

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2020 г. А.Н. Тиратурян<sup>1,\*</sup>, Е.В. Углова<sup>1,\*\*</sup>, А.А. Ляпин<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет,  
Россия 344000 Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1  
E-mail: \*tiraturjan@list.ru; \*\*uglova.ev@yandex.ru; \*\*\*lyapinaa@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.06.2020; после доработки 22.07.2020  
Принята к публикации 31.07.2020

Изучается актуальная проблема оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд автомобильных дорог. Для решения этой проблемы был разработан энергетический метод, базирующийся на сопоставлении фактической суммарной диссипации энергии в структуре дорожной одежды, определяемой на основе натурных измерений с использованием установки ударного нагружения FWD, и суммарной расчетной энергии диссипации, рассчитываемой с использованием динамической модели напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции. Выполнены экспериментальные исследования, показавшие, что площадь динамической петли гистерезиса и соответственно удельная диссипация энергии зависят от эксплуатационного состояния покрытия дорожной одежды. С использованием математической модели динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства обоснована возможность построения динамических петель гистерезиса для движущейся расчетной нагрузки. Показано, что данный метод позволяет определять проектный энергетический ресурс дорожной одежды, а также ее гамма-процентный остаточный ресурс и остаточный срок службы.

*Ключевые слова:* диссипация энергии, остаточный ресурс, модуль упругости, петля гистерезиса, установка ударного нагружения.

**DOI:** 10.31857/S0130308220100073

### ВВЕДЕНИЕ

Дорожные одежды являются важнейшим элементом любой автомобильной дороги, напрямую воспринимающим воздействие как транспортной нагрузки, так и природно-климатических факторов. Оценка их остаточного ресурса и срока службы является важной задачей, напрямую определяющей их эксплуатационную надежность, комфортность и безопасность для пользователей в течение всего срока эксплуатации. Основным фактором, характеризующим жесткость или несущую способность дорожной одежды в дорожной практике, принят общий модуль упругости на ее поверхности.

Вопросы, касающиеся расчета общего модуля упругости на стадии проектирования и определения в натурных условиях этого показателя, рассмотрены в работах [1—5]. В то же время, в последние годы все очевиднее становится, что анализ состояния дорожной одежды с позиций общего модуля упругости не отвечает реалиям сегодняшнего дня. В первую очередь, при проектировании дорожных одежд данный показатель рассчитывается на основе гипотез линейной теории упругости в статической постановке путем приведения многослойного полупространства к однородному, с использованием расчетных номограмм, что значительно снижает точность этого процесса. В экспериментальных условиях также общий модуль упругости определяется путем прямых измерений с использованием устаревшего оборудования — длиннобазового рычажного прогибомера, обладающего малой производительностью, и низкой точностью при проведении замеров [6—10]. Как уже отмечалось в ряде отечественных и зарубежных работ, оценка структурной прочности дорожных конструкций должна осуществляться только на основе динамических решений теории упругости для многослойных сред, функционирующих под воздействием движущейся нагрузки [11—14]. Причем наибольшую информативность, на наш взгляд, будет иметь анализ полных кривых деформирования дорожных одежд в координатах «напряжение—деформации» или, иными словами, динамических петель гистерезиса, площадь которых представляет собой величину удельной диссипации энергии при воздействии на поверхность дорожной одежды. Ранее удельная или суммарная диссипация энергии рассматривалась преимущественно в работах, касающихся анализа усталостной прочности сталей в мало- и многоцикловых режимах нагружения [15—17]. Также суммарная диссипация энергии использовалась для оценки динамической устойчивости грунтов и прогнозирования долговечности бетонов под воздействием стационарной и нестационарной нагрузок [18—21]. Таким образом, широкое внимание к проблеме анализа структурной прочности различных

видов материалов позволяет предположить, что удельная и суммарная диссипация энергии будут являться эффективным индикатором состояния многослойных дорожных конструкций.

## МЕТОДЫ

В рамках проведения экспериментальных исследований для установления зависимости между удельной диссипацией энергии и фактическим состоянием дорожной конструкции была использована современная установка ударного нагружения FWD PRIMAX 1500 [22—24] для неразрушающего контроля состояния нежестких дорожных конструкций. Конструктивно данная установка представляет собой прицеп со смонтированным на нем механизмом ударного нагружения и балкой с измерительной системой, состоящей из девяти датчиков-геофонов, регистрирующих скорость колебаний точек поверхности покрытия при ударном воздействии. Данная установка позволяет моделировать нагружение в диапазоне от 2 до 130 кН. В рамках проводимых экспериментальных исследований моделировалось воздействие нагрузки от расчетного автомобиля — 115 кН (рис. 1).

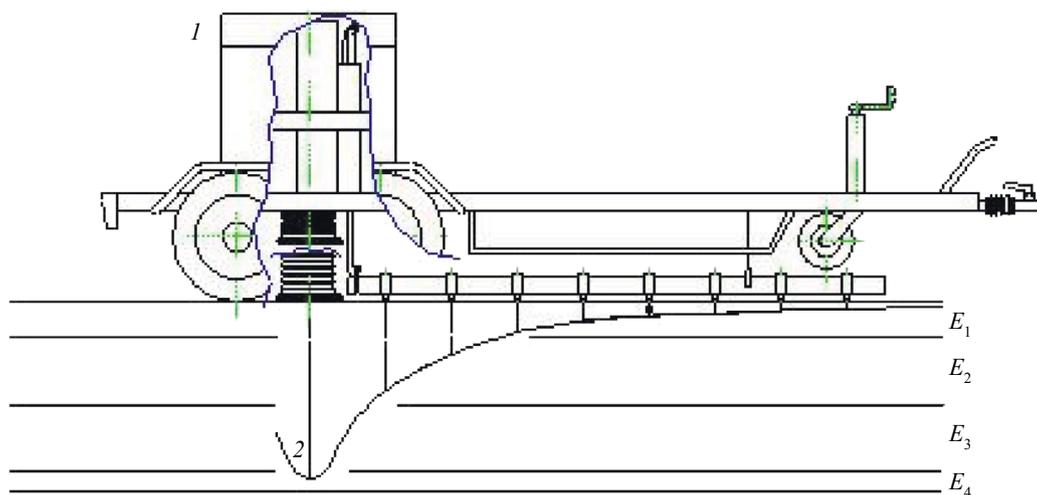


Рис. 1. Установка ударного нагружения FWD PRIMAX 1500:

1 — установка, представляющая собой полуприцеп со смонтированной на нем балкой, оснащенной датчиками-геофонами; 2 — чаша прогибов, регистрируемая при ударном воздействии на покрытие дорожной конструкции,  $E_1—E_4$  — модули упругости, МПа.

Конструкция дорожной одежды на экспериментальном участке автомобильной дороги представлена пакетом слоев асфальтобетона общей толщиной 36 см и слоя неукрепленного основания толщиной 56 см из щебеночно-песчаной смеси, устроенной на дополнительном слое основания из песка. Земляное полотно на данном участке отсыпано из суглинка тяжелого пылеватого с обеспеченным на всем протяжении модулем упругости не менее 45 МПа. Испытания проводились в осенний период (в конце октября). В аналогичные периоды года фиксировалось визуальное состояние обследованного участка. Непосредственно мониторинг технико-эксплуатационного состояния данного участка осуществлялся с 2014 по 2018 гг.

Таблица 1

### Визуальная оценка состояния покрытия обследованного участка

Год эксплуатации	Вид дефектов	Средний балл
2014	Без дефектов	5,0
2015	Без дефектов	5,0
2016	Залитые поперечные одиночные трещины	4,9
2017	Залитые поперечные одиночные трещины	4,9
2018	Продольные центральные трещины; поперечные одиночные трещины (расстояние между трещинами 10—20 м)	4,5

Результаты визуальной оценки представлены в табл. 1.

Как показали результаты визуального обследования участка мониторинга, первые дефекты покрытия начали проявляться на третий год его эксплуатации в виде редких поперечных трещин, заливка которых осуществлялась в рамках содержания. Наиболее явно деструктивные процессы проявились на асфальтобетонном покрытии на 5-й год эксплуатации в виде частых продольных и поперечных трещин.

Замеры установкой ударного нагружения FWD осуществлялись в заранее зафиксированных 15 точках, закрепленных для обеспечения сопоставимости измерений, осуществляемых в ходе эксплуатации участка.

Результаты оценки прочности на обследованном участке представлены на рис. 2.

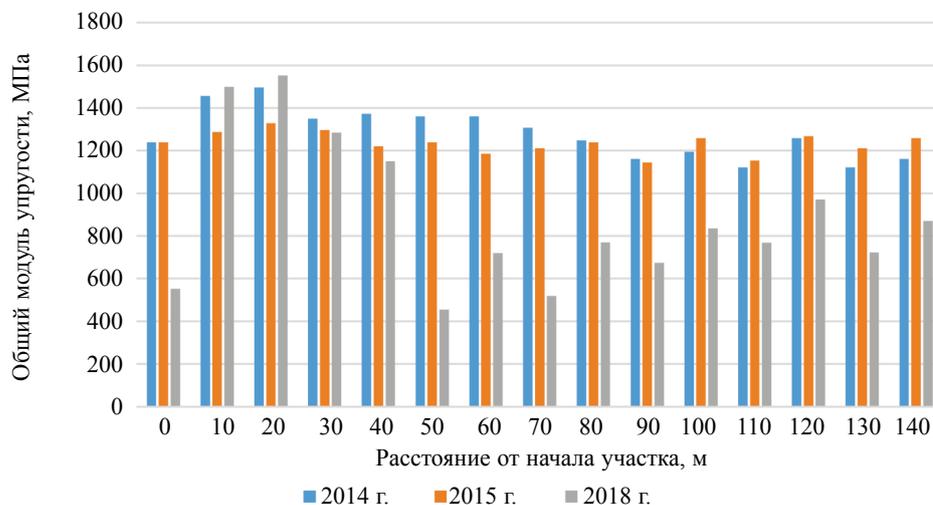


Рис. 2. Изменение общего модуля упругости дорожной одежды на участке мониторинга в процессе эксплуатации.

Оценка общего модуля упругости дорожной одежды на обследованном участке показала, что в начале его эксплуатации (1—2 год) его фактическая несущая способность изменялась незначительно, частично даже превышая значения общих модулей упругости в начале эксплуатации участка за счет процессов старения вяжущего в слоях асфальтобетона, до уплотнения слоев основания и грунта земляного полотна. Однако на 5-й год эксплуатации данного участка отмечается резкое снижение общей прочности дорожной одежды, что является причиной и в свою очередь подтверждается резкой интенсификацией процессов дефектообразования, установленной на покрытии дорожной одежды, при его визуальном обследовании.

Вместе с тем, как уже было отмечено выше, более полную характеристику работы дорожной конструкции, учитывающую потери энергии в структуре дорожной конструкции, обусловленные проявлением вязкоупругих свойств ее слоев, а также наличием в них аномалий и разрушений, можно получить на основе анализа динамических петель гистерезиса, также регистрируемых данной установкой. Результаты регистрации динамических петель гистерезиса, регистрируемых при ударном нагружении на покрытии дорожной одежды в 2014, 2015 и 2018 гг., представлены на рис. 3, 4, 5.

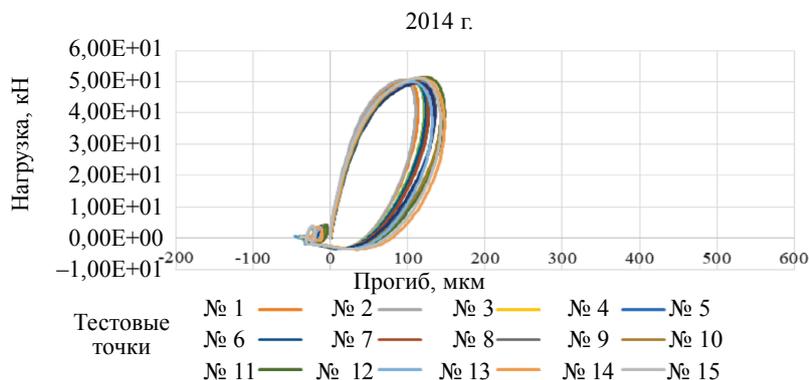


Рис. 3. Экспериментальные динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на участке мониторинга в 2014 г.

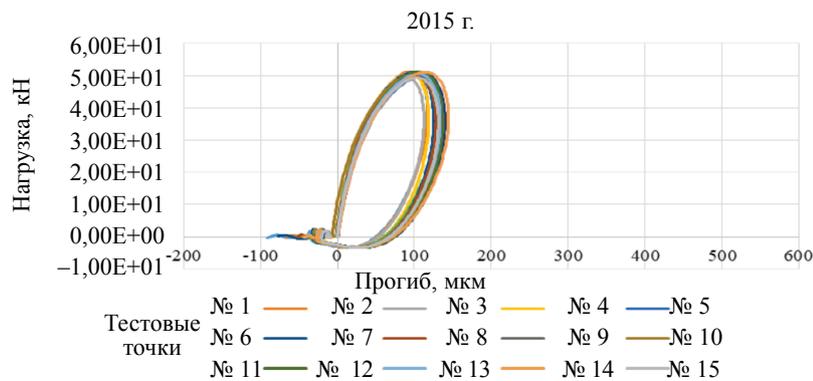


Рис. 4. Экспериментальные динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на участке мониторинга в 2015 г.

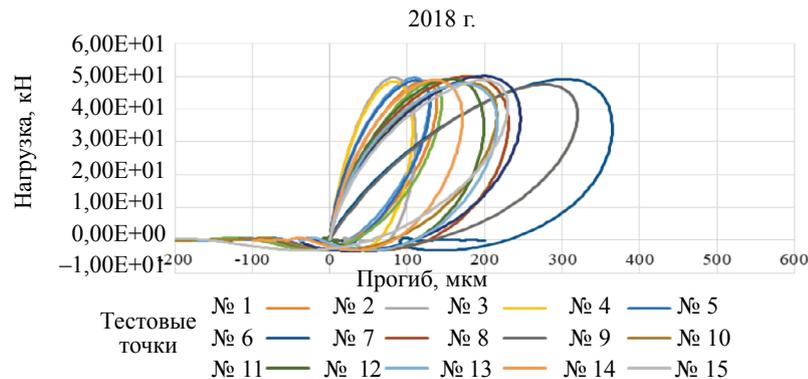


Рис. 5. Экспериментальные динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на участке мониторинга в 2018 г.

Форма петель динамического гистерезиса, регистрируемых на поверхности дорожной конструкции в течении первых двух лет эксплуатации, характеризуется однородностью и примерно одинаковой площадью, составляющей  $4,33\text{--}4,51 \text{ Дж/м}^3$ . Анализ аналогичных результатов за 5-й год эксплуатации данного участка показывает их значительную неоднородность, выражающуюся как в изменении непосредственно траекторий нагрузки и разгрузки при динамическом нагружении, так и общей площади динамических петель гистерезиса, изменяющейся в диапазоне  $3,47\text{--}11,73 \text{ Дж/м}^3$ .

Результаты представлены в табл. 2.

Таким образом, экспериментально обосновано, что удельная диссипация энергии на поверхности дорожной одежды связана с ее эксплуатационным состоянием. Так, ухудшение состояния дорожной одежды, визуально проявляющееся в возникновении на ее поверхности продольных и поперечных трещин, приводит к увеличению удельной диссипации энергии на поверхности дорожной конструкции и снижению жесткости и уменьшению общего модуля упругости соответственно.

При этом показатель удельной диссипации энергии может быть использован в задачах оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд, так как он достаточно точно отражает и характеризует проявления и изменения механизма вязкоупругого деформирования всей дорожной одежды и отдельных ее слоев при динамическом нагружении.

Разработка метода определения остаточного ресурса дорожной конструкции требует выработки единого подхода к определению расчетной и экспериментальной величины суммарной диссипации энергии за весь ее срок службы на основе анализа динамических петель гистерезиса при воздействии расчетного автомобиля на покрытие дорожной одежды.

Построение динамических петель гистерезиса на этапе расчета дорожной одежды может быть осуществлено с применением математической модели многослойного вязкоупругого полупространства. Данная модель базируется на фундаментальных решениях, полученных в работах Воровича, Глушкова, Белокопя, Селезнева и др. [25].

Таблица 2

Удельная диссипация энергии ударного нагружения, зарегистрированная в ходе мониторинга технико-эксплуатационного состояния участка автомобильной дороги

№ п/п	2014 г.		2015 г.		2018 г.	
	Дж/м <sup>3</sup>	Среднее значение	Дж/м <sup>3</sup>	Среднее значение	Дж/м <sup>3</sup>	Среднее значение
1	4,49		3,86		3,92	
2	3,58		3,91		3,99	
3	3,56		3,78		3,89	
4	3,95		4,15		3,54	
5	4,01		4,43		3,50	
6	3,82		4,57		3,47	
7	3,84		4,49		11,73	
8	4,08	4,33	4,49	4,51	8,00	6,03
9	4,44		4,69		8,66	
10	4,86		5,09		6,40	
11	4,23		4,97		8,07	
12	5,05		4,94		6,64	
13	4,54		4,69		6,89	
14	5,41		5,05		5,49	
15	5,23		4,52		6,31	

Постановка задачи представлена следующим образом. Область  $D$  представляет собой  $N$ -слойное упругое полупространство (см. рис. 2):  $D = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_N$ ,  $D_j = \{x, y \in (-\infty, \infty), z \in (z_{j-1}, z_j)\}$ ,  $z_j = \sum_{i=1}^j h_i$ ; ( $h_1 = 0$ ) —  $j$ -й слой ( $j = 2, \dots, N$ ) (см. рис. 1).

Упругие свойства сред в  $D_j, j = 0, 1, \dots, N$  описываются плотностью  $\rho_j$  и коэффициентами Ламе  $\lambda_j, \mu_j$  или соответственно модулем упругости  $E_j$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_j$ :

$$E_j = \mu_j \frac{3\lambda_j + 2\mu_j}{\lambda_j + \mu_j}, \quad \nu_j = \frac{\lambda_j}{2(\lambda_j + \mu_j)}.$$

По поверхности дорожной одежды осуществляется движение расчетной нагрузки, задаваемой при проектировании нежестких дорожных одежд, в подвижной системе координат. Деформирование среды описывается системой динамических уравнений Ламе, составленных относительно перемещений точек среды.

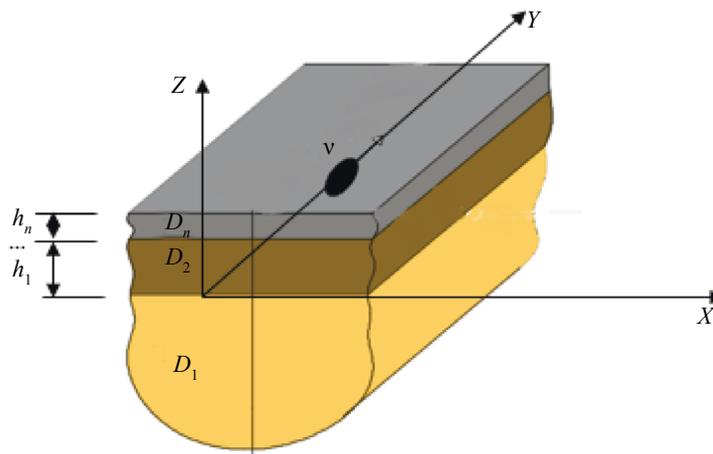


Рис. 6. Математическая модель многослойного полупространства.

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(x, y) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(x, y) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(x, y) = 0, \quad (1)$$

$\theta_{j1}^2 = \omega^2 a^2 / V_{pj}^2$ ,  $\theta_{j2}^2 = \omega^2 a^2 / V_{sj}^2$  — приведенные частоты колебаний;  $V_{pj} = \sqrt{(\lambda_j + 2\mu_j) / \rho_j}$ ,  $V_{sj} = \sqrt{\mu_j / \rho_j}$  — скорости распространения продольных и поперечных волн в  $j$ -й среде.

Вязкость в среде учитывается путем введения тангенсов углов потерь продольных и поперечных волн, определяющих изменение приведенных частот колебаний.

Решение данного уравнения отыскивается на основе интегрального преобразования Фурье и принципа предельного поглощения:

$$\mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\Gamma_1, \Gamma_2} \mathbf{K}(\alpha, \beta, z, \omega) \cdot \bar{\mathbf{T}}(\alpha, \beta) \exp[-i\alpha x - i\beta y] d\alpha d\beta, \quad (2)$$

где  $\bar{\mathbf{T}}(\alpha, \beta)$  — преобразование Фурье от нагрузки  $\mathbf{T}(\mathbf{R})$ ;  $\Gamma_j$  — контур интегрирования, определяемый принципом предельного поглощения.

При решении задачи для режима неустановившихся колебаний или ударного воздействия используется суммирование ряда решений задачи об установившихся колебаниях по методу дискретного гармонического анализа. Набор частот определяется отношением времени динамического воздействия ко времени наблюдения, а также сходимостью процесса суммирования.

Введя подвижную систему координат  $\tilde{x} = x - Vt$ , воспользуемся принципом соответствия, по которому решение задачи с подвижным возмущением со скоростью  $V$  определяется численным интегрированием по (2) с заменой в подинтегральном выражении величины  $\omega$  на  $\omega^* = \omega + V\alpha$ .

Путем дифференцирования по координатам выражения (2) и применения закона Гука аналогично виду (2) в форме двойного интеграла Фурье строится решение для напряжений ( $\sigma_{ij}$ ) и деформаций ( $\epsilon_{ij}$ ) в структуре дорожной конструкций, при этом изменяется вид подинтегральной матрицы  $\mathbf{K}$ .

С использованием представленной модели осуществляется расчет и построение амплитудно-временных характеристик напряжений и деформаций на поверхности дорожной одежды под воздействием расчетной нагрузки, на основе которых, в свою очередь, осуществляется построение динамических петель гистерезиса в координатах:  $\sigma_{xx} - \epsilon_{xx}$ ,  $\sigma_{yy} - \epsilon_{yy}$ ,  $\sigma_{zz} - \epsilon_{zz}$  (рис. 7).

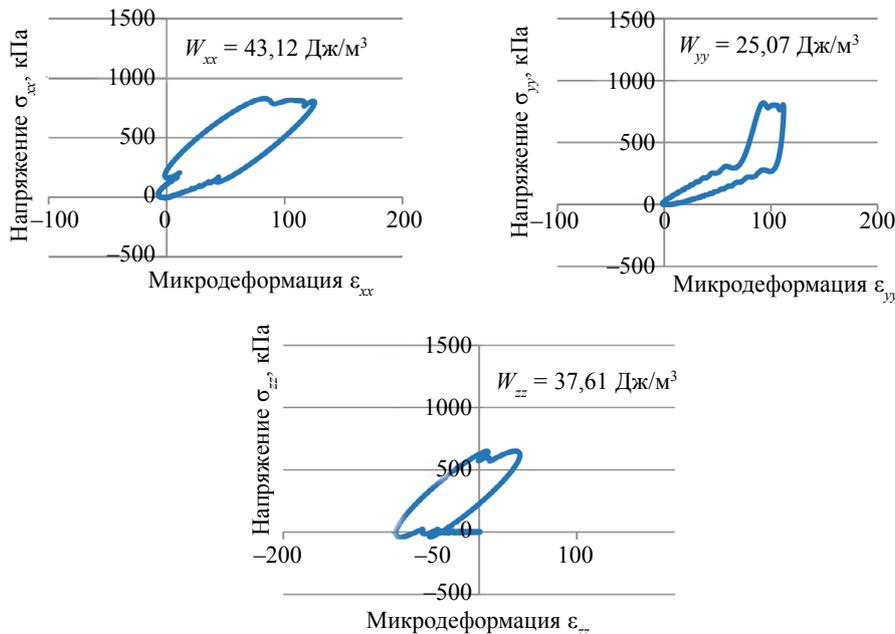


Рис. 7. Расчетные динамические петли гистерезиса на поверхности многослойной среды под воздействием расчетной нагрузки.

Общие потери энергии динамического воздействия за один цикл деформирования определяются как сумма площадей динамических петель гистерезиса в каждой координатной плоскости, а суммарные потери энергии за срок службы определяются путем умножения общих потерь энергии динамического воздействия на суммарное число приложений расчетной нагрузки. Значения касательных напряжений и угловых деформаций, возникающих при динамическом воздействии, чрезвычайно малы, и их доля не превышает 1 % от расчетного значения суммарной потери энергии динамического воздействия от транспортных средств. Учитывая, что дорожные конструкции проектируются с учетом прогнозной интенсивности движения, выражаемой в суммарном числе приложений расчетной нагрузки от транспортного средства, приведенной к 115 кН, определить предельную величину суммарной диссипации энергии  $W^{\text{пред}}$  в ее структуре возможно уже на этапе проектирования по формуле:

$$W^{\text{пред}} = \left( \int_0^{\varepsilon} \sigma_{xx} d\varepsilon_{xx} + \int_0^{\varepsilon} \sigma_{yy} d\varepsilon_{yy} + \int_0^{\varepsilon} \sigma_{zz} d\varepsilon_{zz} \right) \cdot \sum_0^{T_{\text{сл}}} N_p, \quad (3)$$

где  $\sum_0^{T_{\text{сл}}} N_p$  — суммарное число приложений расчетной нагрузки 115 кН за срок службы  $T_{\text{сл}}$  автомобильной дороги.

Для целей определения остаточного ресурса всей дорожной одежды данная величина определяется на поверхности покрытия. Пример построения расчетных динамических петель гистерезиса за единичный проезд расчетного автомобиля с нагрузкой на заднюю ось 115 кН представлен на рис. 7.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация разработанного подхода осуществлялась для существующей дорожной одежды, с расчетным сроком службы 12 лет. Конструкция дорожной одежды включает в себя пакет слоев асфальтобетона толщиной 20 см, слой основания — 64 см, грунт земляного полотна—суглинок тяжелый.

Для каждого года эксплуатации осуществлялся расчет 5 %, 95 % и среднего значения наработки (выражающегося в суммарной удельной диссипации энергии в Дж/м<sup>3</sup>) дорожной одежды за расчетный срок службы (рис. 8).

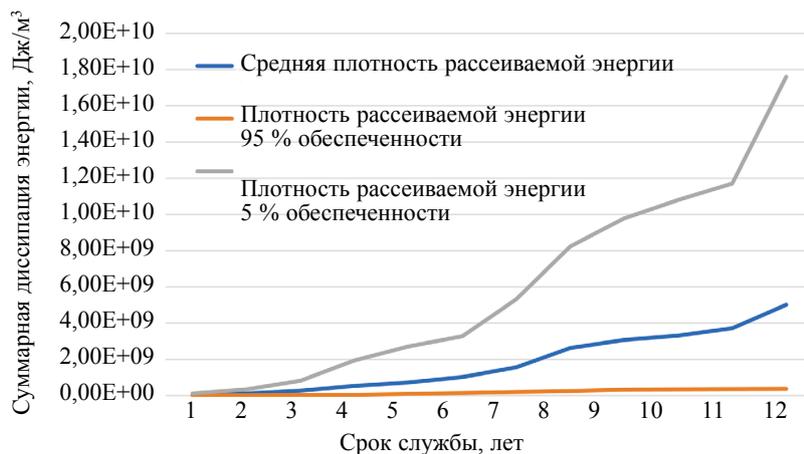


Рис. 8. Расчет показателей 5 %, 95 % и среднего значения наработки дорожной одежды в течении ее срока службы.

Суммарная диссипация энергии 95 % обеспеченности за весь срок службы дорожной одежды составит 2228 МДж/м<sup>3</sup>.

Для расчета остаточного ресурса дорожной конструкции на этапе эксплуатации использовались результаты мониторинга дорожной конструкции, проводимые на стадии ее приемки в 2012 г. и на 5-й год эксплуатации в 2017 г. По результатам натурных измерений в ходе мониторинга были установлены фактические значения модулей упругости и коэффициентов демпфирования слоев дорожной одежды с использованием установки ударного нагружения FWD

(в дальнейшем в расчет принимались их значения 95 % обеспеченности). На основе полученных фактических результатов по математической модели был осуществлен расчет фактической суммарной энергии диссипации:

- 1 год — 13 МДж (проект — 11,61 МДж),
- 5 год — 251 МДж (проект — 203,41 МДж).

Отклонение проектного ресурса дорожной конструкции 95 % обеспеченности от фактического составляет на 1-й год службы — 17 %, а на 5-й год службы — 24 %. В случае, если тренд отклонения фактического ресурса от проектного останется прежним, то предельный объем суммарной рассеянной энергии в структуре дорожной конструкции, составляющий 2087 МДж, будет достигнут уже на 10-й год ее срока службы вместо проектных — 12 лет.

Обеспечить требуемый срок службы при фактических условиях возможно путем своевременного устройства слоя усиления из щебеночно-мастичного асфальтобетона толщиной 2 см (расчет осуществлялся в соответствии с алгоритмом на рис. 6). Необходимо отметить, что устройство слоя такой толщины может быть отнесено к выполнению работ по устройству слоев износа, т.е. к содержанию участка, и при минимальных текущих затратах позволит значительно снизить дисконтированные затраты, возникающие в процессе жизненного цикла дорожной одежды, обеспечив при этом расчетный срок службы дорожной конструкции.

Верификация разработанного подхода осуществлялась на ряде участков федеральных дорог М4 «ДОН» и М1 «Беларусь». Было установлено, что суммарная наработка дорожной конструкции, выражающаяся в суммарной диссипации энергии динамического воздействия, однозначно связана с ее фактическим транспортно-эксплуатационным состоянием. Так, в диапазоне от 0—1000 МДж/м<sup>3</sup> на покрытии отсутствуют либо присутствуют преимущественно не критические дефекты в виде поперечных трещин с большим шагом, в диапазоне от 1000 до 2000 МДж/м<sup>3</sup> проявляются также не критические дефекты, которые тем не менее при несвоевременном ремонте и содержании могут перейти в критические, связанные с утратой несущей способности дорожной конструкции. В диапазоне свыше 2000 МДж/м<sup>3</sup> на поверхности покрытия были зафиксированы критические дефекты в виде сетки трещин или глубокой колеи, требующие капитального ремонта (рис. 9).

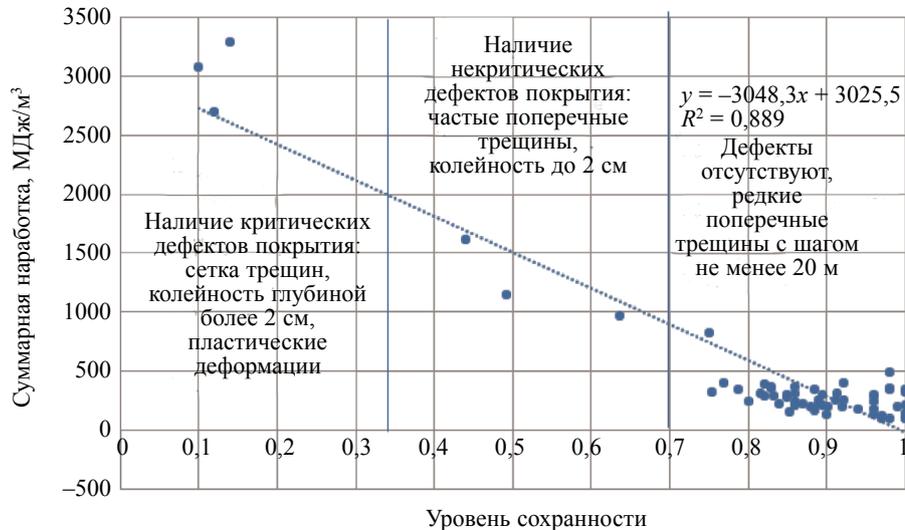


Рис. 9. Результаты верификации разработанного метода на участках эксплуатируемых дорог.

## ВЫВОДЫ

Разработанный метод может быть применен при решении управленческих задач по обеспечению сохранности автомобильных дорог. В первую очередь, на его основе могут приниматься решения о назначении толщины слоя усиления дорожной одежды, что отвечает требованиям мировой дорожной практики [26]. В перспективе предложенный подход может быть применен для разработки концепции жизненного цикла автомобильных дорог, опирающейся

на взаимосвязь удельной и суммарной диссипации энергии, не только со структурными параметрами дорожной одежды и ее слоев, но и с пользовательскими характеристиками, такими как топливные затраты, комфортность движения, шумность и т.д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Н.Н., Калужский Я.А., Корсунский М.Б. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1973. 321 с.
2. Радовский Б.С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. Избранные труды. Киев, 2003. 220 с.
3. Радовский Б.С., Мерзликин А.Е. К чему приводят некоторые упрощения в методике расчета нежестких дорожных одежд по ОДН 218.046-01 // Наука и техника в дорожной отрасли. 2016. № 3. С. 9—12.
4. Красиков О.А. О вычислении среднего модуля упругости многослойной дорожной одежды при расчете ее по критериям сдвига и растяжения при изгибе // Дороги и мосты. 2014. № 2. С. 70—80.
5. Красиков О.А. Особенности расчета и оценки прочности нежестких дорожных одежд на существующие расчетные осевые нагрузки // Дороги и мосты. 2015. № 1. С. 112—128.
6. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing // PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. № 2. P. 111—130.
7. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements // PNRPU Mechanics Bulletin. 2017. № 2. P. 178—194.
8. Assogba O.C. Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement / Road Materials and Pavement Design. 2019. P. 1—31.
9. Копытова М.Г., Гриневич Н.А. Развитие диагностики автомобильных дорог для повышения эффективности ремонтных работ / Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов: посвящается 90-летию Уральского государственного лесотехнического университета (УЛТИ УГЛТА УГЛТУ). УГЛТУ, 2020. С. 212—215.
10. Мальшиев В.А., Пугин К.Г., Шаихов Р.Ф. Математическое моделирование воздействия транспортного средства на конструкцию автомобильной дороги // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 4. С. 34—44. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.04
11. Beskopylny A.N. The Impact of the Conical Indenter on a Plate Laying on a Winkler Foundation. Materials Science Forum // Trans Tech Publications Ltd. 2018. V. 931. P. 84—90.
12. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V. Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2017. V. 117. P. 00018.
13. Le M.T., Nguyen Q.H., Nguyen M.L. Numerical analysis of double-layered asphalt pavement behaviour taking into account interface bonding conditions / CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure. Springer, Singapore, 2020. P. 155—160.
14. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements // PNRPU Mechanics Bulletin. 2017. № 2. P. 178—194.
15. Хромов А.И., Буханько А.А., Патлина О.В. Деформационно-энергетические критерии и разрушение пластических тел в окрестности концентраторов деформаций // Математическое моделирование и краевые задачи. 2008. № 1. С. 342—345.
16. Большухин М.А. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости // Проблемы прочности и пластичности. 2010. № 72. С. 29—35.
17. Фомичев П.А. Энергетический метод расчета долговечности при случайном нагружении / XIII міжнародний колоковіум. Механічна втома металів. 2006. С. 119—127.
18. Вознесенский Е.А., Фуникова В.В., Кушнарёва Е.С. Сейсмическое разжижение грунтов: механизм, последствия и инженерная оценка для целей сейсмического микрорайонирования территории // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 61—65.
19. Вознесенский Е.А., Владов, М.Л., Кушнарёва Е.С. Использование данных сейсмоакустических исследований для оценки динамической устойчивости грунтов в массиве // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 41—46.
20. Бондаренко В.М., Ягунов Б.А. Жесткость и отпорность поврежденного коррозией железобетона, оцениваемые с учетом диссипации энергии // Бетон и железобетон. 2008. № 6. С. 24—28.
21. Sun Y., Fang C., Wang J., Ma Z., Ye Y. Energy-Based Approach to Predict Fatigue Life of Asphalt Mixture Using Three-Point Bending Fatigue Test // Materials. 2018. V. 11.No. 9. P. 1696.
22. Sawangsuriya A., Yindeesuk S., Kanitpong K., Sudajan H. Analysis of flexible pavement structural responses under the falling weight deflectometer / Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 13th, 2019, Perth, Western Australia, Australia. 2019.

23. *Fu G. Zhao Y., Zhou C., Liu W.* Determination of effective frequency range excited by falling weight deflectometer loading history for asphalt pavement // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 235. С. 117792.

24. *George V., Kumar A.* Effect of soil parameters on modulus of resilience based on portable falling weight deflectometer tests on lateritic sub-grade soils // *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2020. V. 14. No. 1. P. 55—61.

25. *Сыромятников П.В.* Матричный метод решения нестационарных задач конвекции-диффузии в полуограниченных многослойных и градиентных средах // *Наука Юга России*. 2018. Т. 14. № 4. С. 3—13.

26. *Huang H., Luo J., Moaveni M., Qamhia I.I., Tutumluer E., Tingle J.S.* Advanced analytical tool for flexible pavement design and evaluation. *Airfield and Highway Pavements 2019: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements — Selected Papers from the International Airfield and Highway Pavements Conference 2019*. 2019. P. 61—71.