

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-55-64

Тиратурян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П.Донской государственный технический университет***E-mail: tiraturjan@list.ru*

ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ КАК КРИТЕРИЙ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Аннотация. Проанализированы современные подходы к оценке эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги. Отмечена необходимость совершенствования критериев, характеризующих состояние автомобильной дороги на данном этапе, учитывающих как структурные свойства дорожной одежды, так и функциональные параметры, отражающие комфорт и безопасность пользователей. В качестве основного показателя состояния автомобильной дороги на эксплуатационной стадии жизненного цикла предложен показатель – суммарная диссипация энергии. Рассмотрена возможность использования показателя «суммарная диссипация энергии» – как интегрального критерия характеризующего эксплуатационную стадию жизненного цикла автомобильной дороги, учитывающего совокупное влияние транспортных нагрузок, структурного состояния дорожной одежды и влияние различных видов управляющих воздействий на изменение продолжительности ее срока службы и представлены результаты моделирования влияния управляющих воздействий в виде ремонта на изменение фактической кривой суммарной диссипации энергии, сформулированы перспективы развития данного показателя, как основного, для реализации методики «life-cycle assessment», предполагающей выделение из общей суммарной диссипации энергии – «опасной» энергии, затрачиваемой на разрушение дорожной одежды автомобильной дороги, а также доли энергии коррелирующей с топливными затратами пользователей, и акустическим загрязнением окружающей среды от транспортного потока. Определены направления развития соответствующих математических моделей для решения поставленных задач.

Ключевые слова: Транспортный поток, моделирование, диссипация энергии, расчетная нагрузка, жизненный цикл, состояние конструкции, многослойное полупространство

Введение. Автомобильные дороги являются важными инженерными и социально-экономическими объектами, призванными обеспечивать как безопасность и удобство пользователей, передвигающихся по ним, так и устойчивое развитие регионов их проложения. В современном понимании устойчивое развитие – это комплексный процесс, учитывающий, как технологические, так и социально-экономические и экологические факторы, направленные на удовлетворение потребностей человека. В этой связи традиционная парадигма исключительно-технических решений, принимаемых на разных этапах функционирования автомобильной дороги, должна быть дополнена понятием анализа жизненного цикла «life cycle assessment» на основе которой становится возможной оценка всех или части вышеуказанных факторов.

Жизненный цикл автомобильной дороги может включать в соответствии с [1] включает в себя этапы производства материалов, выбора и обоснования рационального типа дорожной одежды и покрытия, ее конструирования и расчета необходимого для обеспечения заданного межремонтного срока службы, строительства, эксплуатации и технического обслуживания (содержания), а также завершения срока службы на

котором может быть выполнен капитальный ремонт или реконструкция, либо осуществлен полный демонтаж.

После ввода завершенной строительством автомобильной дороги в эксплуатацию, особое значение принимает эксплуатационная стадия жизненного цикла. Неверные управленческие решения, принимаемые на этом этапе, могут привести к значительной сдвигке фактических межремонтных сроков службы автомобильной дороги и как следствие необходимости выполнения новых работ по строительству в виде внеочередного капитального ремонта.

Следует отметить, что основной причиной недоучета многих негативных факторов, возникающих в процессе эксплуатации автомобильной дороги, является отсутствие комплексного рассмотрения процессов взаимодействия транспортного потока с конструкцией дорожной одежды. Это отмечалось в ряде отечественных и зарубежных работ [2–5]. Обычно в практике диагностики и оценки состояния дорог рассматриваются только показатели продольной и поперечной ровности, а также наличие визуально определяемых дефектов на покрытии, причем даже измере-

ние фактического общего модуля упругости дорожной одежды автомобильной дороги становится чисто факультативным [6–7].



Рис. 1. Жизненный цикл автомобильной дороги

Более оправданным с позиций оценки эксплуатационной стадии жизненного цикла выглядит декомпозиция всех факторов

определяющих эксплуатационную стадию жизненного цикла непосредственно дорожной одежды в следующем виде [1]:

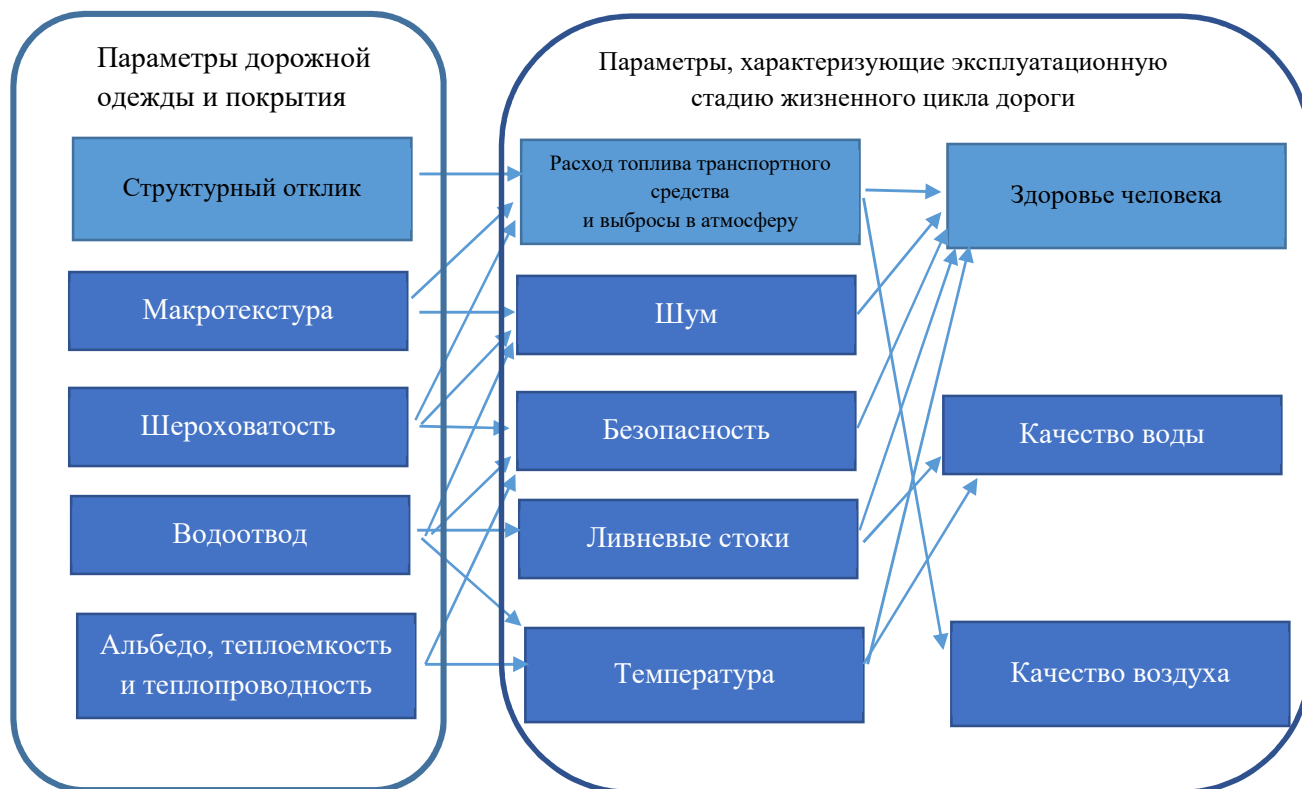


Рис. 2. Связь параметров дорожной одежды и покрытия дороги с параметрами жизненного цикла

Как видно из рисунка 2 в наибольшей степени структурный отклик дорожной одежды,

макротекстура покрытия, и шероховатость оказывают влияние на расход топлива транспортных

средств и выбросы в окружающую среду, а также шум и общую безопасность движения. Нужно отметить, что под структурным откликом здесь понимается напряженно-деформированное состояние, формируемое в дорожной конструкции при воздействии на нее динамической нагрузки. Для изучения ее влияние на расход топлива в зарубежной практике были проведены как экспериментальные, так и теоретические исследования. Экспериментальные исследования проводились в Калифорнии на 17 тестовых участках с заложенными в их конструкцию датчиками напряженно-деформированного состояния и связаны с работами [8–10]. В работах [11–14] рассматривалось численное моделирование динамического напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной конструкции в вязкоупругой постановке, в том числе с учетом различных моделей распределения давления в шинах транспортных средств. В работах [15–18] для характеристик структурного отклика использовалась концепция внешней работы на деформирование среды, подтверждаемая результатами полевых испытаний установками динамического нагружения.

Нельзя также не отметить, что показатели температуры покрытия и воздуха, макротекстуры и шероховатости, также могут быть заданы при численном моделировании в виде эмпирически определяемых коэффициентов, и периодических законов изменения неровности на поверхности покрытия. Все это обосновывает возможность вывода единого интегрального показателя, на основе которого представляется возможным определение основных параметров жизненного цикла автомобильной дороги на эксплуатационной стадии.

Анализ литературы показывает, что большинство интегральных показателей, характеризующих состояние автомобильной дороги являются феноменологическими, базирующимися либо на различных оценках продольной ровности покрытия в единицах IRI, либо на визуальном ее состоянии – показатели PCI, PSI и проч., либо описывают комплексное влияние ровности и дефектов и характеризуют качество движения пользователя по дороге (показатели RCI – riding comfort index, Riding Comfort Rating (RCR)) [19–20] Вместе с тем актуальным видится разработка нового показателя, связывающего эксплуатационное и структурное состояние автомобильной дороги с параметрами жизненного цикла на эксплуатационной стадии, а также с чисто пользовательскими показателями, характеризующими комфорт его передвижения. Общность данного критерия для разных задач позволяет предположить, что наиболее целесообразно определять

его исходя из фактической энергии транспортного средства в дорожную конструкцию, так как энергия является в данном случае наиболее общей и физически понятной мерой характеризующей состояние объекта.

Методы. Суммарное воздействие транспортного потока на автомобильную дорогу может быть выражено в виде суммарной работы по ее деформированию A . Которая может быть записана в виде:

$$A = \int_0^t F(t)u(t)dt; \quad (1)$$

где $F(t)$ – импульс силы от прикладываемой нагрузки,

$u(t)$ – амплитудно-временная характеристика деформирования поверхности покрытия автомобильной дороги.

В соответствии с законом сохранения энергии, связывающем удельную работу с полной энергией деформирования W , можно записать:

$$\int_0^t F(t)u(t)dt = \int_0^t \sigma(t)\varepsilon(t)dt \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ – импульс силы от прикладываемой нагрузки,

$\varepsilon(t)$ – амплитудно-временная характеристика деформирования поверхности покрытия автомобильной дороги.

Правая часть уравнения также описывает диссипацию энергии, происходящую в теле.

Диссипация энергии напрямую связана с топливными затратами пользователей автомобильных дорог, так является показателем интегрально объединяющем свойства как источника нагружения, так и среды, по которой он движение осуществляет. Очевидно, что топливные затраты пользователей могут быть функцией состояния и в значительной степени связаны как с параметрами источника нагружения, так и с состоянием поверхности, по которой осуществляется движение. Далее будем пренебрегать деформациями источника нагружения считая его бесконечно жестким телом. Тогда суммарная диссипация энергии деформирования может быть представлена в виде:

$$W = W_{cmp} + W_{кач} \quad (3)$$

где W_{cmp} – диссипация энергии в структуре среды, по которой перемещается источник колебаний;

$W_{кач}$ – диссипация энергии связанная, исключительно с сопротивлением качению источника колебаний.

В свою очередь

$$W_{сmp} = E_{упр} + E_{в.тр} + E_{разр} + E_m \quad (4)$$

$E_{упр}$ – энергия упругого деформирования;

$E_{в.тр}$ – энергия, рассеиваемая за счет вязкого трения в материале;

$E_{разр}$ – энергия, рассеиваемая из-за разрушений и дефектов во внутренней структуре материала;

E_m – энергия, рассеиваемая в виде тепла.

Аналогично диссипация энергии качения можно записать в виде:

$$W_{кач} = E_{неровн} + E_{текс} + E_{акуст} + E_m, \quad (5)$$

где $E_{неровн}$ – диссипация энергии связанная с макронеровностями;

$E_{текс}$ – диссипация энергии, связанная с впадинами микрошероховатости;

$E_{акуст}$ – энергия, рассеиваемая в акустических волн.

Таким образом определение диссипации энергии за срок службы автомобильной дороги может позволить осуществить прогноз и оценку топливных затрат пользователей исходя из состава и интенсивности транспортного потока.

Результаты и обсуждение. Энергия диссипации за цикл деформирования может быть рассчитана в соответствии с методами изложенными в [21] по математической модели динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства. В качестве примера ниже представлены результаты расчета компонент напряженно-деформированного состояния многослойной среды при воздействии на ее поверхность нагрузки величиной $F=57.5$ кН, равномерно распределенной по круговому отпечатку колеса $D=300$ мм, со скоростью 60 км/ч.

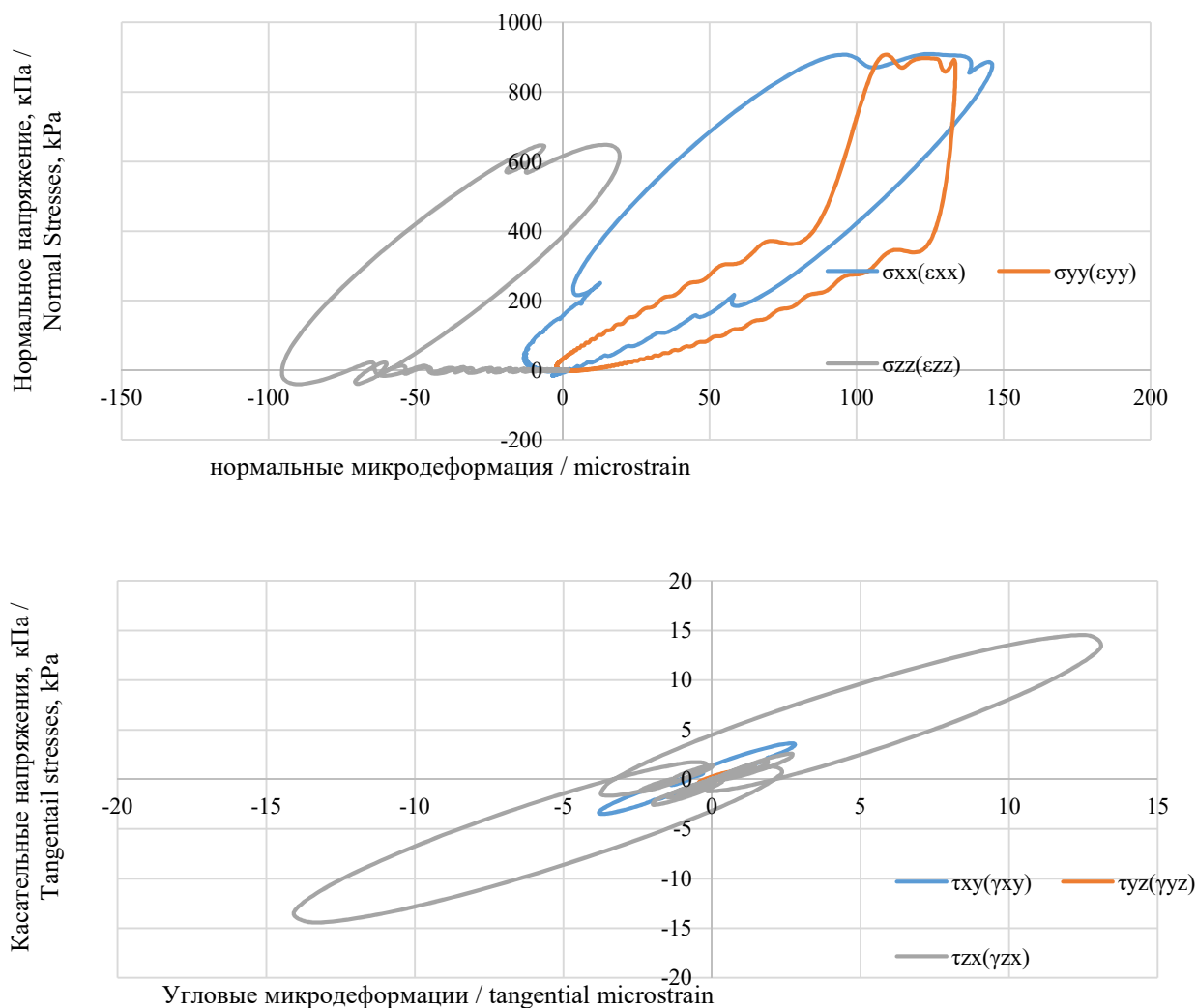


Рис. 3. Петли гистерезиса на поверхности дорожной одежды автомобильной дороги

Количественные значения величины удельной диссипации энергии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Величина удельной диссипации энергии за единичный проезд расчетного автомобиля

Удельная диссипация энергии, Дж/м ³					
$\sigma_{xx}(\varepsilon_{xx})$	$\sigma_{yy}(\varepsilon_{yy})$	$\sigma_{zz}(\varepsilon_{zz})$	$\tau_{xy}(\gamma_{xy})$	$\tau_{yz}(\gamma_{yz})$	$\tau_{zx}(\gamma_{zx})$
60.998	34.1223	31.884	0.008	0.001	0.18

Учитывая, что известна удельная диссипация энергии за цикл деформирования возможно посчитать полную суммарную диссипацию энергии за весь срок службы как:

$$W^{полн} = W \sum_{i=1}^{T_{сл}} N_p, \quad (6)$$

где $W^{полн}$ – суммарная диссипация энергии деформирования за срок службы автомобильной дороги;

$\sum_{i=1}^{T_{сл}} N_p$ – суммарное количество приложений расчетной нагрузки;

W – энергия деформирования за единичный цикл нагружения.

Ниже представлены примеры расчета энергии деформирования дорожных одежд на автомобильных дорогах на эксплуатационной стадии жизненного цикла построенные для ряда участков автомобильной дороги М4 «ДОН».

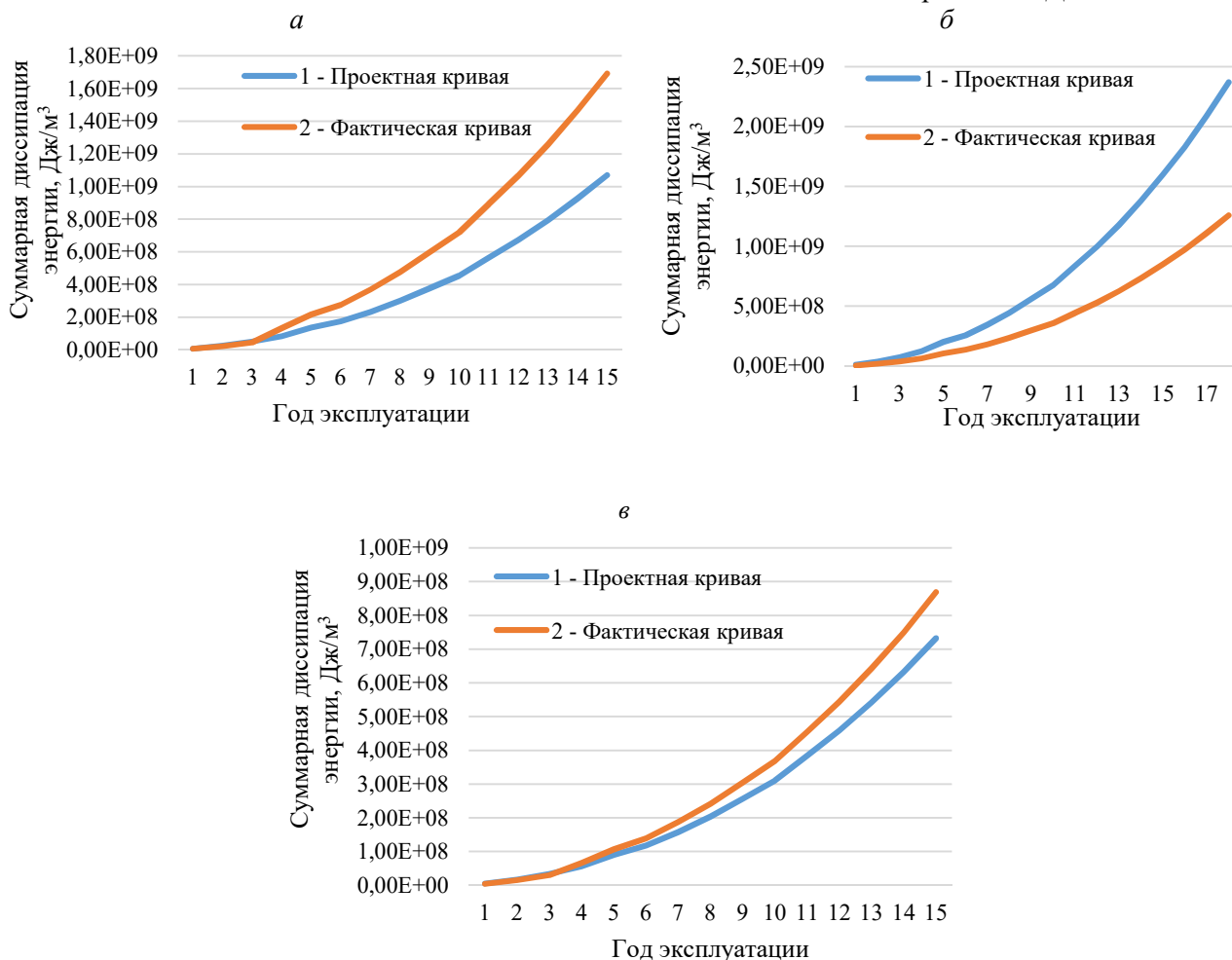


Рис. 4. Прогнозирование суммарной диссипации энергии деформирования на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги (а – участок М4 «ДОН» км 877+000 – 892+000, б – участок М4 «ДОН» км 492+000 – 517+000, в – участок М4 «ДОН» км 1373+000 – 1383+000)

Как видно фактическая кривая суммарной диссипации энергии на графиках а и б (рисунок

4) проходит выше, чем проектная кривая, рассчитанная исходя из проектных значений фактического суммарного числа приложений расчетных

нагрузок и проектных значений расчетных механических параметров слоев дорожной конструкции. Такое расположение кривых свидетельствует о возможном преждевременном исчерпании проектного ресурса на участках дорог км 877+000-892+000 и км 1373-1383. Обратная ситуация наблюдается на участке км 492+000 – 517 + 000, конфигурация кривых на нем позволяет предположить, что его срок службы будет обеспечен, даже без применения управляющих воздействий.

В качестве видов управляющих воздействий, принимаемых на эксплуатационной стадии жизненного цикла, могут быть выполнены работы по восстановлению изношенных верхних

слоев покрытий, относимые к содержанию, работы по замене слоев покрытий в рамках ремонта, а также выполнение капитального ремонта, при полном исчерпании ресурса. Моделирование влияния на изменение проектной кривой диссипации энергии каждого вида ремонтных работ возможно, только при наборе статистики, предполагающей мониторинг изменения прочности и продольной ровности после каждого вида ремонтных мероприятий. Однако теоретически влияние ремонтных работ может быть оценено для случая требуемых показателей, регламентированных СТО АВТОДОР 10.2-2014 для дорог Государственной компании (таблица 2).

Таблица 2

Требования по продольной ровности покрытия в течении гарантийного периода ГК АВТОДОР

Категория дороги	Гарантийный период					Ремонт	Постгарантийный срок				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
I	1.4	1.6	1.9	2.2	2.6		1.4	1.6	1.9	2.2	2.6
II	1.7	1.9	2.2	2.5	2.9		1.7	1.9	2.2	2.5	2.9

Эти проектные значения продольной ровности покрытия в течение эксплуатационной стадии жизненного цикла дороги могут быть учтены как путем математического моделирования неровности покрытия с заданными параметрами, так и в соответствии с методикой учета продольной ровности в единицах IRI при расчете суммарного числа приложений расчетной нагрузки, разработанной А.С. Коноревым [22].

Рассмотрим результаты моделирования эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги на участке 877-892, если в качестве основного вида управляющих воздействий будет приниматься только ремонт, предполагающий восстановление продольной ровности покрытия для дороги I категории в идеальном случае до IRI=1.4 (рисунок 5).

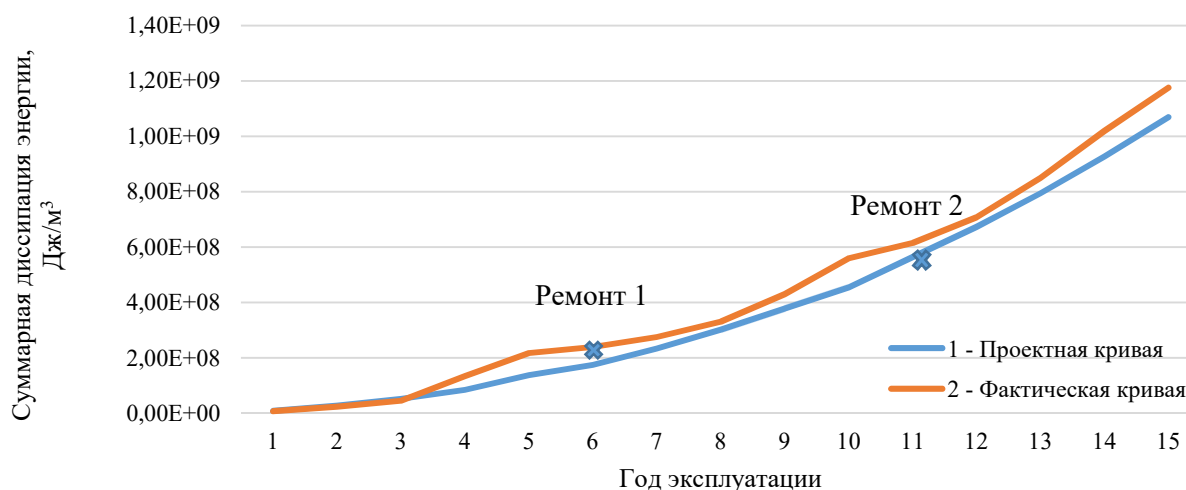


Рис. 5. Суммарная диссипация энергии с учетом выполнения работ по ремонту покрытия на 5-й и 10-й год эксплуатации на участке км 877+000 – 892+000

Таким образом, как видно на представленном рисунке ремонтные работы позволяют значительно сблизить фактическую и проектную кривую изменения суммарной диссипации энергии деформирования в течении эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги. А сам показатель суммарная диссипация энергии эффективно характеризует совокупное

влияние транспортных нагрузок, структурное состояние дорожной одежды и влияние различных видов управляющих воздействий на изменение продолжительности ее срока службы.

В заключении следует отметить, что из суммарной диссипации энергии деформирования, определяемой на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги могут

быть выделены составляющие характеризующие как происходящие в дорожной одежде автомобильной дороги структурные процессы (такие как – развитие трещин, процессы разупрочнения и доуплотнения), так и топливные затраты, и величину акустического загрязнения, что следует из зависимостей (1-3). Несомненно, решение подобного класса задач потребует совершенствования существующих математических моделей и подходов. Так в части выделения «опасной» энергии деформирования необходимо совершенствование аналитических решений задачи определения динамического напряженно-деформированного состояния многослойной среды с учетом граничных условий, описывающих изменение напряжений и перемещений в области возникновения вертикально и горизонтально ориентированных трещин, и иных видов разрушений и пластических деформаций. С точки зрения адаптации предлагаемого подхода к решению задач прогнозирования топливных затрат и акустического загрязнения, необходимо совершенствование подходов к решению контактных задач взаимодействия между колесом транспортного средства с покрытием, с учетом микро- и макрошероховатости, а также проведение комплекса экспериментальных исследований направленных на установление зависимостей между жесткими свойствами дорожной конструкции, которые могут быть зарегистрированы в полевых условиях и фактическим топливными затратами пользователей.

Выводы:

- Обоснована возможность использования показателя «суммарная диссипация энергии» - как интегрального критерия характеризующего эксплуатационную стадию жизненного цикла автомобильной дороги, учитывающего совокупное влияние транспортных нагрузок, структурного состояния дорожной одежды и влияние различных видов управляющих воздействий на изменение продолжительности ее срока службы.
- Впервые представлены результаты моделирования влияния управляющих воздействий в виде ремонта на изменение фактической кривой суммарной диссипации энергии, и обоснована возможность количественной оценки данного показателя на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги;
- Сформулированы перспективы развития данного показателя, как основного, для реализации методики «life-cycle assessment», предполагающей выделение из общей суммарной диссипации энергии – «опасной» энергии, затрачиваемой на разрушение дорожной одежды автомобильной дороги, а также доли энергии, коррелирующей с топливными затратами пользователей,

и акустическим загрязнением окружающей среды от транспортного потока. Определены направления развития соответствующих математических моделей для решения поставленных задач.

***Благодарности.** Исследования проводятся в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (заявка МК-242.2022.4.).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Harvey J., Meijer J., Ozer H., Al-Qadi I. L., Saboori A., Kendall A. Pavement life cycle assessment framework // United States. Federal Highway Administration. 2016. Vol. 1(42). 246 p.
2. Elshamy M.M.M, Tiraturyan A.N., Uglova E. V., Zakari M. Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models // Advanced Engineering Research. 2022. Vol. 22(3). Pp. 272–284. DOI:10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284
3. Elshamy M.M.M. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Vol. 1614(1). 012099. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012099
4. Sharma M., Kumar P., Suman S. K. A review of pavement condition rating models for flexible pavements // Int Res J Eng Technol. 2019. Vol. 6. Pp. 2218–2223.
5. Tiraturyan A.N. New approach to technical monitoring of the condition of flexible roadway pavements // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering. 2019. Vol. 43(3). DOI: 10.25987/VSTU.2019.54.2.011
6. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2022. Vol. 19 №4(86). С. 570–583. DOI:10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583
7. Жустарева Е.В., Орлова А.И. Совершенствование методики комплексной оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог с учетом современных средств измерения продольной ровности // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. №. 4 (26). С. 9–16.
8. Coleri E., Harvey J.T., Zaabar I., Louhghalam A., Chatti, K. Model development, field section characterization, and model comparison for excess vehicle fuel use attributed to pavement structural response // Transportation Research Record. 2016. Vol. 2589 (1). С. 40–50.

9. Harvey J., Lea J. D., Kim C. Preliminary Results of Simulation of Annual Excess Fuel Consumption from Pavement Structural Response for California Test Sections. Submitted for presentation and publication at the 95th TRB Annual Meeting, Paper reference. 2016. No. 16–6932.
10. Harvey J., Kendall A., Lee I. S., Santero N., Van Dam T., Wang T. 2010. Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines. UCPRC-TM-2010-03. University of California, Davis, CA. 64 p.
11. Shakiba M. Ozer, H., Ziyadi, M., & Al-Qadi, I. L. Mechanics based model for predicting structure-induced rolling resistance (SRR) of the tire-pavement system // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2016. T. 20. C. 579–600. DOI:10.1007/s11043-016-9313-0
12. Liu X., Al-Qadi I. Integrated vehicle–tire–pavement approach for determining pavement structure–induced rolling resistance under dynamic loading // *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676(5). Pp. 398–409. DOI:10.1177/03611981211067797
13. Zhou Q., Al-Qadi I. L. Economic and Environmental Impacts of Platoon Trucks on Pavements // *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676 (10). Pp. 460–473. DOI:10.1177/0361198122109024
14. Said I., Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer and Adrian Ricardo Archilla. Impact of dynamic loading on confined asphalt Concrete surface // *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676(7). Pp. 249–263. DOI:10.1177/03611981221077998
15. Estaji M., Coleri E., Harvey J.T., Butt A.A. Predicting excess vehicle fuel use due to pavement structural response using field test results and finite element modelling // *International Journal of Pavement Engineering*. 2021. Vol. 22(8). Pp. 973–983. DOI:10.1080/10298436.2019.1655563
16. Liu X., Al-Qadi I. L. Development of a simulated three-dimensional truck model to predict excess fuel consumption resulting from pavement roughness // *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2675(9). Pp. 1444–1456. DOI:10.1177/03611981211007849
17. Ziyadi M. Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. // *Road Materials and Pavement Design*. 2022. Vol. 24(3). Pp. 1–22. DOI:10.1080/14680629.2022.2027264
18. Ahmed F. Thompson J., Kim D., Carroll E., Huynh N. Cost-effectiveness of performing field investigation for pavement rehabilitation design of non-interstate routes // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2021. Vol. 10(3). Pp. 299–311. DOI:10.1016/j.ijtst.2020.06.001
19. Углова Е.В., Саенко С.С. Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций // *Транспортные сооружения*. 2016. Т. 3. №. 1. С. 6–18. DOI:10.15862/02TS116
20. Uglova E.V., Saenko S.S. Review of longitudinal pavement roughness prediction tools // *Транспортные сооружения*. 2016. Т. 3, №. 4. С. 5–15. DOI:10.15862/05angTS416
21. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A. Model for determining the elastic moduli of road pavement layers. // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 103(3). No. 10308. DOI: 10.34910/MCE.103.8
22. Конорев А.С. Определение величины динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию для расчета значений коэффициентов приведения // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2011. №. 4. С. 118–127.

Информация об авторах:

Тиратурян Артём Николаевич, доктор технических наук, доцент кафедры автомобильные дороги. E-mail: tiraturjan@list.ru. Донской государственный технический университет. Россия, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344002

Семененя-Дусенко Кирилл Иванович, аспирант кафедры автомобильные дороги. E-mail: kirilov-olezhka@mail.ru. Донской государственный технический университет. Россия, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344002

Дунча Патрик Пангон Гислаин, аспирант кафедры автомобильные дороги. E-mail: pdeuntcha@yahoo.com. Донской государственный технический университет. Россия, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344002

Поступила 10.02.2023 г.

© Тиратурян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П., 2023

*Tiraturyan A.N., Semeneyna-Dusenko K.I., Duncha P.P.

Don State Technical University, Rostov Region

*E-mail: tiraturjan@list.ru

ENERGY DISSIPATION AS A CRITERION FOR ANALYZING THE CONDITION OF A HIGHWAY AT THE OPERATIONAL STAGE OF ITS LIFE CYCLE

Abstract. Modern approaches to the assessment of the operational stage of the life cycle of the highway are analyzed. The necessity of improving the criteria characterizing the condition of the highway at this stage, taking into account both the structural properties of the pavement and functional parameters reflecting the comfort and safety of users, is noted. As the main indicator of the condition of the highway at the operational stage of the life cycle, an indicator is proposed – the total energy dissipation. The possibility of using the indicator "total energy dissipation" is considered – as an integral criterion characterizing the operational stage of the life cycle of a highway, taking into account the cumulative effect of transport loads, the structural condition of the pavement and the influence of various types of control actions on the change in the duration of its service life, and the results of modeling the influence of control actions in the form of repairs on the change in the actual curve of total energy dissipation are presented, the prospects for the development of this indicator as the main one, to implement the "life-cycle assessment" methodology, assuming the allocation of the total energy dissipation – "dangerous" energy spent on the destruction of the pavement of the highway, as well as the share of energy correlated with the fuel costs of users, and acoustic pollution of the environment from the traffic flow. The directions of development of the corresponding mathematical models for solving the tasks are determined.

Keywords: Traffic flow, modeling, energy dissipation, design load, life cycle, design condition, multilayer half-space.

REFERENCES

1. Harvey J., Meijer J., Ozer H., Al-Qadi I. L., Saboori A., Kendall A. Pavement life cycle assessment framework. United States. Federal Highway Administration. 2016/ Vol. 1(42). 246 p.

2. Elshamy M.M.M. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models Advanced Engineering Research. 2022. Vol. 22 (3). Pp. 272–284. DOI:10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284

3. Elshamy M.M.M, Tiraturyan A. N., Uglova E. V., Zakari M. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1614. (1). 012099. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012099

4. Sharma M., Kumar P., Suman S. K. A review of pavement condition rating models for flexible pavements. Int Res J Eng Technol. 2019. Vol. 6. Pp. 2218–2223.

5. Tiraturyan A.N. New approach to technical monitoring of the condition of flexible roadway pavements. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering. 2019. Vol. 43(3). Pp. 81–94. DOI: 10.25987/VSTU.2019.54.2.011 (rus)

6. Burtul Yu.V., Kapsky D.V. Modeling the relationship between evenness and strength of non-rigid pavements based on theoretical and practical research [Modelirovanie vzaimosvyazi rovnosti i

prochnosti nezhestkih dorozhnyh odezhd na osnovanii teoreticheskko-prakticheskikh issledovaniy]. Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii. 2022. Vol. 19. No. 4 (86). Pp. 570–583. DOI:10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583 (rus)

7. Zhustareva E.V., Orlova A.I. Improving the methodology for a comprehensive assessment of the transport and operational condition of highways, taking into account modern means of measuring longitudinal evenness [Sovershenstvovanie metodiki kompleksnoj ocenki transportno-ekspluatacionnogo sostoyaniya avtomobil'nyh dorog s uchedom sovremennyh sredstv izmereniya prodol'noj rovnosti]. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2020. Vol. 4(26). Pp. 9–16. (rus)

8. Coleri E., Harvey J.T., Zaabar I., Louhghalam A., Chatti K. Model development, field section characterization, and model comparison for excess vehicle fuel use attributed to pavement structural response. Transportation Research Record. 2016. Vol. 2589. No. 1. Pp. 40–50.

9. Harvey J., Lea J. D., Kim C. Preliminary Results of Simulation of Annual Excess Fuel Consumption from Pavement Structural Response for California Test Sections. Submitted for presentation and publication at the 95th TRB Annual Meeting, Paper reference. 2016. No. 16–6932.

10. Harvey J., Kendall A., Lee I.S., Santero N., Van Dam T., Wang T. Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines. UCPRC-TM-2010-03. University of California, Davis, CA. 2010. 64 p.

11. Shakiba M., Ozer H., Ziyadi M., Al-Qadi I.L. Mechanics based model for predicting structure-induced rolling resistance (SRR) of the tire-pavement system. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2016. Vol. 20. Pp. 579–600. DOI:10.1007/s11043-016-9313-0
12. Liu X., Al-Qadi I. Integrated vehicle–tire–pavement approach for determining pavement structure–induced rolling resistance under dynamic loading *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676 (5). Pp. 398–409. DOI:10.1177/03611981211067797
13. Zhou Q., Al-Qadi I. L. Economic and Environmental Impacts of Platoon Trucks on Pavements. *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676. No. 10. Pp. 460–473. DOI:10.1177/0361198122109024
14. Said I., Al-Qadi I. L., H. Ozer, Archilla A.R. Impact of dynamic loading on confined asphalt Concrete surface. *Transportation Research Record*. 2022. Vol. 2676 (7). Pp. 249–263. DOI:10.1177/03611981221077998
15. Estaji M., Coleri E., Harvey J.T., Butt A.A. Predicting excess vehicle fuel use due to pavement structural response using field test results and finite element modeling. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021. Vol. 22 (8). Pp. 973–983. DOI:10.1080/10298436.2019.1655563
16. Liu X., Al-Qadi I.L. Development of a simulated three-dimensional truck model to predict excess fuel consumption resulting from pavement roughness. *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2675. No. 9. Pp. 1444–1456. DOI:10.1177/03611981211007849
17. Ziyadi M., Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. *Road Materials and Pavement Design*. 2022. Vol. 24. (3). Pp. 1–22. DOI:10.1080/14680629.2022.2027264
18. Ahmed F., Thompson J., Kim D., Carroll E., Huynh N. Cost-effectiveness of performing field investigation for pavement rehabilitation design of non-interstate routes. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2021. Vol. 10. (3). Pp. 299–311. DOI:10.1016/j.ijtst.2020.06.001
19. Uglova E.V., Saenko S.S. Overview of road structure health management tools [Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций]. *Transportnye sooruzheniya*. 2016. Vol. 3(1). Pp. 6–18. DOI:10.15862/02TS116 (rus)
20. Uglova E.V., Saenko S.S. Review of longitudinal pavement roughness prediction tools *Transport facilities*. 2016. Vol. 3 (4). Pp. 5–15. DOI:10.15862/05angTS416
21. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A. Model for determining the elastic moduli of road pavement layers. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 103(3). 10308. DOI: 10.34910/MCE.103.8
22. Konorev A.S. Determination of the magnitude of the dynamic impact of vehicles on the road structure to calculate the values of the reduction coefficients [Определение величины динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию для расчета значений коэффициентов приведения]. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2011. No. 4. Pp. 118–127. (rus)

Information about the authors

Tiraturyan, Artem N. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways. E-mail: tiraturjan@list.ru . Don State Technical University, Russia, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344002

Semenya-Dusenko, Kirill I. Postgraduate student of the Department of highways. E-mail: kirilov-olezhka@mail.ru . Don State Technical University, Russia, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344002

Deuntcha, Pangop Patrick G. Postgraduate student of the Department of highways. E-mail: pdeuntcha@yahoo.com. Don State Technical University, Russia, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344002.

Received 10.02.2023

Для цитирования:

Тиратурян А.Н., Семененя-Дусенко К.И., Дунча П.П. Диссипация энергии как критерий анализа состояния автомобильной дороги на эксплуатационной стадии жизненного цикла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 55–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-55-64

For citation:

Tiraturyan A.N., Semenya-Dusenko K.I., Duncha P.P. Energy dissipation as a criterion for analyzing the condition of a highway at the operational stage of its life cycle. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 6. Pp. 55–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-55-64