля и вид минеральной составляющей цементобетонной смеси оказывает значительное влияние на значение коэффициента при эксплуатации. Влажное цементобетонное покрытие в большей степени подвержено температурному расширению, чем сухое, из этого следует, что помимо самих условий влажности местности на конечный коэффициент температурного расширения влияет и количество содержащихся пор воздуха в цементобетоне

[11, 12]. Усредненное значение данного коэффициента, при расчетах удлинения плит покрытия автомобильных дорог, принимают равным 0,00001 на 1 °С.

Однако напряжения возникают из-за условий, препятствующих свободному изменению размеров и формы бетонных плит покрытия. В результате сил трения по основанию в плите возникают растягивающие усилия, которые могут достичь значительной величины. Установлены случаи, доказанные экспериментальным путем Л.Н. Комчихиной, что две половины одной плиты, перемещаясь, преодолевают разные по значению силы трения-сцепления. Препятствие свободному короблению покрытия, за счет собственного веса плиты и анкерных соединений в деформационных швах, также вызывает значительные напряжения. Близкое расположение бетонных плит в покрытии препятствует свободному изменению их собственной длины, по этой причине, для оптимизации работы системы плит, на всем протяжении покрытия устраиваются сквозные деформационные швы сжатия и расширения, их ширина раскрытия и расстояние друг от друга рассчитываются в зависимости от коэффициента температурного расширения бетона, толщины покрытия, температуры окружающей среды во время укладки и максимальной температуры воздуха района строительства в период эксплуатации.

Наиболее фундаментальным исследованием в этой области является монография Л.И. Горецкого, в которой собраны практически все важнейшие сведения по температурному режиму и напряженному состоянию цементобетонных покрытий. На основе экспериментальных исследований в работе отмечаются следующие особенности температурного режима системы «покрытие – основание»:

1. Изменение температуры по глубине всей конструкции дорожной одежды с цементобетонным покрытием, включая песчаное основание и подстилающие грунты, происходит непрерывно, в основном следует за ходом температуры окружающего воздуха и в этом смысле имеет установившийся характер. При этом важно отметить, что амплитуда суточных колебаний температуры воздуха (разность максимальных и минимальных суточных температур) в летний период близка по своему значению к амплитуде колебания температуры за весь зимний период. Это следует из того,

что температура воздуха летом в течение суток значительно отличается, тогда, как зимой в период наибольших морозов она имеет примерно одно и тоже значение.

2. Колебания температуры от максимальных до минимальных значений по глубине всей конструкции покрытия происходят по закону гармонической функции.

3. Амплитуда колебания температуры по глубине покрытия имеет максимальное значение в летний период, среднее – в осенне-весенний период и наименьшее – зимой. При этом отмечается, что летом амплитуда колебаний по глубине покрытия резко уменьшается, а осенью и особенно зимой имеет более плавное изменение. Это подтверждается почти одинаковыми значениями температуры по всему сечению покрытия.

4. Температура воздуха всегда меньше, чем температура поверхности грунта и цементобетонного покрытия, в летний и осенний периоды. Это можно объяснить тем, что воздушный поток на высоте 2 м, на которой согласно стандарту измеряют температуру воздуха, более сильный, чем внизу на поверхности, и, следовательно, в большей степени происходит процесс переноса тепла. Кроме того, надо учитывать, что вследствие инсоляции в покрытии происходит аккумуляция добавочного количества тепла.

5. Распределение температуры по глубине цементобетонного покрытия не зависит от влажности воздуха, изменявшейся от 10 до 80 %, и направления ветра, скоростью до 10 м/с. Это положение весьма важно, так как освобождает от необходимости, при решении данной задачи, учитывать эти метеорологические параметры.

6. Анализируя условия работы цементобетонных покрытий в летний, осенний и зимний периоды и рассматривая при этом различные климатические зоны, можно заключить, что летом покрытие находится в более сложных и тяжелых температурных условиях как по абсолютным значениям изменений температуры, так и по характеру распределения их по толщине покрытия **[2]**.

Указанные особенности хорошо согласуются с работой Д. Крони (Англия). Следует подчеркнуть, что температурный режим бетонных покрытий изучали в покрытиях различной толщины и в разных климатических зонах. Можно упомянуть работы Б.С. Раев-Богословского, П. Мари, Уэстергарда, Г. Жефруа, В.А. Воейкова, Э.Д. Бондаревой, Л.Н. Комчихиной, В.А. Попова, В.А. Чернигова, Л.Б. Каменецкого, С.П. Тимошенко и др.

Из всего вышесказанного следует, что напряжения, вызванные работой покрытия в разных температурных режимах очень важны при проектировании жестких дорожных одежд. С позиции теории надежности цементобетонных покрытий, применяют условия накопления повреждений, ухудшающие параметры качества конструкции от внешних воздействий **[13, 14]**. Цементобетонные покрытия подвергаются действию переменных температур несколько раз в течение суток, а в сочетании с автомобильными нагрузками это создает значительное количество условий для образования и накопления повреждений, что в последствие может привести к необратимым деформациям покрытия.

Как было отмечено выше, проведены многочисленные исследования разными учеными в различных климатических условиях работы цементобетонных покрытий. На основе анализа температурного режима цементобетонных покрытий и их напряженного состояния принято выделять следующие виды напряжений:

1. Напряжения растяжения и сжатия, вызванные ограничениями перемещений на контуре плиты и вследствие трения на контакте плиты и основания σ_1^{T}.
2. Напряжения, вызванные полным или частичным ограничением коробления плиты σ_2^{T}.
3. Внутренние напряжения, возникающие в результате нелинейности эпюры температуры по толщине плиты σ_3^{T} **[4].**

Одной из наиболее ранних формул для определения напряжений первого рода является формула Гольдбека, предложенная в 1928 г.:

$$\sigma_1^{\mathrm{T}} = 2 \times \gamma \times f \times L \ , \qquad (1)$$

где

γ – удельный вес цементобетона, кг/м^3;

f – коэффициент трения по основанию;

L – длина плиты, м.

Основным недостатком формулы является недооценка сил сопротивления перемещению плиты, которые не увязаны с величиной смещения и, соответственно, с изменениями температуры.

На основе аппроксимации экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента трения от интенсивности давления следующего вида:

$$f = 0{,}3 \times p^{0{,}285} \ , \qquad (2)$$

где

p – интенсивность давления, кг/см^2.

По данным В.П. Столярова и В.Н. Матвеева, установлена зависимость коэффициента трения от величины смещения δдля конструкций на песчаном основании:

$$f = 1{,}17 \times \delta^{0{,}35} \ . \qquad (3)$$

В 1953 г. теоретическое решение этой задачи на основе некоторых допущений получил И.А. Медников:

$$\sigma_1^{\text{Т}} = \alpha \times E_{\text{б}} \times \Delta T \times \left(l - \frac{\cosh(n \times x)}{\cosh(n \times 0{,}5 \times l)} \right) \ , \qquad (4)$$

где

$$n = \sqrt{\frac{k_0}{E \times h_0}} \ , \qquad (5)$$

k_0 – коэффициент сопротивления сдвигу плиты по основанию;

h_0 – толщина плиты, м;

l – длина плиты, м;

$E_{\text{б}}$ – модуль упругости бетона, МПа;

x – продольное расстояние от центра плиты до рассматриваемого сечения.

Другая составляющая температурных напряжений, а именно от ограничений коробления, более сложное явление, однако существует ряд приближённых формул для определения этих напряжений. Наибольшее распространение получили следующие формулы, предложенные Уэстенгардом, а именно:

в краевой точке поперечного сечения:

$$\sigma_{T_x}^{k} = \frac{E_{\text{б}} \times \alpha \times \Delta T}{2} \times C_x \ ; \qquad (6)$$

в средних точках поперечного сечения:

$$\sigma_{T_x}^{\text{ц}} = \frac{E_{\text{б}} \times \alpha \times \Delta T}{2 \times (1 - \mu_{\text{б}}^2)} \times \left(C_x + \mu_{\text{б}} \times C_{\text{у}} \right) \ ; \qquad (7)$$

$$\sigma_{T_y}^{ц} = \frac{E_б \times \alpha \times \Delta T}{2 \times (1 - \mu_б^2)} \times \left((C_y + \mu_б \times C_x\right) , \quad (8)$$

где

$\sigma_{T_x}^{k}$ – продольные напряжения вдоль края плиты;

$\sigma_{T_x}^{ц}, \sigma_{T_y}^{ц}$ – напряжения, действующие соответственно вдоль и поперек плиты в ее центральной части;

$E_б$ – модуль упругости бетона, МПа;

$\mu_б$ – коэффициент Пуассона бетона (0,15-0,20);

α – коэффициент линейного температурного расширения бетона;

ΔT – температурный градиент, разница температур верхней и нижней поверхности покрытия;

C_x, C_y – коэффициенты, зависящие от длины плиты L, ее ширины b и радиуса относительной жесткости плиты l, определяемые по графику, изображенному на **рис. 2** в зависимости от отношения $\frac{L}{l}$ и $\frac{b}{l}$.

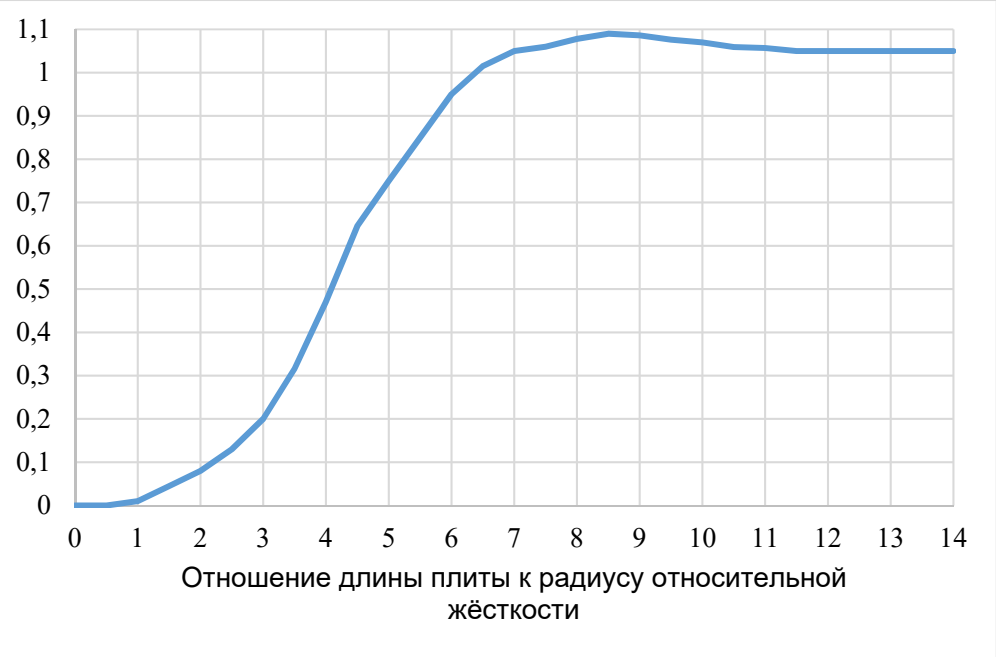

Рис. 2. График Бредбери для определения значений коэффициентов (C_x, C_y) для вычисления температурных напряжений в покрытии при ограничении коробления

Более детально вопрос определения температурных напряжений был рассмотрен С.П. Тимошенко в работе **[5]**. Все вышеупомянутые виды напряжений учитываются в формуле общего напряжения, предложенной С.П. Тимошенко **[12, 15-17]**:

$$\sigma_{\text{Т}} = E_{\text{б}}\alpha T + \frac{1}{2 \times h} \times \int_{-h}^{+h} E_{\text{б}}\alpha T dz + \frac{1}{2 \times h^3} \times \int_{-h}^{+h} E_{\text{б}}\alpha T z dz \ , \qquad (9)$$

где

α – коэффициент линейно-температурного расширения бетона;

$E_{\text{б}}$ – модуль упругости бетона, МПа;

T – расчетная функция распределения температуры по толщине покрытия.

В общем виде данная формула с учетом всех составляющих напряжений представлена ниже:

$$\sigma^{\text{Т}} = \sigma_1^{\text{Т}} + \sigma_2^{\text{Т}} + \sigma_3^{\text{Т}} \ ,$$

где

$\sigma_1^{\text{Т}}$ – напряжения, возникающие в покрытии при невозможности продольных деформаций и коробления;

$\sigma_2^{\text{Т}}$ – при невозможности продольных деформаций;

$\sigma_3^{\text{Т}}$ – при невозможности деформаций коробления.

Как можно видеть, само решение представляет из себя сложное интегральное уравнение, которое нецелесообразно использовать для учета температурных напряжений при проектировании жестких дорожных одежд без применения различных программных комплексов **[15]**.

Наибольшие напряжения в бетоне дорожной плиты возникают от действия временной нагрузки и воздействия температуры; другие факторы имеют второстепенное значение. Напряжения в покрытии от изменения объема грунта земляного полотна как под воздействием промерзания, так и вызываемых набуханием или высыханием грунта, также могут достигать больших величин и вызывать появление трещин в покрытии **[18]**. Вероятность разрушения покрытия из-за указанных причин можно снизить путем устройства прочного и устойчивого земляного полотна из соответствую-

щих грунтов. Напряжения, возникающие от изменений температуры, могут достигать таких же величин, как и от временной нагрузки от воздействия движения автомобилей **[7]**.

ВЫВОДЫ

1. Учет температурных напряжений при расчетах геометрических параметров цементобетонных покрытий играет достаточно важную роль для обеспечения долговечности всей дорожной конструкции.
2. Фактор коробления на цементобетонных покрытиях чаще всего проявляется вследствие температурного перенапряжения в плитах, некачественно устроенных деформационных швов расширения, а также высоких годовых перепадов температур воздуха.
3. Современные экспериментальные исследования и аналитические работы, посвященные вопросу расчета температурных усилий в бетонных плитах, показывают, что учет напряжений от воздействия изменения температуры при расчетах геометрических параметров покрытия на стадии проектирования автомобильных дорог является достаточно актуальной задачей.

© Максимов В.А., Ушаков В.В., 2024

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Справочник инженера-дорожника: Строительство автогужевых дорог. – Л.: Государственное транспортное издательство, 1935. – 680 с.*
2. *Ушаков В.В. Весь мир строит дороги из цементобетона, а в России каждый год перекладывают асфальт. Как это изменить? URL: https://rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/22640-ves-mir-stroit-dorogi-iz-cementobetona-a-v-rossii-kazhdyy-god-pereklady vayut-asfalt-kak-eto-izmenit.html (дата обращения: 18.09.2024).*
3. *О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения: постановление Правительства Российской Федерации от 30.05.2017 № 658 //*

Гарант.ру: информационно-правовой портал: сайт. URL: https://base.garant.ru/71689744/ (дата обращения: 18.09.2024).

4. *Ушаков В.В. Анализ напряженно-деформированного состояния цементобетонных покрытий / В.В. Ушаков, М.А. Гуртяк // Материалы Всероссийской конференции в 3-х частях. Том Часть 2. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 350-353.*
5. *Тимошенко С.П. Теория упругости / Пер. с англ. проф. Н.А. Шошина. – 2-е изд., испр. – Ленинград; Москва: ОНТИ, Глав. ред. техн.-теорет. лит-ры, 1937. – 451 с.*
6. *Попов В.А. Исследование продольной устойчивости плит аэродромных покрытий / В.А. Попов, И.В. Демьянушко, А.А. Аверкиев // Дороги и мосты. – 2024. – № 51/1. – С. 53-69.*
7. *Защепин А.Н. Бетонные покрытия автомобильных дорог / А.Н. Защепин, Е.Ф. Левицкий. – М.: Автотрансиздат, 1961. – 410 с.*
8. *Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог / Г.И. Глушков, В.П. Носов, В.Ф. Бабков и др.; под ред. Г.И. Глушкова. – М.: Транспорт, 1987. – 254 с.*
9. *Чернигов В.А. Методические рекомендации по расчету температурных полей, напряжений и деформаций в цементобетонных покрытиях. – М., Союздорнии, 1976. – 41 с.*
10. *Медников И.А. Исследования по теории расчета бетонных покрытий автомобильных дорог: в 3-х томах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.00.00 / Медников Иосиф Аркадьевич; МАДИ. – М., 1965. – 926 с.*
11. *Носов В.П. Цементобетонные покрытия автомобильных дорог. Прогнозирование повреждений на основе математического моделирования: монография / В.П. Носов – М.: МАДИ, 2013. – 228 с.*
12. *Носов В.П., Фотиади А.А. Расчёт цементобетонных покрытий автомобильных дорог: учебное пособие / МАДИ. – М., 2010. – 100 с.*
13. *Карпухин Н.С. Исследование выносливости железобетонных балок под воздействием многократно приложенной нагрузки / Н.С. Карпухин // Труды МИИТ. – М., 1962. – Вып. 152. – С. 44-53.*

14. *Виноградов А.П. Надежность и сертификация прочности цементобетонных покрытий аэродромов / А.П. Виноградов. – М., 1994. – 125 с.*
15. *Westergaard, H.M. (1926) Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads, 7, 25-35.*
16. *Левицкий Е.Ф. Бетонные покрытия автомобильных дорог / Левицкий Е.Ф., Чернигов В.А. – М.: Транспорт, 1980. – 288 с.*
17. *Носов В.П. Расчет цементобетонных покрытий автомобильных дорог / В.П. Носов. – М.: МАДИ, 1980. – 61 с.*
18. *Finite Element Investigation of the Deterioration of Doweled Rigid Pavement. Ziad G. Ghauch. 2011. – 20 с. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1111.1001.*

REFERENCES

1. *Spravochnik inzhenera-dorozhnika: Stroitel'stvo avtoguzhevyh dorog. – L.: Gosudarstvennoe transportnoe izdatel'stvo, 1935. – 680 s.*
2. *Ushakov V.V. Ves' mir stroit dorogi iz cementobetona, a v Rossii kazhdyj god perekladyvayut asfal't. Kak eto izmenit'? URL: https://rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/22640-ves-mir-stroit-dorogi-iz-cementobetona-a-v-rossii-kazhdyy-god-perekladyvayut-asfalt-kak-eto-izmenit.html (data obrashcheniya: 18.09.2024).*
3. *O normativah finansovyh zatrat i Pravilah rascheta razmera byudzhetnyh assignovanij federal'nogo byudzheta na kapital'nyj remont, remont i soderzhanie avtomobil'nyh dorog federal'nogo znacheniya: postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 30.05.2017 № 658 // Garant.ru: informacionno-pravovoj portal: sajt. URL: https://base.garant.ru/71689744/ (data obrashcheniya: 18.09.2024).*
4. *Ushakov V.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya cementobetonnyh pokrytij / V.V. Ushakov, M.A. Gurtyak // Materialy vserossijskoj konferencii v 3-h chastyah. Tom Chast' 2. Inzhenerno-stroitel'nyj institut Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo. Sankt-Peterburg. – 2021. – S. 350-353.*
5. *Timoshenko S.P. Teoriya uprugosti / Per. s angl. prof. N.A. Shoshina. – 2-e izd., ispr. – Leningrad; Moskva: ONTI, Glav. red. tekhn.-teoret. lit-ry, 1937. – 451 s.*

6. *Popov V.A. Issledovanie prodol'noj ustojchivosti plit aerodromnyh pokrytij / V.A. Popov, I.V. Dem'yanushko, A.A. Averkiev // Dorogi i mosty. – 2024. – № 51/1. – S. 53-69.*
7. *Zashchepin A.N. Betonnye pokrytiya avtomobil'nyh dorog / A.N. Zashchepin, E.F. Levickij. – M.: Avtotransizdat, 1961. – 410 s.*
8. *Zhestkie pokrytiya aerodromov i avtomobil'nyh dorog / G.I. Glushkov, V.P. Nosov, V.F. Babkov i dr.; pod red. G.I. Glushkova. – M.: Transport, 1987. – 254 s.*
9. *Chernigov V.A. Metodicheskie rekomendacii po raschetu temperaturnyh polej, napryazhenij i deformacij v cementobetonnyh pokrytiyah. – M., Soyuzdornii, 1976. – 41 s.*
10. *Mednikov I.A. Issledovaniya po teorii rascheta betonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog: v 3-h tomah: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.00.00 / Mednikov Iosif Arkad'evich; MADI. – M., 1965. – 926 s.*
11. *Nosov V.P. Cementobetonnye pokrytiya avtomobil'nyh dorog. Prognozirovanie povrezhdenij na osnove matematicheskogo modelirovaniya: monografiya / V.P. Nosov – M.: MADI, 2013. – 228 s.*
12. *Nosov V.P., Fotiadi A.A. Raschyot cementobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog: uchebnoe posobie / MADI. – M., 2010. – 100 s.*
13. *Karpuhin N.S. Issledovanie vynoslivosti betonnyh balok pod vozdejstviem mnogokratno prilozhennyh nagruzok / N.S. Karpuhin // Trudy MIIT. – M., 1962. – Vyp. 152.*
14. *Vinogradov A.P. Nadezhnost' i sertifikaciya prochnosti cementobetonnyh pokrytij aerodromov / A.P. Vinogradov. – M., 1994. – 125 s.*
15. *Westergaard, H.M. (1926) Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads, 7, 25-35.*
16. *Levickij E.F. Betonnye pokrytiya avtomobil'nyh dorog / Levickij E.F., Chernigov V.A. – M.: Transport, 1980. – 288 s.*
17. *Nosov V.P. Raschet cementobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog / V.P. Nosov. – M.: MADI, 1980. – 61 s.*
18. *Finite Element Investigation of the Deterioration of Doweled Rigid Pavement. Ziad G. Ghauch. 2011. – 20 c. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1111.1001.*

Информация об авторах

В.А. Максимов – аспирант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия
В.В. Ушаков – доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Information about the authors

V.A. Maksimov – postgraduate student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia
V.V. Ushakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензенты: канд. техн. наук В.А. Попов; начальник управления исследований дорожно-строительных материалов С.Г. Беспалов ФАУ «РОСДОРНИИ».

Статья поступила в редакцию 19.08.2024. Одобрена после рецензирования 02.10.2024. Принята к публикации 23.10.2024.
The article was submitted 19.08.2024. Approved after reviewing 02.10.2024. Accepted for publication 23.10.2024.