

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИЗНОСА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ

Аннотация: в данной работе рассматривается проблема разрушения покрытия автомобильных дорог и подводится теоретическая база под один из видов этих разрушений в виде износа дорожного покрытия пористой структуры (асфальтобетона) в присутствии влаги под воздействием колес транспортных средств. Возникающее при этом дополнительное давление вызывает движение влаги в порах и трещинах покрытия, что приводит к появлению локальных напряжений, превышающих прочность материала, а, следовательно, к разрушению дорожной одежды. Авторы приходят к выводу, что при определенных режимах движения транспортных средств по влажному покрытию процесс его разрушения имеет тенденцию к увеличению под действием возникающего в порах давления воды, и это явление необходимо учитывать при рассмотрении вопроса прочности и долговечности дорожного покрытия.

При динамическом воздействии колес транспортных средств возникающее дополнительное давление воды в порах и трещинах помимо разрушения покрытия также является причиной направленного движения влаги вглубь твердого материала дорожной одежды, что приводит к уменьшению несущих свойств основания. В целом рассматривается новый подход в вопросе разрушения пористой структуры дорожного покрытия в условиях его увлажнения при динамическом нагружении транспортным потоком.

Ключевые слова: покрытие автомобильных дорог, износ дорожного покрытия пористой структуры, воздействие колес транспортных средств, локальное напряжение, процесс разрушения.

UDK 123.456.78

V. A. Kozlov,
A. I. Kotov

THEORETICAL JUSTIFICATION OF WEAR OF ROAD ODEZH-DY OF POROUS STRUCTURE AT DYNAMIC NAGRUZHE-NII TRAFFIC FLOW

Abstract: in this work the problem of destruction of a covering of highways is considered and the theoretical base under one of types of these destructions in the form of wear of a paving of porous structure (asphalt concrete) in the presence of moisture under the influence of wheels of vehicles is brought. The additional pressure arising at the same time causes the movement of moisture in a time and cracks of a covering that leads to emergence of the local tension exceeding material durability, and, therefore, to destruction of road clothes. Authors come to a conclusion that at certain modes of the movement of vehicles on a damp covering process of his destruction tends to increase under the influence of the water pressure arising in a time, and this phenomenon needs to be considered by consideration of a question of durability and durability of a paving.

At dynamic influence of wheels of vehicles the arising additional pressure of water in a time and cracks besides destruction of a covering also is the reason of the directed movement of moisture deep into of solid material of road clothes that leads to reduction of the bearing properties of the basis. In general new approach in a question of destruction of porous structure of a paving in the conditions of his moistening at dynamic loading is considered by traffic flow.

Keywords: covering of highways, wear of a road carpet of porous structure, influence of wheels of vehicles, local tension, destruction process.

Введение

Самым распространенным материалом твердого покрытия автомобильных дорог является асфальтобетон, имеющий определенные прочностные характеристики и срок службы, в основном определяемым разрушением конструкции под динамическим воздействием транспортного потока. При проектировании этих конструкций рассчитывается напряженно-деформированное состояние, в ряде случаев, имеет расхождение с фактическим. Инженеры и ученые, используя статистический подход при определении возникающих от транспортной нагрузки изменений в покрытии, находят эмпирические зависимости между деформационными характеристиками конструкции и внешними воздействиями. Это значительно упрощает нахождение корреляционных связей между искомыми параметрами и воздействиями, но не позволяет понять причины тех деструктивных явлений, приводящих к изменению напряженно-деформированного состояния твердого покрытия дорожной одежды и уменьшению срока его службы. Необходимо рассмотреть физическую сущность этих явлений, что позволит инженерам вносить определенные коррективы на этапе проектирования.

Оценка процесса разрушения дорожного покрытия пористой структуры в условиях его увлажнения

В данной работе дорожное покрытие рассматривается в виде пористой среды,

$$\tau = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)^2};$$

$Y = aH$ — сцепление, a — коэффициент внутреннего трения.

Соотношение (1) называется конусом Мизеса-Губера-Шлейхера, оно обобщает закон сухого трения Кулона на пространственный случай.

В соответствии с критерием (1), в насыщенной среде по сравнению с той же средой с пустыми порами, сдвиговое разрушение происходит при напряжениях, меньших на величину p . Это объясняется тем, что в насыщенной пористой среде только часть $p^{(f)}$ нормальной нагрузки приходится на скелет пористой среды, а другая воспринимается жидкостью. В то же время касательные напряжения полностью воспринимаются лишь скелетом.

которая в пределе может быть насыщена водой, под воздействием гибкого пневматика колеса транспортного средства, движущегося по данному покрытию. При определенных условиях пористая структура разрушается, что подтверждается опытом эксплуатации дорог. При этом скорость разрушения зависит не только от массы транспортного средства, но и от степени увлажнения покрытия и скорости движения транспорта. Одним из предельных случаев разрушения пористой среды будет ее полное насыщение водой совместно с деформирующим воздействием транспортного потока.

Рассмотрим критерий разрушения насыщенных водой пористых сред. Согласно принципу Терцаги в качестве условия возникновения пластических деформаций в насыщенной пористой среде можно взять предельное условие, которое справедливо для рассматриваемой среды в отсутствие жидкости, если в нем заменить полные напряжения σ_{ij} на эффективные $\sigma_{ij}^{(f)}$. В качестве этого предельного условия можно применить условие Кулона

$$\Phi_{\sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}} (\text{sgn } \tau) \cdot \tau^{(f)} - \alpha p^{(f)} - Y = 0. \quad (1)$$

Здесь $p^{(f)} = \sigma + p$, $\tau^{(f)} \equiv \tau$ — эффективное давление и интенсивность касательных напряжений в скелете пористой среды;

Приращения полных деформаций de_{ij} скелета насыщенной пористой среды складываются из приращений упругих и пластических деформаций

$$de_{ij} = de_{ij}^{(e)} + de_{ij}^{(p)}. \quad (2)$$

Приращения упругих деформаций будем определять через приращения напряжений $d\sigma_{ij}$ согласно линейному закону Гука

$$de_{ij} = E_{ijkl} d\sigma_{kl}, \quad (3)$$

где $E_{ijkl} = \frac{1}{E} [(1 + \nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ik}\delta_{jl}]$;

E — модуль Юнга;

ν — коэффициент Пуассона.

Приращения пластических деформаций связаны с напряжениями σ_{ij} линейными тензорными соотношениями

$$de_{ij}^{(p)} = -(H + p)\delta_{ij}d\xi + (\sigma_{ij} + p\delta_{ij})d\lambda, \quad (4)$$

где $p = -(\sigma_{ij}\delta_{ij})/3$ — давление, а кинетические функции ξ и λ являются дополнительными искомыми переменными.

Упругие деформации вызывают изменение размеров пор, в которых может находиться вода. В случае их записания данные замкнутые объемы ведут себя как пластические системы Максвелла. В силу малой сжимаемости жидкости при давлениях, характерных нагружению от транспортного потока, пористая среда будет себя вести как упруго пластическая.

Пластическая деформация определяется условием (1) и неассоциированным законом течения

$$de_{ij}^{(p)} = [\sigma_{ij}^{(f)} + (2/3)\Lambda\alpha H\delta_{ij} + (1 + 2\Lambda\alpha/3)p^{(f)}\delta_{ij}]d\lambda, \quad (5)$$

где Λ — скорость дилатансии.

Наличие сдвигающих усилий в упруго пластической модели слабо изменяет объем пор, но приводит к действию ограничений, которые можно рассматривать в виде деформационной упруго пластической модели, формально представленной в виде [2]:

$$d\gamma = d\gamma^{(e)} + d\gamma^{(p)}, \quad d\gamma^{(e)} = d\tau/G,$$

$$de = de^{(e)} + de^{(p)}, \quad de^{(e)} = k_1 d\sigma^{(f)} + k_2 dp, \quad (6)$$

$$d\gamma^{(p)} = (1/h)(d\tau - \alpha d\sigma^{(f)}), \quad de^{(p)} = \Lambda |d\gamma^{(p)}|.$$

Здесь k_1, k_2 — коэффициенты, определяемые опытным путем; h — модуль упрочнения.

Данная модель предусматривает истечение жидкости в сторону раскрытия поры или трещины, что в итоге может вызывать дальнейшее разрушение скелета. И если уход жидкости из скелета пористой среды исключается, то уравнения непрерывности приводят это условие к ограничению на объемную деформацию

$$de = de^{(e)} + de^{(p)} = \beta_2 d\sigma^{(f)} - \beta_1 dp. \quad (7)$$

Так как коэффициенты β_1, β_2 намного меньше, чем эффективная пластическая сжимаемость Λ/h , в уплотняемых насыщенных пористых средах при сдвигах должно наблюдаться резкое возрастание давления

в порах. При этом выход малого элемента на предельную пластическую поверхность Φ_0 происходит при весьма малых эффективных давлениях, хотя полные давления $\sigma_{ij}\delta_{ij}$ могут быть весьма высокими.

Экспериментальные исследования [3] показывают, что при сдвиге в условиях малых эффективных напряжений давление в порах падает, что свидетельствует о разрыхлении скелета пористой среды. При больших эффективных напряжениях давление в порах растет, и скелет пористой среды разрушается при меньшем сдвиговом усилии. В этом случае из (7) следует, что в отсутствие дренажа нельзя пренебрегать малыми до предельными неупругими деформациями.

Численные расчеты по указанной модели показывают, что отсутствие оттока жидкости может приводить к резкому возрастанию давления внутри пор, и если его величина превышает прочность материала на разрыв, то происходит деструкция пористой среды. За основу взяты данные материалов, используемых в дорожном строительстве: модуль упругости $E_{аб} = 2800$ МПа, $G_{аб} = 4200$ МПа, прочность на разрыв при температуре 20°C — $2,95$ МПа, коэффициент Пуассона — $0,32$, модуль упрочнения — $1,07$.

Проницаемость в условиях одноосного деформирования с ростом эффективного нормального осевого давления $\sigma_{11}^{(f)}$ меняется примерно по экспоненциальному закону [4], с показателем экспоненты α_k на порядок меньше, чем показатель α_m уменьшения пористости среды

$$k = k_0 e^{-\alpha_k \sigma^{(f)}}, \quad m = m_0 e^{-\alpha_m \sigma^{(f)}};$$

$$k/k_0 = (m/m_0)^n, \quad (8)$$

$$n = \alpha_k / \alpha_m \approx 10, \quad \alpha_m \approx 10^{-3} \text{ МПа}.$$

На рисунке 1 показан график изменения напряжений в порах при возрастании внешнего давления от колеса.

Если скелет пористой среды включает в себя сильно сжимаемые составляющие, например, неподвижные пузырьки воздуха, проницаемость системы будет зависеть как от давления в порах, так и от эффективного давления. Изменения пористости m при больших сдвиговых деформациях примерно соответствуют изменениям объемной

пластической деформации. По мере сдвига m вначале убывает за счет уплотнения пространства пор, а затем начинает возрастать за счет дилатансионного разуплотнения. При этом проницаемость не повторяет этой зависимости. Разуплотнение лишь уменьшает темп убывания проницаемости. Это объясняется дроблением зерен, сопут-

ствующим деформированию, и заполнением поровых каналов более мелкими частицами. То есть уменьшение эффективного диаметра d поровых каналов препятствует возрастанию проницаемости: $k \sim d^2 f(m)$, где $f(m)$ — возрастающая функция. При этом характерно появление сильной анизотропии среды по проницаемости.

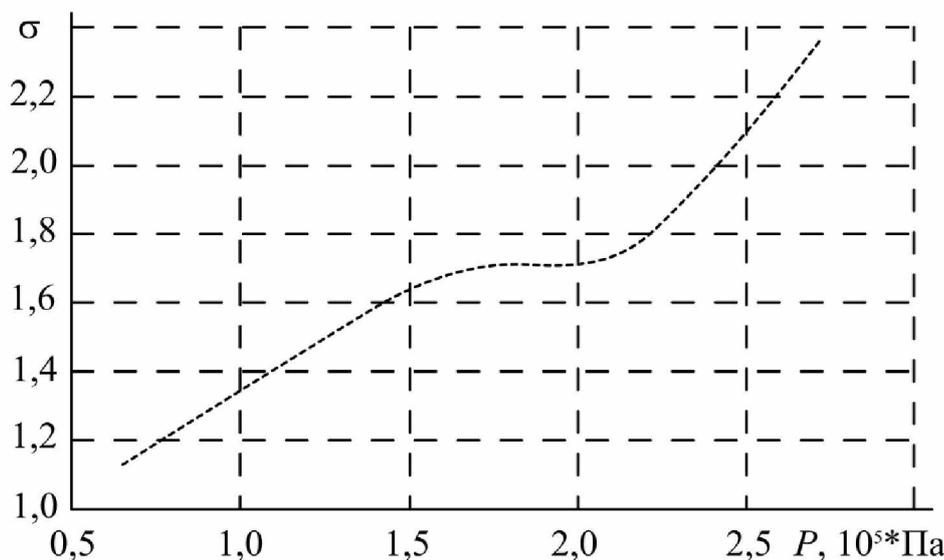


Рис. 1. График изменения напряжений в порах при возрастании внешнего давления от колеса

Возрастание давления от внешнего воздействия, вызванного проездом колеса, определяется не только весом транспортного средства, но и скоростью его движения. Решение этой задачи связано с работой, которую совершает колесо при движении по поверхности покрытия. Транспортное средство представляет собой многоколесный автомобиль, а колеса имеют внешний обод в виде резиновой шины. Предположим, что это поступательно движущаяся система [6] координат с положительным направлением радиального движения к фронту деформированной части шины. В этом случае прогибы w могут описываться дифференциальным уравнением, характеризующим свойства движущегося пневматика по поверхности покрытия

$$(T - \mu v^2) \frac{d^2 w}{ds^2} + k_1 \frac{dw}{ds} - kw = -Q, \quad (9)$$

где T — растягивающее усилие в пневматике, k — жесткость упругого основания, μ — масса единицы длины, v — скорость качения; коэффициент k_1 характеризует затухание.

Указанная выше упруго пластическая деформация пористой структуры эквивалентна деформации пневматика в области его контакта с дорогой, и для нахождения прогиба в указанной модели определим начальное положение системы из решения однородного уравнения:

$$(T - \mu v^2) \frac{d^2 w}{ds^2} + k_1 \frac{dw}{ds} - kw = 0, \quad (10)$$

которое определяется линейной комбинацией функций вида $w = e^{cs}$. Произведя замену и сокращая на e^{cs} , получим квадратное уравнение относительно коэффициента c

$$(T - \mu v^2) c^2 + k_1 c - k = 0. \quad (11)$$

Пока скорость качения v мала, величина c_1 отрицательна, а величина c_2 положительна и, следовательно, уравнение (10) имеет два решения — убывающее с увеличением дуги s : $w_1 = Ae^{c_1 s}$, и возрастающее с её ростом: $w_2 = Be^{c_2 s}$, где A и B постоянные свободной части модели и зоны контакта. Очевидно, что на-

бегающая часть колеса при $v_{кр} > \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ остаётся недеформированной, а воздействие на покрытие представляет собой механическое перемещение волны по периметру шины. Если скорость качения больше $v_{кр}$, то материал кольца движется быстрее, чем по нему может распространяться деформация, вызванная нагрузкой, приложенной в зоне контакта.

Нужно отметить, что качение колеса со скоростью, большей $v_{кр}$, вызывает появление сосредоточенной ударной силы P_j , которую легко определить, рассматривая изменение количества движения у входа в контакт. Каждый раз за время dt этот участок перемещается в новое положение, в связи с чем вертикальная составляющая количества его движения будет уменьшиться на величину $\mu v dt \sin \varphi$. Вертикальная же проекция импульса сил, приложенных к участку за то же время, составит $(P_j + T \sin \varphi) dt$. Выразив изменение количества движения пропорциональное импульсу силы, найдём:

$$P_j = (\mu v^2 - T) \sin \varphi.$$

Так как

$$\sin \varphi \approx \sqrt{\frac{2w}{R}},$$

окончательно получим:

$$P_j = \left(\frac{v^2}{v_{кр}^2} - 1 \right) \sqrt{2 \frac{fw}{R}}. \quad (12)$$

При этом ударная сила P_j даёт относительно оси модели момент

$$M_j = P_j a \approx T \left(\frac{v^2}{v_{кр}^2} - 1 \right) 2w. \quad (13)$$

Для анализа воздействия пневматика колеса и возникающей при этом ударной силы произведено численное моделирование для различных скоростных режимов транспортного средства и его весе. На рисунке 2 представлено нелинейное возрастание давления в областях скоростей, характерных при возникновении ударных воздействий от пневматики. Разность давлений между верхним и нижним слоями, в которых находятся поры и трещины, приводят к движению жидкости.

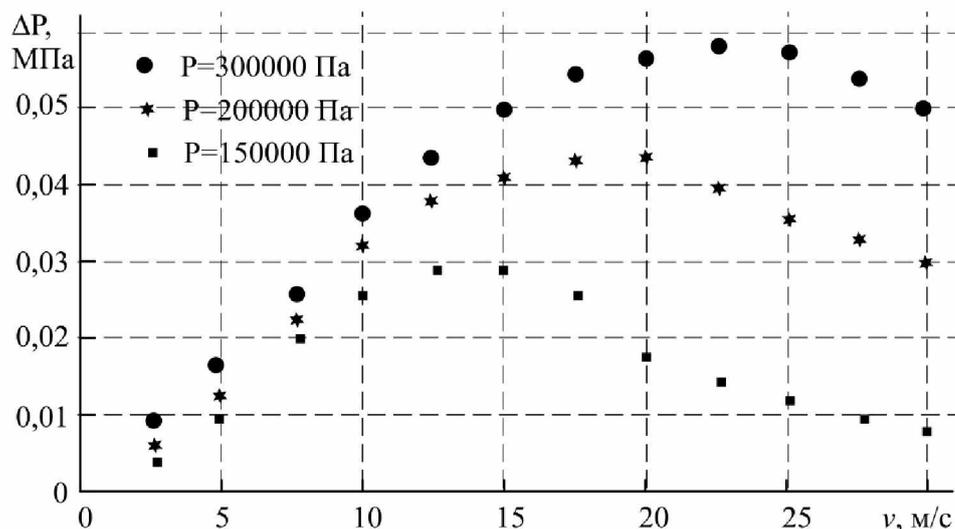


Рис. 2. Графики зависимости максимальных значений давлений внутри разрушенного элемента дороги и величина градиента давления от скорости движения транспортного средства

Заключение

При прогнозировании долговечности транспортных конструкций, содержащих пористые покрытия в условиях их увлажнения, необходимо учитывать возникаю-

щие давления в порах, которое связано не только с размерами пор покрытия, но и с параметрами транспортного средства. Возникающие усилия могут превосходить величину прочности на разрыв материала уже

при незначительных скоростях движения транспортного средства, а возникающее избыточное давление не только разрушает материал покрытия, но и способствует движению влаги вовнутрь его. Учет воздействия рассмотренного феномена позволит проектировщикам выбирать правильные режимы движения транспортных средств в условиях увлажнения покрытия, а ученым материаловедом — разрабатывать композиции материалов, устойчивых к данному нагружению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсунский М. Б. Оценка прочности дорог с нежесткими одеждами / М. Б. Корсунский. — М. : Транспорт, 1966. — 153 с.
2. Определяющие законы механики грунтов : пер. с англ. — М. : Мир, 1975. — 230 с.
3. Николаевский В. Н. Механика насыщенных пористых сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов и др. — М. : Недра, 1970. — 339 с.
4. Николаевский В. Н. Механические свойства горных пород. Деформации и разрушения / В. Н. Николаевский, Л. Д. Лившиц, И. А. Сизов // Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела. — 1978. — Т. 11. — С. 123—250.
5. Мелькумов В. Н. Прогнозирование величины необратимой деформации дорожной конструкции от воздействия транспортного потока / В. Н. Мелькумов, Ф. В. Матвиенко, А. Н. Канишев, В. В. Волков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. — 2010. — № 3. — С. 81—92.
6. Бидерман В. Л. Автомобильные шины / В. Л. Бидерман, Р. Л. Гуслицер и др. — М. : Госхимиздат, 1963. — 384 с.
7. Mantzos L., Carpos P. European energy and transport: trends to 2030: update 2005. Belgium: European Commission; ISBN 92-79-02305-5.
8. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions / S. Werkmeister //

Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003. — 189 p.

9. Abo-Qudais S. Prediction of bituminous mixture fatigue life based on accumulated strain / S. Abo-Qudais, I. Shatnawi // J. Constr. Build. Mater. — 2007. — Vol. 21. — P. 1370—1376.

10. Moghaddam T. B. A review on fatigue andrutting performance of asphalt mixes / T. B. Moghaddam, M. R. Karim, M. Abdelaziz // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6 (4). — P. 670—682 (www.academicjournal s. org/SPE).

11. Fontes L. P. T. L. Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures / Triches G., Pais J. C., Pereira P. A. A. // J. Constr. Build. Mater. — 2010. — Vol. 24. — P. 1193—1200.

12. Mahrez A. Fatigue and deformation properties of glass fiber reinforced bituminous mixes / Mahrez A., Karim M. R., Katman H. Y. // J. Eastern Asia, Soc. Trans. Stud. — 2005. — Vol. 6. — P. 997—1007.

13. Leng J. Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load: A Dissertation ... for the Degree of Doctor of Philosophy. 2002. — 152 p.

14. Arabani M. The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures / Arabani M., Mirabdolazimi S. M., Sasani A. R. // J. Constr. Build. Mater. — 2010. — Vol. 24. — P. 1060—1068.

Воронежский государственный технический университет

Козлов В. А., доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики

E-mail: vakozlov@vgasu.vrn.ru

Тел.:

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Котов А. И., младший научный сотрудник 24-го научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (ИПО и УА BBC)

E-mail: kotlac@yandex.ru

Тел.: 8 (910) 240-25-87