

УДК 625.765

DOI 10.18698/0536-1044-2016-8-45-50

# Исследование работы агрегатов ресайклера методом физического масштабного моделирования

В.И. Баловнев<sup>1</sup>, Р.Г. Данилов<sup>2</sup>, Н.Д. Селиверстов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 64

<sup>2</sup> ФГУП «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», 125438, Москва, Российская Федерация, ул. Автомоторная, д. 2

## The Study of Recycler Unit Operation Using Physical Scale Modeling

V.I. Balovnev<sup>1</sup>, R.G. Danilov<sup>2</sup>, N.D. Seliverstov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Russian Federation, Leningradskiy Ave., Bldg. 64

<sup>2</sup> Central Research and Development Automobile and Engine Institute FGUP NAMI, 125438, Moscow, Russian Federation, Avtomotornaya St., Bldg. 2



e-mail: vibalovnev@mail.ru, romdaniilov@mail.ru, seliverstov\_nd@inbox.ru



Одной из перспективных безотходных технологий строительства является ремонт и восстановление автомобильных дорог методами холодного и горячего ресайклинга. Технология предусматривает скоростное восстановление дорожного покрытия одной машиной или комплексом машин, проводящих фрезерование изношенного слоя покрытия, добавление вяжущего, смешивание вяжущего с разрушенным и гранулированным материалом старого покрытия, укладку и уплотнение нового покрытия. Рассмотрены особенности исследования агрегатов ресайклера, применяемого при ремонте и восстановлении дорожных покрытий, на физическом масштабном стенде. Получены формулы для пересчета основных параметров модели на оригинал. Описаны возможности стенда для исследования агрегатов ресайклера (фрезы при работе с различными типами покрытий), процесса фрезерования и стабилизации вяжущим дорожных покрытий, отработки технологии получения новых дорожных покрытий.

**Ключевые слова:** ресайклер, восстановление дорожного покрытия, моделирование, пластическая среда со сцеплением и трением, вязкопластическая среда, оптимизация технологии ресайклинга, сила сопротивления резанию.



One of the promising waste-free technologies in construction is road repair and rebuilding using cold and hot recycling methods. This technology involves high-speed road resurfacing by one, or a set of machines performing milling of the worn-out layer, adding a binder, mixing the binder with the damaged and granular material of the old coating, laying and compacting the new pavement. The authors examine particular features of units of the recycler used for repairing and rebuilding road surfaces, on a physical scale test stand. The formulas for recalculating the main parameters from the model to the original surface are obtained. The paper describes the capabilities of the test stand for studying the recycler units (milling tools when working on various types of surfaces), milling process, stabilization of the road surfaces by the binder, and for developing technologies for new road pavements.

**Keywords:** recycler, road pavement restoration, modeling, plastic environment with cohesion and friction, viscous plastic medium, optimal technical parameters, cutting resistance.

Технология ремонта и восстановления автомобильных дорог методами холодного и горячего ресайклинга, предложенная фирмой Wirtgen, является одной из перспективных безотходных технологий строительства [1, 2]. Технология предназначена для скоростного восстановления дорожного покрытия машиной или комплексом машин, выполняющих фрезерование изношенного слоя покрытия, добавление вяжущего, смешивание вяжущего с разрушенным и гранулированным материалом старого покрытия, укладку и уплотнение нового покрытия. Технология постоянно развивается и совершенствуется. Это связано с применением новых вяжущих на битумной и цементной основе, производством новых асфальтобетонных и других дорожных материалов в ходе регенерации поврежденного покрытия, обеспечения ровности и профиля поверхности, формирования промежуточного слоя (биндера) и слоя основания для модернизированного покрытия.

Цель работы — показать на примере проведенных исследований широкие возможности физического масштабного моделирования для оптимизации технологии ресайклинга (процессов холодного и горячего фрезерования дорожных покрытий; формы и режимов работы рабочих органов ресайклера; фракционного состава в зависимости от видов стабилизаторов; процессов восстановления грунтового основания дорожной одежды и т. д.).

Фрезерование является основным и наиболее энергоемким рабочим процессом прицепных и самоходных дорожных фрез, ресайклеров и технологических комплексов для ремонта и восстановления автомобильных дорог. Режимы

фрезерования, тип, размеры и степень износа режущего инструмента определяют качественные и количественные характеристики этого процесса.

Наиболее эффективное исследование рабочих органов машин и агрегатов, взаимодействующих с материалами, которые имеют различные физико-механические свойства (грунты, строительные материалы, снежно-ледяные образования и др.), обеспечивается при использовании моделирующих физико-математических стендов, включающих в себя грунтовый канал и динамометрическую систему.

Тензометрический испытательный стенд такого типа работает в научно-исследовательской и учебной лаборатории МАДИ [3], которая была организована в 1975 г. на кафедре «Дорожно-строительные машины» под руководством профессора В.И. Баловнева, являвшегося в то время заведующим кафедрой. В настоящее время лабораторией руководит нынешний заведующий кафедрой профессор Г.В. Кустарев.

Стенд состоит из сменных блоков с эквивалентными моделируемыми материалами, передвижного тензометрического агрегата, системы установки сменных моделей рабочих органов и электропривода. Помимо грунтового канала стенд включает в себя систему легкосменных контейнеров с моделируемыми физическими средами (рис. 1). Первый из них содержит эквивалентный материал с любым типом рабочей среды (пластической, вязкопластической, упругой и др.), второй предназначен для автономного разогрева материала (например, асфальтобетона) до требуемой температуры. Первый контейнер более универсален, чем второй,

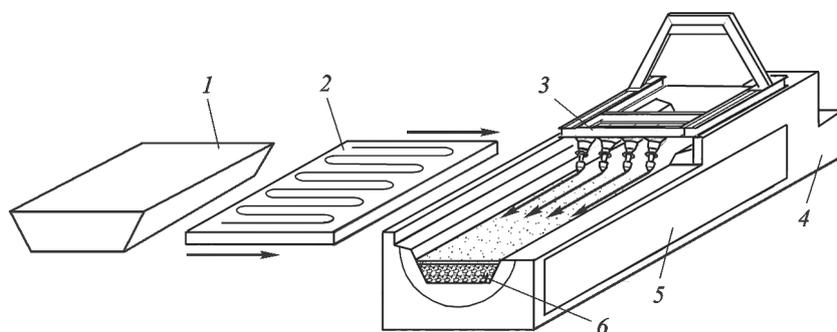


Рис. 1. Схема стенда для физического масштабного моделирования процесса ресайклинга с системой легкосменных контейнеров с моделируемыми материалами:

1 — контейнер с моделью дорожного основания или покрытия; 2 — блок для разогрева материала; 3 — рабочее оборудование с режущими элементами; 4 — электропривод; 5 — грунтовый канал; 6 — контейнер с моделью дорожной одежды

предназначенный для моделирования специальных условий работы. Измерительная система станда полностью компьютеризирована.

В процессе фрезерования под действием сдвигающих усилий происходит отделение поврежденного слоя исследуемого материала заданной толщины от массива покрытия и разрушение материала посредством разрушения связей между составляющими его частицами. Температура покрытия оказывает значительное влияние на прочность связи между минеральными частицами материала и энергоемкость процесса фрезерования. По результатам испытаний определяют показатели эффективности выбранной технологии и режимов фрезерования.

Связи между основными техническими параметрами модели (станда) и оригинала (машины), работающими в одинаковых грунтовых условиях и с равными рабочими скоростями, получены на основании анализа законов механики и теории подобия технических систем и установлены исходя из равенства критериев подобия [4].

Критерии подобия процесса воздействия реза на среду (рис. 2) определяют методом анализа уравнений реологической модели напряженного состояния среды при разрушении, сил и мощности [5, 6].

При установившемся движении зуба уравнение напряженного состояния имеет вид:

для пластической среды со сцеплением (см. рис. 2, б)

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho + C_{\text{сц}}; \quad (1)$$

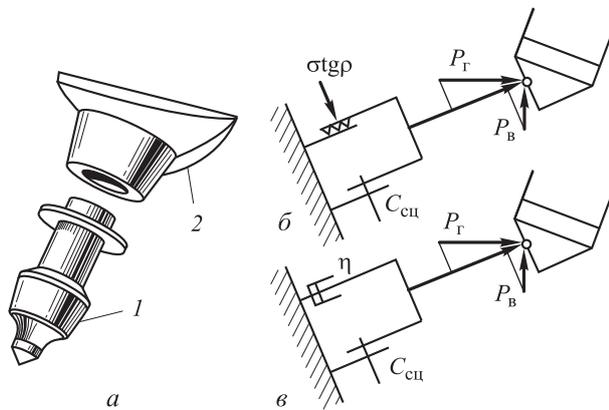


Рис. 2. Схема взаимодействия реза со средой и реологический эквивалент процесса:  
 а — резец фрезы; б — пластическая среда со сцеплением и трением; в — вязкопластическая среда со сцеплением;  
 1 — резец; 2 — тензометрическое гнездо реза

для вязкопластической среды со сцеплением (см. рис. 2, в)

$$\tau = \eta \frac{dv}{dl} + C_{\text{сц}}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — касательные напряжения, Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  — нормальные напряжения, Н/м<sup>2</sup>;  $\operatorname{tg} \rho$  — коэффициент трения;  $C_{\text{сц}}$  — сцепление при сдвиге материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\eta$  — коэффициент вязкого трения, Н·с/м<sup>2</sup>;  $v$  — скорость движения реза.

Сила сопротивления резанию

$$P = \tau l^2, \text{ Н}, \quad (3)$$

а реализуемая мощность

$$N = Pv, \text{ Вт}, \quad (4)$$

где  $l$  — обобщенный линейный размер рабочих элементов исследуемого агрегата, м.

### Моделирование разрушения фрезой пластического материала со сцеплением и трением.

Критерии подобия физической масштабной модели процесса фрезерования пластической среды со сцеплением определяются приведением уравнений (1), (3), (4) к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{C_{\text{сц}}}{\tau}; \quad \Pi_2 = \operatorname{tg} \rho; \quad \Pi_3 = \frac{\sigma}{\tau}; \\ \Pi_4 &= \frac{\tau l^2}{P}; \quad \Pi_5 = \frac{Pv}{N}. \end{aligned} \quad (5)$$

Соответствующие индикаторы подобия позволяют установить связи между масштабами параметров, определяющих свойства процесса, и линейным масштабом агрегата:

$$\begin{aligned} k_C &= k_\tau; \quad k_{\operatorname{tg} \rho} = 1; \quad k_\tau = k_\sigma; \\ k_\tau k_l^2 &= k_P; \quad k_P k_v = k_N. \end{aligned} \quad (6)$$

Из анализа индикаторов подобия (6) для установившегося движения следует равенство масштабов параметров:

$$k_C = k_\tau = k_{\operatorname{tg} \rho} = k_\sigma = k_v = 1.$$

Таким образом, свойства материала и скорость движения зуба не зависят от масштаба линейного размера рабочего органа  $k_l$ .

В этом случае в качестве модели среды может быть использована среда оригинала без изменения свойств

$$C_{\text{сц,м}} = C_{\text{сц,н}}; \quad \tau_m = \tau_n; \quad \operatorname{tg} \rho_m = \operatorname{tg} \rho_n;$$

$$\sigma_m = \sigma_n; \quad v_m = v_n,$$

где для обозначения параметров модели и ори-

гинала (натурного образца) использованы индексы «м» и «н» соответственно.

Силовые и энергетические параметры модели, как следует из выражений (6), зависят от линейного масштаба модели рабочего органа:

$$k_P = k_l^2; \quad k_P = k_N \quad \text{или} \quad k_N = k_l^2.$$

Сила сопротивления резанию  $P_M$  и мощность  $N_M$  модели также зависят от линейного ее масштаба:

$$P_M = \frac{P_n}{k_l^2}; \quad N_M = \frac{N_n}{k_l^2}.$$

Соблюдение рассмотренных условий подобия позволяет на основании экспериментов с моделью рабочих органов ресайклера на стенде определить силу, мощность, ожидаемые в оригинале:

$$P_n = P_M k_l^2; \quad N_n = N_M k_l^2.$$

Гранулометрический состав эквивалентного материала модели должен быть тождественным оригиналу. Количество рыхлящих зубьев модели должно быть не меньше трех. Расположение зубьев позволяет учесть их взаимное влияние на процесс рыхления.

**Моделирование разрушения фрезой вязкопластических материалов.** Для проведения моделирования требуется анализ реологической модели напряженного состояния вязкопластической среды (см. рис. 2, в) по уравнению (2).

Подобие устанавливается по рассмотренным критериям (5) с добавлением критерия подобия

$$\Pi_6 = \eta \frac{v}{l\tau} \quad (7)$$

и индикатора подобия

$$\frac{k_\eta k_v}{k_l k_\tau} = 1. \quad (8)$$

Из условий (7) и (8) следует, что если, как это принято в первом случае, свойства среды оставлять без изменения  $k_\eta = 1$ ;  $k_\tau = 1$ ;  $k_C = 1$ ;  $k_{\text{тг } \rho} = 1$ ;  $k_\sigma = 1$ , то необходимо соблюдать условие

$$\frac{k_v}{k_l} = 1 \quad \text{или} \quad k_v = k_l; \quad \frac{v_n}{v_m} = k_l.$$

При моделировании в этом случае скорость процесса резания на модели необходимо

уменьшать пропорционально линейному масштабу модели  $k_l$ :

$$v_m = \frac{v_n}{k_l}.$$

Переход от параметров модели к оригиналу в случае вязкой среды при  $k_\eta = 1$  осуществляется по формулам

$$k_P = k_l^2; \quad k_N = k_P k_l \quad \text{или} \quad k_N = k_l^3.$$

Следовательно

$$P_n = P_M k_l^3; \quad N_n = N_M k_l^3.$$

Важным элементом стенда является агрегат, обеспечивающий скорость движения резцов при рыхлении. Канатная тяга динамометрической тележки не является системой, подобной оригиналу. Упругость каната будет оказывать динамическое воздействие на резец. Это воздействие исключается путем использования цепного или тягового колесного привода.

## Выводы

1. Стенд для моделирования МАДИ обеспечивает изучение на физических масштабных моделях основных рабочих операций агрегатов ресайклера: фрезерных, смесительных, распределительных, уплотнительных и др.

2. Стенд основан на широком использовании методов физико-математического моделирования и компьютеризации процессов исследования.

3. Использование стенда позволяет оптимизировать технологии ресайклинга (процессы холодного и горячего фрезерования дорожных покрытий [7, 8]; форму и режим работы смесительных рабочих органов ресайклера [9–11]; фракционный состав в зависимости от видов стабилизаторов; процессы восстановления грунтового основания дорожной одежды), определить показатели абразивного износа резцов, а также исследовать инновационные воздействия различных типов и видов на рабочий процесс и эффективность добавки различных вяжущих материалов.

4. Методы физико-математического моделирования обеспечивают решение вопросов, связанных с сокращением затрат на строительство, восстановление, ремонт и реконструкцию автомобильных дорог, а также сокращение времени на создание новых образцов техники и технологий.

## Литература

- [1] Холодный ресайклинг. *Wirtgen — технология холодного ресайклинга*. Winghamen, Wirtgen Gmbh, 2012. 367 с.
- [2] Кустарев Г.В., Селиверстов Н.Д. Пути развития технологий ресайклинга дорожных покрытий в России. *Механизация строительства*, 2015, № 12, с. 4–8.
- [3] Селиверстов Н.Д. Лабораторные стенды для исследования процессов холодного и горячего фрезерования, стабилизации и ресайклинга. *Наука и техника в дорожной отрасли*, 2015, № 4, с. 20–22.
- [4] Баловнев В.И. *Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин*. Москва, МАДИ, 2014. 148 с.
- [5] Баловнев В.И. *Оптимизация и выбор инновационных систем и процессов транспортно-технологических машин*. Москва, Техполиграфцентр, 2014. 320 с.
- [6] Баловнев В.И., ред. *Машины для земляных работ. Конструкция. Расчет. Потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 2.: Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины*. Белгород, Изд-во БГТУ, 2012. 464 с.
- [7] Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Селиверстов Н.Д. Анализ параметров и режимов работы системы агрегатов ресайклера. *Строительные и дорожные машины*, 2014, № 10, с. 45–48.
- [8] Селиверстов Н.Д. Определение оптимального количества режущих элементов для фрезерования слоев асфальтобетонных и грунтовых покрытий. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2015, № 2, с. 40–44.
- [9] Баловнев В.И., Селиверстов Н.Д. Определение параметров фрезерно-гранулирующего смесительного агрегата ресайклера. *Механизация строительства*, 2015, № 2, с. 16–19.
- [10] Баловнев В.И., Селиверстов Н.Д. Обеспечение эффективной работы системы фрезерно-смесительного и уплотнительного агрегатов ресайклеров. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 9, с. 17–22.
- [11] Баловнев В.И., Селиверстов Н.Д. Оптимальные параметры и режимы работы двухвального смесительного рабочего органа ресайклера. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 10, с. 37–40.

## References

- [1] *Kholodnyi resaikling. Wirtgen tekhnologiiia kholodnogo resaiklinga* [Cold recycling. Wirtgen cold recycling technology]. Winghamen, Wirtgen Gmbh, 2012. 367 p.
- [2] Kustarev G.V., Seliverstov N.D. Puti razvitiia tekhnologii resaiklinga dorozhnykh pokrytii v Rossii [Ways of developing the road pavements recycling technology in Russia]. *Mekhanizatsiia stroitel'stva* [Mechanization of construction]. 2015, no.12, pp. 4–8.
- [3] Seliverstov N.D. Laboratornye stendy dlia issledovaniia protsessov kholodnogo i goriachego frezerovaniia, stabilizatsii i resaiklinga [Laboratory stands for research processes of recycling]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli* [Science and Engineering for Highways]. 2015, no. 4, pp. 20–22.
- [4] Balovnev V.I. *Podobie i modelirovanie v sisteme proektirovaniia dorozhno-stroitel'nykh mashin* [The similarity in the design and modeling of the system of road-building machines]. Moscow, MADI publ., 2014. 148 p.
- [5] Balovnev V.I. *Optimizatsiia i vybor innovatsionnykh sistem i protsessov transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Optimization and selection of innovative systems and processes, transport and technological machines]. Moscow, Tekhpolygraftsentr publ., 2014. 320 p.
- [6] *Mashiny dlia zemlianykh rabot. Konstruktsiia. Raschet. Potrebitel'skie svoistva: v 2 kn. Kn. 2. Pogruzochno-razgruzochnye i uplotniayushchie mashiny* [Earth-moving. Design. Calculation. Consumer properties: 2 books. Book 2. Loading unloading and compaction machines]. Ed. Balovnev V.I. Belgorod, BSTU publ., 2012. 464 p.
- [7] Balovnev V.I., Danilov R.G., Seliverstov N.D. Analiz parametrov i rezhimov raboty sistemy agregatov resaiklera [Analysis of the parameters and modes of the system aggregates operation of road recycler]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road building machinery]. 2014, no. 10, pp. 45–48.

- [8] Seliverstov N.D. Opredelenie optimal'nogo kolichestva rezhushchikh elementov dlia frezerovaniia sloev asfal'tobetonnykh i gruntovykh pokrytii [Determination of the optimal quantity of cutting units for milling the asphalt and soil layers]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow State Automobile and Road Technical University]. 2015, no. 2, pp. 40–44.
- [9] Balovnev V.I., Seliverstov N.D. Opredelenie parametrov frezerno-granuliruiushchego smesitel'nogo agregata resaiklera [Determination of the parameters of milling and granulation mixing unit of road recycler]. *Mekhanizatsiia stroitel'stva* [Mechanization of construction]. 2015, no. 2, pp. 16–19.
- [10] Balovnev V.I., Seliverstov N.D. Obespechenie effektivnoi raboty sistemy frezerno-smesitel'nogo i uplotnitel'nogo agregatov resaiklerov [Effective operation support of milling-mixing and sealing units' system of recyclers]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiia* [Repair, Reconditioning, Modernization]. 2015, no. 9, pp. 17–22.
- [11] Balovnev V.I., Seliverstov N.D. Optimal'nye parametry i rezhimy raboty dvukhval'nogo smesitel'nogo rabocheho organa resaiklera [Optimal parameters and operation conditions of two-shaft mixing actuator of recycler]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiia* [Repair, Reconditioning, Modernization]. 2015, no. 10, pp. 37–40.

Статья поступила в редакцию 01.04.2016

## Информация об авторах

**БАЛОВНЕВ Владилен Иванович** (Москва) — доктор технических наук, академик РАТ, профессор кафедры «Дорожно-строительные машины». Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) (125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 64, e-mail: vibalovnev@mail.ru).

**ДАНИЛОВ Роман Геннадиевич** (Москва) — кандидат технических наук, зав. отделом нормативно-технической документации по ВАТ Центра Спецавтомоби. ФГУП «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (125438, Москва, Российская Федерация, ул. Автомоторная, д. 2, e-mail: romdanilov@mail.ru).

**СЕЛИВЕРСТОВ Николай Дмитриевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Дорожно-строительные машины». Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) (125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 64, e-mail: seliverstov\_nd@inbox.ru).

## Information about the authors

**BALOVNEV Vladilen Ivanovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Academician, Russian Transport Academy, Professor, Department of Road Construction Machinery. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (125319, Moscow, Russian Federation, Leningradskiy Ave., Bldg. 64, e-mail: vibalovnev@mail.ru).

**DANILOV Roman Gennadievich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Head of TWV Standards and Specifications Department, Special Vehicles Center. Central Research and Development Automobile and Engine Institute FGUP NAMI (125438, Moscow, Russian Federation, Avtomotornaya St., Bldg. 2, e-mail: romdanilov@mail.ru).

**SELIVERSTOV Nikolai Dmitrievich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Road Construction Machinery. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (125319, Moscow, Russian Federation, Leningradskiy Ave., Bldg. 64, e-mail: seliverstov\_nd@inbox.ru).