

DOI:10.12737/article_5a5dbd308441e5.06213837

Подольский В.П., д-р техн. наук, проф.,
Лобода А.В., д-р физ.-мат. наук, проф.,
Аль Аддесс Мохаммед Хашим, аспирант
Воронежский государственный технический университет

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫНОСА ЧАСТИЦ БИТУМА ИЗ ВЕРХНЕГО СЛОЯ КОЛЕСАМИ ТРАНСПОРТА

ecodor@bk.ru

Одним из факторов, влияющих на срок службы асфальтового покрытия, является концентрация битума в этом покрытии. Поэтому исследование и прогнозирование изменения этой концентрации важны при оценке срока службы покрытия, в том числе, при использовании асфальтового гранулята и битумных эмульсий.

Для восстановления изношенной верхней части дорожной конструкции на основе органических вяжущих и обеспечения требуемых значений коэффициента сцепления устраивается поверхностная обработка. Периодичность её устройства зависит от скорости утраты работоспособности дорожного покрытия в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо определить скорость вымывания вяжущего из верхнего слоя.

Ключевые слова: поверхностная обработка дорог, концентрация битума, диффузия, катионо-активная эмульсия.

Одним из факторов, влияющих на срок службы асфальтового покрытия, является концентрация битума в этом покрытии. Поэтому исследование и прогнозирование изменения этой концентрации важны при оценке срока службы покрытия, в том числе, при использовании асфальтового гранулята и битумных эмульсий.

Разумеется, в реальных условиях в работающем дорожном полотне происходят различные процессы, связанные с его нагружением, климатическими и другими периодическими, а также разовыми воздействиями. На эксплуатируемых автомобильных дорогах поверхностную обработку устраивают участками, где происходит его быстрое разрушение. Если суммарная площадь дефектов покрытия за период эксплуатации достигла 10 %, то рекомендуется устройство обработки. Появление дефектов на покрытии свидетельствует о низком качестве материала покрытия, а также вымывании битума из поверхностного слоя.

О прогнозировании срока службы асфальтового покрытия. Поэтому попытка адекватного описания именно концентрации битума в асфальтовом слое не может считаться всеобъемлющим ответом на вопрос о долговечности дорожного полотна. В то же время достаточно важными являются получение функциональной зависимости такой концентрации от времени и нескольких других естественных параметров и, в частности, оценка времени достижения концентрацией некоторого порогового (минимально до-

пустимого) значения. Такая оценка может рассматриваться в качестве одной из (завышенных) оценок срока службы полотна.

Ниже исследуется уравнение диффузии битума при условии «вымывания» его из верхнего слоя асфальтового покрытия и непроницаемости нижнего слоя

$$\frac{\partial}{\partial t} U = a^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} U \right) \quad (1)$$

В предлагаемой модели вынос частиц битума из верхнего слоя дорожного полотна осуществляется колесами проезжающих машин.

Поэтому естественным является дополнение уравнения диффузии смешанным краевым условием

$$\frac{\partial}{\partial t} U = kU \quad (2)$$

на верхнем слое покрытия, т.е. при $x=0$. Коэффициент k в этом условии можно варьировать достаточно широко. Например, можно считать его зависящим от времени года, суток, от температуры воздуха, прилегающего к дорожному полотну (в условиях республики Ирак эта температура,ходящая до 60 градусов и выше, является существенным фактором, влияющим на сроки износа дорожного полотна).

Однако в пределах достаточно длительных промежутков времени можно учитывать названные факторы в рамках постоянного коэффициента k , принимающего различные, но фиксированные значения. Более существенным может оказаться учет изменения коэффициента k в зави-

симости от интенсивности транспортного потока. Например, при увеличении такой интенсивности в два раза естественно увеличить также в два раза абсолютное значение коэффициента k (отметим, что сам этот коэффициент всегда является отрицательным).

На нижнем слое обсуждаемого асфальтового покрытия естественно считать выполненным условие его непроницаемости для битума, записываемое в виде

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Два таких краевых условия естественно дополнить начальным условием, фиксирующим начальную концентрацию битума по всей толщине рассматриваемого слоя. Мы будем считать, что в начальный момент времени битум равномерно распределен по всей толщине слоя покрытия и имеет концентрацию U_0 .

Таким образом мы получаем формальную математическую задачу

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} &= \alpha^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= kU \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= 0 \\ U(x,0) &= U_0 \end{aligned} \quad (4)$$

об изменении концентрации $U(x,t)$ вещества в рамках одномерного (изменяющегося только в зависимости от глубины расположения частицы вещества) распределения.

Отметим, что для решения такой задачи в настоящее время разработано большое количество подходов. Мы используем один из самых простых методов, а именно метод конечно-разностных схем. Значения коэффициентов, входящих в формулы (4), ниже приняты равными

$$kl := -0.1, \quad a := 0.5. \quad (5)$$

При этом, пользуясь линейностью, удобно рассматривать задачу в безразмерном виде, оперируя не настоящими (физическими) значениями, а их унифицированными аналогами. Например, можно принять величину U_0 за 100 % и вести дальнейшие обсуждения концентрации в долях (процентах) от этой величины. Соответственно, изучаем процесс диффузии до достижения величиной $U(x,t)$ критического значения αU_0 , где $0 < \alpha < 1$ – назначенное заранее пороговое значение (например, ниже это значение принимается равным 0.5).

Аналогично толщину слоя асфальтового покрытия можно измерять не в метрах или его до-

лях, а в долях «абстрактной» линейной меры, полагая, например, толщину рассматриваемого слоя равной 10 абстрактным единицам длины (в нашей работе одна абстрактная единица длины соответствует 7,5 мм, а толщина всего слоя покрытия принимается равной 75 мм).

В самом простом (явном) случае основной конечно-разностной схемы для решения параболического уравнения (1) и краевой задачи (4) для него является явный 4-точечный шаблон. В нем используются приближения

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) (i, j) \approx \frac{1}{\tau} (U_{i+1, j} - U_{i, j})$$

и

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) (i, j) \approx \frac{1}{h^2} (U_{i, j-1} - 2U_{i, j} + U_{i, j+2}) \quad (6)$$

для сеточных значений изучаемой функции $U(x,t)$. Дифференциальное уравнение (1) заменяется его сеточным аналогом

$$U_{j+1, k} := U_{i, k} + \alpha^2 \cdot s \cdot (U_{i, k-1} - 2U_{i, k} + U_{i, k+1}), \quad (7)$$

где τ, h – шаги разбиений по времени и по глу-

бине соответственно, $s = \frac{\tau}{h^2}$ – рабочий параметр конечно-разностной схемы.

Устраивая разбиения с достаточно мелкими шагами и опираясь на теорию конечно-разностных схем (см., например, [1]), можно получать приближенные решения задачи (4) с достаточно хорошей точностью. Отметим, что известные недостатки типа неустойчивости явной конечно-разностной схемы можно устранить, используя ее неявный аналог. Впрочем, полученные и приведенные ниже результаты вычислений показывают, что в исследуемой задаче эффект неустойчивости практически не наблюдается.

Ниже приведены графики зависимости концентрации битума от глубины погружения в слой покрытия через разные промежутки времени. Здесь 250 временных единиц приблизительно соответствуют одному году, а весь набор графиков охватывает промежуток в 8 условных лет.

$$> \text{plot}(\{B0, B250, B500, B1000, B2000\}, x = -10..0)$$

Ясно, что в процессе «вымывания» битума из верхнего слоя и диффузии его из нижних слоев асфальтового покрытия минимальной всегда будет концентрация битума на верхнем слое, соответствующем нулевой глубине. График уменьшения этой минимальной концентрации (в зависимости от условных лет) приведен на следующем рисунке 1.

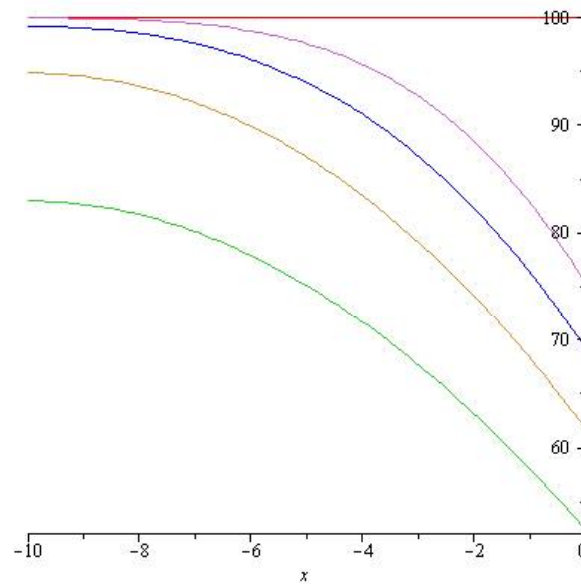


Рис. 1. Зависимость концентрации битума от глубины погружения в слой покрытия

На его основе можно прогнозировать срок работоспособности дорожного полотна. Как отмечалось выше, концентрацию битума в верхнем слое, меньшую некоторого критического значения (например, меньше 60 или 50 % от началь-

ной), можно считать соответствующей разрушению покрытия. Ниже приведен также вид экспоненциальной формулы, аппроксимирующей полученную зависимость (на промежутке от начала эксплуатации дорожного полотна до 4-х условных лет). Формула

$$U = \exp(4.545710954 - 0.1655032732 t + 0.01186100494 t^2)$$

как и все предыдущие вычисления и приведенные графики, получена в пакете символьной математики Maple (здесь t – время в условных годах).

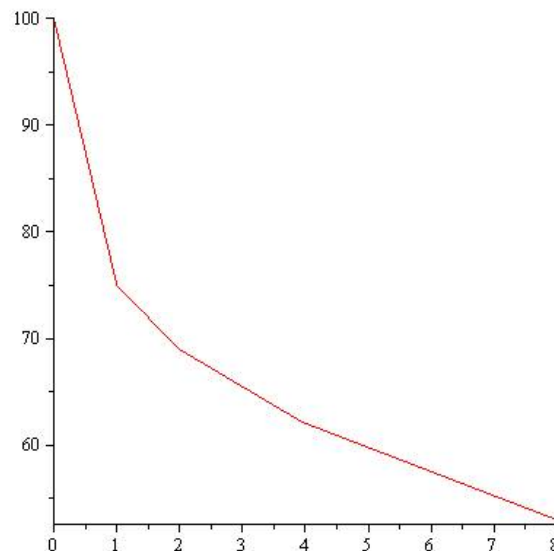


Рис. 2. Зависимость концентрации битума в верхнем слое от времени эксплуатации

Одним из основных способов повышения работоспособности и сопротивления дорожного покрытия скольжению шины, т.е. обеспечения требуемых значений коэффициента сцепления, является создание шероховатой поверхности,

или слоев износа.

Шероховатой называют поверхность дорожного покрытия, образуемую равномерно чередующимися выступами скелетных частиц и впади-

нами между ними, а также собственной шероховатостью выступов и впадин либо специально созданными бороздками на поверхности покрытия.

Шероховатость, создаваемую зёрнами прочной горной породы называют макрошероховатостью.

Макрошероховатость (далее по тексту «шероховатость») покрытия характеризуют тремя основными параметрами:

- средней высотой выступов R_z , мм;
- средней глубиной впадин H_{cp} , мм;
- коэффициентом шага шероховатости $K_{ш} = \frac{H_{cp}}{R_z}$

Рекомендуемые типы шероховатых покрытий для условий республики Ирак и параметры шероховатости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип шероховатых покрытий	Условные обозначения	Параметры шероховатости	
		Средняя высота выступов R_z , мм	Средняя глубина впадин H_{cp} , мм
Мелкошероховатые	М шер	$> 0.5 \leq 3.0$	$> 0.25 \leq 1.5$
Среднешероховатые	С шер	$> 3.0 \leq 6.0$	$> 1.0 \leq 3.0$

Минимально допустимые на протяжении всего срока эксплуатации значения коэффициентов продольного сцепления и средней глубины впадин шероховатости, принимаются по табл. 2.

Сцепные качества и шероховатость покрытий характеризуются коэффициентом сцепления K_c ,

который определяется как отношение фактического коэффициента продольного сцепления к допустимому значению по условиям безопасности движения (табл. 2). Покрытие по сцеплению соответствует требованиям безопасности движения, если $K_c \geq 1$

Таблица 2

Условия движения	Характеристики участков ДОРОГ	Коэффициент сцепления при скорости 60 км/час	Средняя глубина впадин макрошероховатости H_{cp} , мм
Легкие	Участки прямые или кривые радиусом 1000 м и более, горизонтальные или с уклоном не более 300 %, с элементами поперечного, профиля, установленными для дорог соответствующих категорий и с укрепленными обочинами без пересечений в одном уровне и примыканий при коэффициенте загрузки не более 0.3	$\frac{0.35}{0.28}$	0.35
Затрудненные	Участки на кривых в плане с радиусами 250–1000 м; на спусках и подъемах с уклонами от 30 до 60 %. Участки в зонах сужения проезжей части (при реконструкции), а также участки дорог, отнесенные к легким условиям движения, при коэффициенте загрузки 0.3–0.5	$\frac{0.40}{0.30}$	0.4
Опасные	Участки с видимостью менее расчетной (для соответствующих категорий дорог); на спусках и подъемах с клонами более при длине более 100 участки в зонах пересечения в одном уровне, а также участки, отнесенные к легким и затрудненным условиям при коэффициенте загрузки свыше 0.5	$\frac{0.45}{0.32}$	0.45

При износе и появлении дефектов на асфальтобетонных покрытиях следует устраивать одностороннюю поверхностную обработку. Для поверхностной обработки применяют: вязкие дорожные

битумы; и битумные эмульсии, отвечающие нормативным требованиям.

Поверхностные обработки на эмульсиях

прямого типа ЭБК-1 и ЭБК-2 устраивают на дорогах II–IV категории. При устройстве поверхностной обработки с использованием битумных эмульсий на дорогах II технической категории следует использовать прямые быстрораспадающиеся катионные полимерно-битумные эмульсии которые получают путем эмульгирования ПБВ.

Работы по поверхностной обработке проводят в сухую тёплую погоду. Температура воздуха при применении вязких битумов должна быть не ниже 15 °С, катионных эмульсий – не ниже 5 °С.

При устройстве поверхностной обработки с использованием битумных эмульсий следует применять прямые быстрораспадающиеся катионные эмульсии классов ЭКБ-1 и ЭКБ-2 и быстрораспадающиеся катионные полимерно-битумные эмульсии. Черный щебень следует готовить в смесителе принудительного или свободного перемешивания, обеспечивающих дозирование всех компонентов. Продолжительность перемешивания щебня с вяжущим в смесителях с циркуляционной схемой движения материалов 20–40 секунд. В смесителях с противоточной схемой движения материалов время перемешивания должно быть увеличено в 1,5–2,0 раза. Перемешивание щебня с прямой эмульсией ЭКБ-2 следует прекращать после полного введения в мешалку необходимого количества эмульсии.

К устройству поверхностной обработки приступают после устранения всех имеющихся повреждений и деформаций на покрытии (выбоин, просадок, наплывов, трещин и др.) и тщательной очистки покрытия от пыли и грязи. В отдельных случаях при невозможности обеспечить требуемую чистоту покрытия, рекомендуется его подгрунтовать путём розлива жидкого битума по норме 0,3–0,5 л/м²

Основной розлив вяжущего осуществляют на половине проезжей части в один приём без пропусков и разрывов. При возможности обеспечения объезда розлив вяжущего выполняют по всей ширине проезжей части. Температуру и концентрацию эмульсии следует устанавливать в зависимости от погодных условий. При температуре воздуха ниже +20 °С следует применять эмульсию с концентрацией битума 55–60 % и температурой её +40–50 °С. При температуре воздуха выше +20 °С подогревать эмульсию не следует, а концентрация битума может быть снижена до 50 %.

В начале и конце участка, когда автогудронатор набирает скорость и тормозит, может возникнуть неравномерное распределение вяжущего. Поэтому в начале и конце участка на протяжении 2–3 м покрытие закрывают рулонным материалом или песком слоем 1–2 см. После окончания розлива защитные материалы убирают.

На участках с продольным уклоном розлив вяжущего производят при движении автогудронатора на подъём.

По нанесённому тонкому слою вяжущего распределяют щебень механизированным способом слоем в одну щебенку и немедленно укатывают катком (10 т) за пять – шесть проходов по одному. Для лучшего формирования поверхностной обработки целесообразно применять самоходные катки на пневматических шинах или катки с обрезиненными металлическими вальцами.

Нормы расхода органических вяжущих и минеральных материалов при поверхностных работах приведены в табл. 3.

Таблица 3

Способ обработки	Фракция щебня, мм	Расход щебня		Расход вяжущего, л/м ²
		кг/м ²	м ³ /100 м ²	
Одиночная с применением вязкого битума	5–10	12–15	0,9–1,1	0,6–0,8
	10–20	20–25	1,3–1,5	0,7–0,9
Одиночная с применением битумной эмульсии 50 % концентрации	5–10	12–15	0,9–1,1	1,6–1,8
	10–20	20–25	1,3–1,5	2,0–2,4
Одиночная с применением битумной эмульсии 60 % концентрации	5–10	12–25	0,9–1,5	1,3–1,5
	10–20			1,7–2,0

При использовании для поверхностной обработки вязких битумов и катионных эмульсий движение транспорта можно открывать сразу. При открытии движения необходимо обеспечить в течение первых 10 суток тщательный уход за поверхностной обработкой. Для сохранения нормальных условий формирования обработки, ско-

рость движения в этой период, должна быть ограничена до 40 км/час и необходимо организовать регулирование движения по ширине проезжей части. Незакреплённый щебень должен быть удалён с покрытия не позднее 1 суток после открытия движения. Дефектные места следует немедленно исправить.

Выводы.

В процессе утраты битума верхним слоем при движении транспортного потока и диффузии вяжущего из нижних слоев покрытия его концентрация на поверхности всегда будет минимальной, что приводит к снижению работоспособности покрытия.

Концентрацию битума в верхнем слое менее 50 % от первоначальной следует считать критической и соответствующей протеканию процессов разрушения.

При увеличении интенсивности вымывания битума в 2 раза достижение 50 %-ной концентрации битума происходит в 4 раза быстрее.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. Введение в теорию. М.: Наука, 1977. 439 с.

Информация об авторах

Подольский Владислав Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

E-mail: ecodor@bk.ru

Воронежский государственный технический университет.

Россия, 394006, г. Воронеж, 20 лет Октября, д. 84.

Лобода Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, доцент кафедры прикладной математики и механики.

E-mail: lobvgasu@yandex.ru

Воронежский государственный технический университет.

Россия, 394006, г. Воронеж, 20 лет Октября, д. 84.

Аль Адресс Мохаммед Хашим, аспирант кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

E-mail: aladdress@yandex.ru

Воронежский государственный технический университет.

Россия, 394006, г. Воронеж, 20 лет Октября, д. 84.

Поступила в декабре 2017 г.

© Подольский В.П., Лобода А.В., Аль Адресс М.Х., 2017

V.P. Podolsky, A.V. Loboda, M.H. Al Address

PHYSICS- MATHEMATICS MODEL FOR CHECKING OF PREDICTION OF BITUMEN PARTICLES REMOVAL FROM PAVEMENT SURFACE BY TRANSPORTATION LOADS

The bitumen concentration is one of the affecting factors on the service period of surface layers of pavement. Therefore, the study of changes prediction in this concentration is very important when evaluating the service period of pavement including, when using recycle asphalt and bitumen emulsions.

To restore smoothing and leveling of surface layers of pavement, which is consisting organic binder and provided adhesion coefficient of surface treatment. Because of the frequency of the bitumen losing speed, the road serviceability is decrease during operation. Therefore, it is necessary determine the losing rate.

Keywords: *treatment of surface layers of pavement, concentration of bitumen, diffusion, catio-active emulsified.*

Information about the authors

Vladslav P. Podolsky, PhD, Professor.

E-mail: ecodor@bk.ru

Voronezh state technical university.

Russia, 394006, Voronezh, st. 20 let October, 84.

Alexander V. Loboda, PhD, Professor.

E-mail: lobvgasu@yandex.ru

Voronezh state technical university.

Russia, 394006, Voronezh, st. 20 let October, 84.

Mohammed Hashim Al Address, Postgraduate student.

E-mail: aladdress@yandex.ru

Voronezh state technical university.

Russia, 394006, Voronezh, st. 20 let October, 84.

Received in December 2017