

УДК 625.8

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА «MARC-MENTAT»

Фурсенко Владислав Владимирович, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, rd3aou@mail.ru.

Стаин Валерий Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, vamis@yandex.ru.

Аннотация. Стоимость ремонта дорожных одежд зависит, главным образом, от стоимости асфальтобетонных смесей. В настоящее время, в связи со значительным подорожанием энергоресурсов, а также увеличении цен на битумы, минеральные заполнители и транспортировку материалов к месту их использования, вопросы выбора экономных технологий ремонта дорожных одежд приобретают первостепенное значение. В последние десятилетия особое внимание уделяется технологиям холодной регенерации асфальтобетона. Эти технологии широко используются как в России, так и за рубежом. При этом возникает вопрос о влиянии слоёв регенерированного асфальтобетона на прочность и жёсткость отремонтированного дорожного покрытия, возможность образования в нём колеи от транспортной нагрузки. Ответить на этот вопрос можно создав цифровую модель конструкции покрытия. Для создания цифровых моделей конструкций, которые подвергаются различным видам воздействий, в настоящее время широко применяются программные продукты для ЭВМ в виде конечно-элементных комплексов.

Ключевые слова: восстановления прочности дорожной одежды, холодная регенерация асфальтобетона, метод конечных элементов.

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REGENERATED ROAD SURFACES USING THE MARC-MENTAT COMPLEX

Fursenko Vladislav V., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, rd3aou@mail.ru

Stain Valery M., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, vamis@yandex.ru

Abstract. The cost of repairing road clothes depends mainly on the cost of asphalt concrete mixtures. Currently, due to a significant rise in the price of energy resources, as well as an increase in prices for bitumen, mineral aggregates and transportation of materials to the

place of their use, the issues of choosing economical technologies for repairing road clothes are of paramount importance. In recent decades, special attention has been paid to technologies of cold regeneration of asphalt concrete. These technologies are widely used both in Russia and abroad. At the same time, the question arises about the influence of layers of regenerated asphalt concrete on the strength and rigidity of the repaired pavement, the possibility of the formation of a track in it from the transport load. You can answer this question by creating a digital model of the coating structure. To create digital models of structures that are exposed to various types of impacts, computer software products in the form of finite element complexes are currently widely used.

Key words: restoration of pavement strength, cold regeneration of asphalt concrete, finite element method.

Введение. При эксплуатации дорог с асфальтобетонными покрытиями с течением времени возникают многочисленные виды повреждений покрытия - продольные и поперечные трещины (рис. 1, а и б), проломы (рис. 1, в), сдвиги (рис. 1, г), колейность (рис. 1, д), выкрашивание и шелушение (рис. 1, е) и другие.

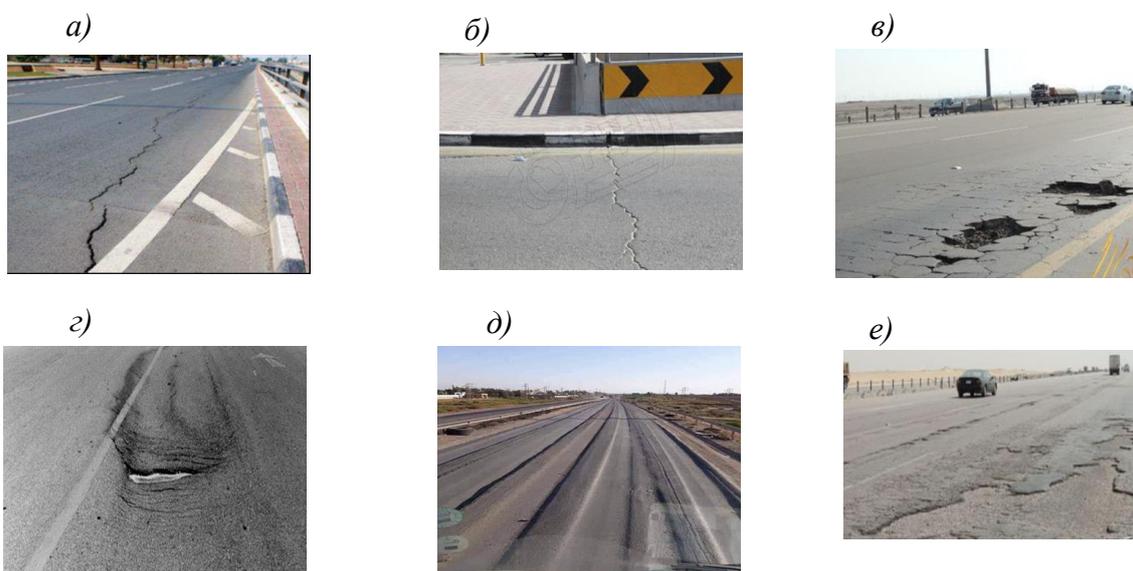


Рис. 1. Виды повреждений асфальтобетонного покрытия: а) продольные трещины; б) поперечные трещины; в) проломы; г) сдвиги; д) колейность; е) выкрашивание и шелушение

Для устранения вышеперечисленных дефектов нежесткого дорожного покрытия требуется их ремонт. Одной из технологий восстановления повреждённого покрытия является его регенерация.

В соответствии с работой [1], технология регенерации конструктивных слоев дорожной одежды заключается в измельчении покрытия (в некоторых случаях с захватом части основания) преимущественно посредством фрезерования; введении в образовавшийся асфальтобетонный гранулят (АГ) при необходимости нового скелетного материала, вяжущего и, если требуется, других добавок; перемешивании всех компонентов с получением асфальтогранулобетонной смеси (АГБ-смеси); распределении её в виде конструктивного слоя и уплотнении, после чего АГБ-смесь превращается в асфальтогранулобетон (АГБ) [1].

В зависимости от вида нового вяжущего, вводимого в АГ при приготовлении АГБ-смесей, их подразделяют на следующие типы [1]:

- А - без добавления вяжущего [1];
- Э - с добавлением битумной эмульсии [1];
- В - с добавлением вспененного битума [1];
- Б - с добавлением разогретого битума [1];
- М - с добавлением минерального вяжущего (чаще всего цемента или извести) [1];
- К - с добавлением комплексного вяжущего (битумной эмульсии или вспененного битума и цемента) [1].

Наилучшие показатели по прочности и стоимости даёт тип АГБ-смеси «М», что следует из расположенной ниже таблицы, где приведено сравнение эффективности различных типов АГБ-смесей [1].

Таблица 1.

Свойства различных типов АГБ-смесей [1]

Тип АГБ-смеси	Марка битума для II-III дорожно-климатической зоны	Места по модулю упругости		Вязущее в %	Цена, 1 м ² /руб
		Место	Модуль упругости при температуре покрытия +20		
М	Портландцемент марки не ниже 400	1	1800	2-4% цемент 1-2% воды	1073,2
К	БНД 60/90; БНД 90/130	2	1400	3% цемент 2-4% эмульсии	1288,0
Э	БНД 60/90; БНД 90/130	3-4	1100	2-4% эмульсии	1203,0
В	БНД 90/130; БНД 130/200			1-2% битума	1150,0
Б	БНД 200/300	5	900	1-2% битума	1088,6
А	-	6	700	-	970,5

В приведённом ниже исследовании на основе расчётов, выполненных в конечно-элементном комплексе «MARC-MENTAT», подтверждаются результаты экспериментальных исследований, полученные в работе [1].

Создание КЭ модели. Исследования по применению метода конечных элементов (МКЭ) для расчета дорожных одежд, выполненные на кафедре строительной механики МАДИ [2-7], показали эффективность этого метода для расчета дорожных покрытий, учета реальной работы оснований, особенностей конструкций продольных и поперечных швов и т.д. Данные исследования позволили выявить такие особенности поведения дорожных конструкций, которые не могли быть описаны существующими инженерными методиками.

Для анализа влияния типа АГБ-смеси на эффективность восстановления прочностных параметров асфальтобетонного покрытия

возьмём за основу КЭ модель нежёсткого дорожного покрытия, представленную нами в работе [7]. В этой работе было показано, что созданные нами КЭ модели нежёстких дорожных покрытий адекватно отражают работу реальных покрытий при действии циклической нагрузки и могут быть использованы для разработки более совершенных КЭ моделей, учитывающих такие факторы, как динамический характер транспортной нагрузки, неравномерность распределения контактного давления шины на покрытие, нелинейные свойства основания и другие.

Было также установлено, что для получения адекватных количественных результатов необходимо при создании КЭ моделей нежёсткого дорожного покрытия использовать полубесконечные элементы на границах расчётной области.

В нашем исследовании предполагается, что из 20 см толщины старого АБ фрезерованию подверглись верхние 10 см, которые заменялись слоем АГБ-смеси.

Полученная в результате конечно-элементная модель конструкции нежёсткого дорожного покрытия с п/б элементами, созданная в КЭ пакете MARC MENTAT, изображена на рис. 2.

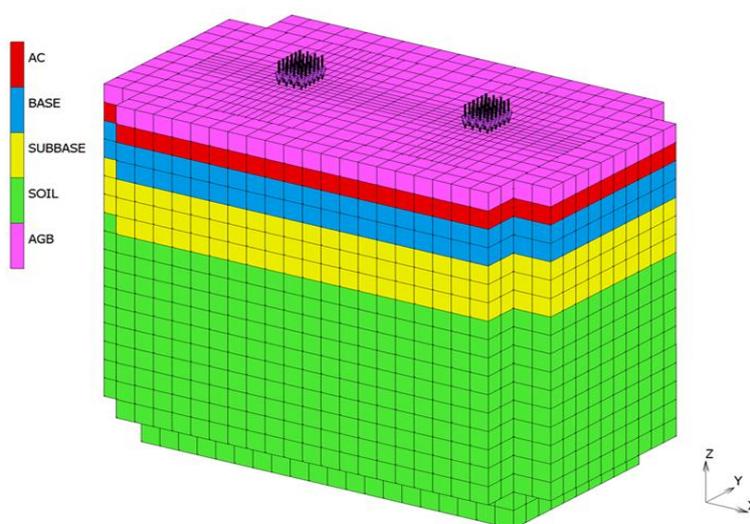


Рис. 2. Конечно-элементная модель конструкции нежёсткого дорожного покрытия с п/б элементами, созданная в КЭ пакете MARC-MENTAT

Циклическая нагрузка распределялась по отпечаткам колёс равномерно (рис. 2) и изменялась по времени в соответствии с рис. 3 [8]. Её амплитуда равнялась 689 кПа.

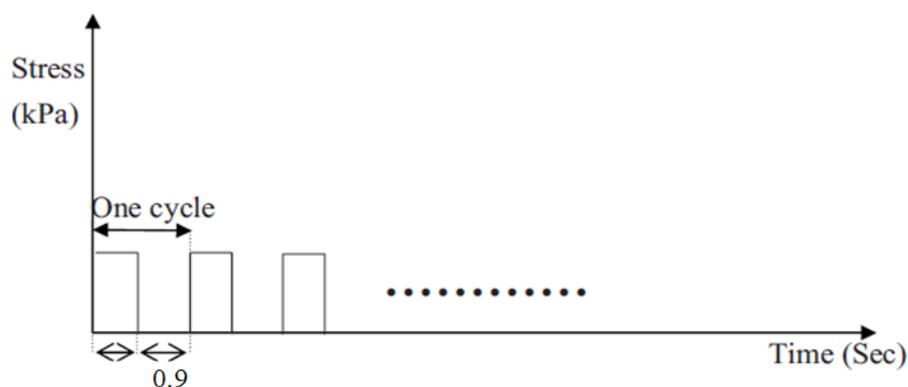


Рис. 3. Схема приложения циклической нагрузки

В соответствии с таблицей 1, для верхнего слоя дорожного покрытия были использованы 5 типов АГБ-смесей с модулями упругости 1800, 1400, 1100, 900 и 700 МПа. Нижний слой дорожного покрытия предполагался частично повреждённым и модуль упругости для него принимался равным 1400 МПа.

Результаты расчётов. В соответствии с документом [9], прочность конструкции нежесткой дорожной одежды в целом проверяется по допустимому прогибу. Поэтому оценим эффективность влияния на прочность асфальтобетонного покрытия различных типов регенерации верхнего слоя именно по этому критерию.

На рисунке 4 показан график, отображающий процесс развития прогиба АБ покрытия в центре отпечатка колеса для АГБ с модулем упругости 1800 МПа, при 10 циклах нагружения.

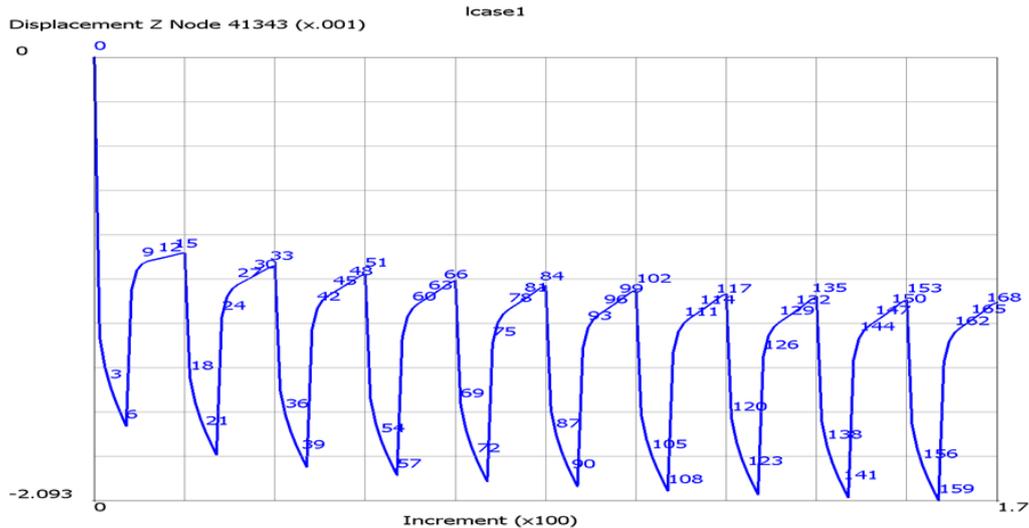


Рис. 4. Процесс развития максимального прогиба АБ покрытия для АГБ с модулем упругости 1800 МПа, при 10 циклах нагружения

Аналогичный вид имеют графики, построенные для других типов АГБ-смесей.

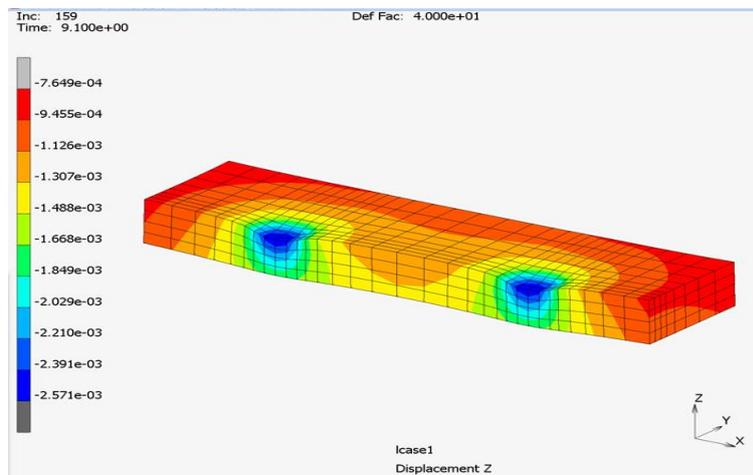


Рис. 5. Распределение прогибов в слоях АГБ и асфальтобетона для АГБ с модулем упругости 700 Мпа

На рисунке 5 изображено распределение прогибов в слоях АГБ и асфальтобетона для АГБ с модулем упругости 700 МПа.

Аналогичный вид имеет распределение прогибов для других типов АГБ-смесей.

Из гистограммы, представленной на рис. 6, следует, что если оценивать прочность регенерированного асфальтобетонного покрытия по

его максимальным прогибам, то по сравнению с АГБ типа А (табл. 1), АГБ типа М даёт приращение прочности на 22,8%, АГБ типа К даёт приращение прочности на 16,6%, АГБ типа В и Э даёт приращение прочности на 10,7%, АГБ типа Б даёт приращение прочности на 5,9%.

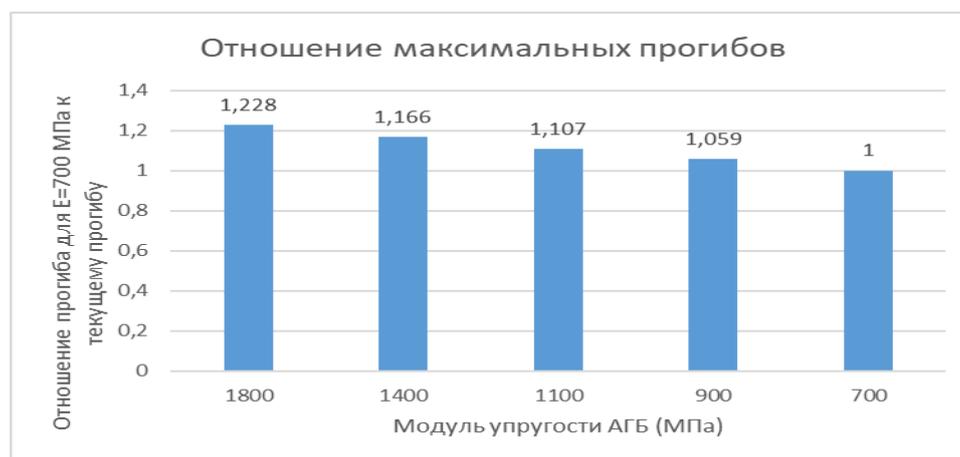


Рис. 6. Гистограмма оценки прочности регенерированного асфальтобетонного покрытия по его максимальным прогибам

Согласно работе [10], рассмотренная КЭ модель позволяет по величине максимальных главных полных деформаций оценить влияние различных типов АГБ на процесс образования колеи в регенерированном АБ покрытии.

На рисунке 7 показан график, отображающий процесс развития главных значений полных деформаций в слое АГБ, когда его модуль упругости равен 1800 МПа, для 10 циклов нагружения. Аналогичный вид имеют графики, построенные для других типов АГБ-смесей.

На рисунке 8 показано распределение максимальных главных значений полных деформаций в слоях АГБ и асфальтобетона, когда модуль упругости АГБ равен 1800 МПа.

Аналогичный вид имеет распределение максимальных главных значений полных деформаций в слоях АГБ и асфальтобетона для других типов АГБ-смесей.

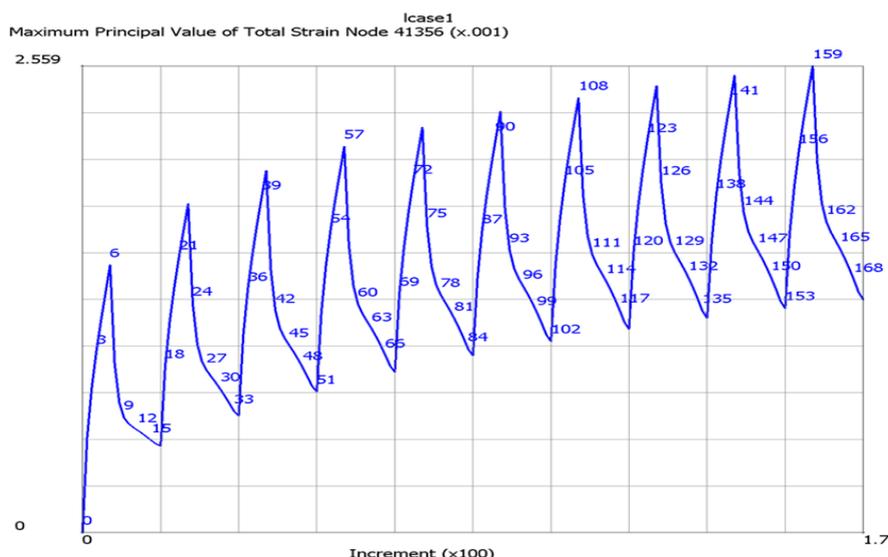


Рис. 7. Процесс развития главных значений полных деформаций в слое АГБ, когда его модуль упругости равен 1800 МПа, для 10 циклов нагружения

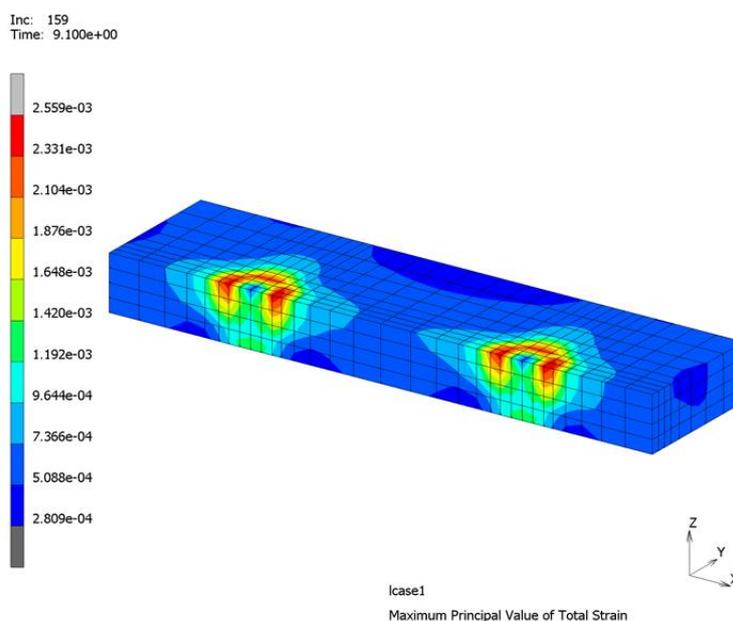


Рис. 8. Распределение максимальных главных значений полных деформаций в слоях АГБ и асфальтобетона для АГБ с модулем упругости 1800 Мпа

Из гистограммы, представленной на рис. 9, следует, что если оценивать влияние различных типов АГБ на процесс образования колеи в регенерированном АБ покрытии по величине максимальных главных деформаций, то по сравнению с АГБ типа А (табл. 1), АГБ типа М даёт уменьшение колеи на 68,2%, АГБ типа К даёт уменьшение колеи на 57,4%,

АГБ типа В и Э даёт уменьшение колеи на 34,4%, АГБ типа Б даёт уменьшение колеи на 17,9%.



Рис. 9. Гистограмма оценки влияния различных типов АГБ на процесс образования колеи в регенерированном АБ покрытии

Основные выводы. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Дана не только качественная, как в работе [1], но и количественная оценка эффективности различных типов АГБ при восстановлении дорожных покрытий методом регенерации;
- Из представленных в таблице 1 типов АГБ наибольшей эффективностью (с точки зрения обеспечения прочности и устойчивости к образованию колеи) обладает регенерированное асфальтобетонное покрытие типа М (с добавлением минерального вяжущего). Этот вывод согласуется с экспериментальными результатами, приведёнными в работе [1].
- Применение метода конечных элементов для расчёта конструкций дорожных одежд позволяет быстро и с наименьшими затратами ресурсов оценить эффективность новых технологий восстановления дорожного покрытия.

Список литературы

1. Проектирование восстановления дорожной одежды методом глубокой регенерации. Проблемы на стадии проектирования. – URL: [Технология холодного песаиклирования дорожной одежды \(rosavtodor.ru\)](http://rosavtodor.ru)
2. Демьянушко, И.В. Современные методы расчёта дорожных одежд с использованием метода конечных элементов / И.В. Демьянушко, В.М. Стаин // Третий всероссийский дорожный конгресс. – Москва, 2013. – С. 194-205.
3. Демьянушко, И.В. Моделирование теплового взаимодействия дорожного покрытия с окружающей средой с использованием МКЭ / И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин // Транспортное строительство. – 2013. – №8. – С. 11-15.
4. ОДМ 218.3.051-2015. Рекомендации по определению напряжённо-деформированного состояния многослойных дорожных одежд / Росавтдор. – Москва, 2015. – 158 с.
5. Стаин, В. М. Анализ усталостной долговечности асфальтобетонных образцов при различных частотах приложения нагрузки с помощью конечно-элементной модели, созданной в комплексе Marc and Mentat 2016 / В.М. Стаин, О.В. Воронина // Инженерные технологии MSC Software для высших учебных заведений: сборник трудов III Международной научно-практической конференции. – М.: МГУПС (МИИТ), 2017. – 75 с.
6. Демьянушко, И. В. Использование испытаний на 4-точечный изгиб для анализа усталостной долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий / И. В. Демьянушко, В. М. Стаин, Н. В. Зубов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – № 2(53). – С. 82-88.
7. Демьянушко, И.В. Влияние граничных условий на напряжённо-деформированное состояние нежёстких дорожных покрытий при расчётах в КЭ пакете Marc Mentat / И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин // XXI Международная конференция «Компьютерные системы инженерного анализа MSC Software», 24-25 октября, 2018 г.
8. Saeid Aarabi, Seyyed Abbas Tabatabaei. Viscoelastic analysis of thickness variation of asphaltic pavements under repeated loading using finite element method. *International Journal of Pavement Engineering*. 02 Apr 2018. – URL: <http://www.tandfonline.com/loi/gpav20>
9. ПНС: «Дороги автомобильные общего пользования ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД». – М.: Стандартинформ, 2017. – 95 с.
10. Abu Al-Rub, R.K., *et al.* Comparing finite element and constitutive modelling techniques for predicting rutting of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 2011 13 (4), pp. 322–338.

References

1. URL: Technology of cold recycling of road clothes (rosavtodor.ru).
2. Demyanushko I.V., Stain V. M. *Tretiy vserossiyskiy dorozhnyy kongress*, Moscow 2013, pp. 194-205.
3. Demyanushko I.V., Stain V. M., Stain A.V. *Transportnoye stroitel'stvo*, 2013, No.8, pp. 11-15
4. Rekomendatsii po opredeleniyu napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya mnogosloynnykh dorozhnykh odezhd, ODM 218.3.051-2015 (Recommendations for determining the stress-strain state of multilayer road clothes ODM 218.3.051-2015), Moscow, Rosavtodor, 2015, 158 p.
5. Stain V. M., Voronina O.V. *Inzhenernyye tekhnologii MSC Software dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy: sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Moscow, MGUPS (МИИТ), 2017, 75 p.
6. Demyanushko I.V., Stain V. M., Zubov N.V. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2018, No. 2, pp. 32-37.
7. Demyanushko I.V., Stain V. M., Stain A.V. *XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya «Komp'yuternyye sistemy inzhenernogo analiza MSC Software»*, October 24-25, 2018.
8. Saeid Aarabi, Seyyed Abbas Tabatabaei. Viscoelastic analysis of thickness variation of asphaltic pavements under repeated loading using finite element method. *International Journal of Pavement Engineering*. 02 Apr 2018. – URL: <http://www.tandfonline.com/loi/gpav20>
9. PNS: «Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya PROYEKTIROVANIYE NEZHESTKIKH DOROZHNYKH ODEZHD (PNS: "Public automobile roads DESIGN OF NON-RIGID ROAD CLOTHES)", Moscow, Standartinform, 2017, 95 p.
10. Abu Al-Rub, R.K., et al., 2011. Comparing finite element and constitutive modelling techniques for predicting rutting of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 13 (4), pp. 322–338.

Рецензент: В.С. Надеждин, канд. техн.наук, доц., МАДИ