

УДК (УДК) 625.8

УПРУГОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИELASTIC AFTEREFFECT IN THE PROCESS OF ASPHALT CONCRETE
MIXTURE COMPACTIONШишкин Е.А., Иванченко С.Н., Смоляков А.А.
Shishkin E.A., Ivanchenko S.N., Smolyakov A.A.Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)
Pacific national university (Khabarovsk, Russian Federation)

Аннотация. В качестве покрытия автомобильных дорог преимущественно используется асфальтобетон различных марок. Качество и долговечность покрытия зависит от его плотности. Для достижения требуемой плотности асфальтобетонного покрытия применяют дорожные катки. Рабочим органом катка является металлический валец либо набор пневматических шин. В статье рассмотрен процесс укатки асфальтобетонной смеси гладким металлическим вальцом. Принята реологическая модель силового взаимодействия гладкого вальца с материалом, включающая упругие, вязкий и пластический элементы. Произведена корректировка принятой модели с учетом исследуемого процесса упругого последействия, протекающего в асфальтобетонной смеси при уплотнении. Установлен закон поведения асфальтобетонной смеси при упругом последействии. Разработана имитационная модель для изучения поведения материала в процессе упругого последействия. В ходе динамического моделирования установлена взаимосвязь физико-механических характеристик уплотняемого материала с конструктивными и технологическими параметрами дорожного катка. Проведен статистический анализ конструктивных параметров существующих моделей дорожных катков. Результаты анализа, а также полученные зависимости могут быть использованы при назначении технологических режимов работы комплекта дорожных катков при уплотнении асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Учет упругого последействия при назначении режимов работы уплотняющей техники позволит повысить эффективность уплотнения, а также качество получаемого покрытия.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, уплотнение, гладковальцовый каток, реологическая модель, упругое последействие, эффективность.

Дата принятия к публикации: 02.02.2021
Дата публикации: 25.03.2021

Сведения об авторах:

Шишкин Евгений Алексеевич – старший преподаватель кафедры транспортно-технологических

Abstract. Asphalt concrete of various brands is mainly used as a road surface. The quality and durability of the coating depends on its density. To achieve the required density of the asphalt concrete pavement, road rollers are used. The working body of the roller is a metal drum or a set of pneumatic tires. The article discusses the process of the asphalt concrete mixture compaction with a smooth metal drum. A rheological model of the force interaction of a smooth drum with a material is adopted, which includes elastic, viscous and plastic elements. The adopted model was corrected taking into account the investigated process of elastic aftereffect that occurs in the asphalt concrete mixture during compaction. The law of behavior of asphalt-concrete mixture with elastic aftereffect is established. A simulation model has been developed to study the behavior of a material in the process of elastic aftereffect. In the course of dynamic modeling, the relationship between the physical and mechanical characteristics of the compacted material with the design and technological parameters of the road roller was established. A statistical analysis of the design parameters of existing models of road rollers has been carried out. The results of the analysis, as well as the obtained dependencies, can be used to designate the technological modes of operation of a set of road rollers when compacting the asphalt concrete pavement of a motor road. Taking into account the elastic aftereffect when assigning the operating modes of the compaction equipment will improve the compaction efficiency, as well as the quality of the resulting coating.

Keywords: asphalt-concrete mix, compaction, smooth drum roller, rheological model, elastic aftereffect, efficiency.

Date of acceptance for publication: 02.02.2021
Date of publication: 25.03.2021

Authors' information:

Evgeniy A. Shishkin – senior lecturer of Department of transport and technological systems in construc-

систем в строительстве и горном деле, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

Иванченко Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: sni@mail.khstu.ru.

Смоляков Александр Андреевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: 2012003170@pnu.edu.ru.

tion and mining at Pacific National University, e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

Sergej N. Ivanchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Pacific National University, e-mail: sni@mail.khstu.ru.

Aleksandr A. Smolyakov - graduate student at Pacific National University, e-mail: 2012003170@pnu.edu.ru.

1. Введение

Асфальтобетон является основным покрытием автомобильных дорог. Этот материал одновременно характеризуется упругими, вязкими и пластичными свойствами, что затрудняет теоретическое описание его поведения под нагрузкой. Для достижения требуемого качества асфальтобетонного покрытия его уплотняют дорожными катками. Одним из процессов, протекающих в асфальтобетонной смеси при уплотнении, является упругое последствие [1].

В данной работе проведено исследование указанного процесса с использованием реологического моделирования.

2. Теоретическое исследование упругого последствия

В отличие от идеально упругого тела, у которого реакция на быстрое изменение силового воздействия мгновенна, для упруго-вязкого тела характерно явление упругого последствия. Это явление характеризуется запаздыванием реакции (деформации) материала на быстрое изменение силового воздействия [2]. Рассмотрим процесс упругого последствия, который протекает в асфальтобетонной смеси после нарушения контакта с гладким вальцом, с использованием реологического моделирования [3, 4]. Существует множество моделей, описывающих поведение вязкоупругих материалов под нагрузкой [5]. В качестве модели асфальтобетонной смеси примем модель, изображенную на рис. 1.

В момент отрыва материала от поверхности вальца все части реологической модели, обладающие идеальной упругостью, полностью восстанавливают свою первоначальную форму. Для рассматриваемой модели (рис. 1)

такой частью является упругий элемент b . Однако упругий элемент c в момент отрыва все еще имеет некоторую деформацию h_c , благодаря сопротивлению связанного с ним вязкого элемента μ .

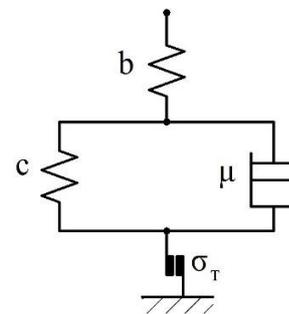


Рис. 1. Модель асфальтобетонной смеси

Именно энергия, сохраненная в деформированном элементе c в момент отрыва, и будет потрачена на упругое последствие. По окончании процесса последствия элемент c также полностью разгрузится и вернется в первоначальное состояние.

Найдем величину деформации h_c . Для этого обратимся к рис. 2:

$$h_c = \left[x_2^2 - (x_1 - x_2)^2 - (x_2 - x_3)^2 \right] \cdot (2R)^{-1}, \quad (1)$$

где x_1 , x_2 – координаты границ зоны пластического течения; x_3 – координата точки отрыва вальца от материала.

Поскольку элементы b и σ_T (рис. 1) в процессе упругого последствия не участвуют, поведение материала аналогично поведению классического тела Кельвина (рис. 3) при условии, что оно имеет в начальный момент времени деформацию, равную h_c и, затем, предоставлено самому себе.

Дифференциальное уравнение модели Кельвина общеизвестно:

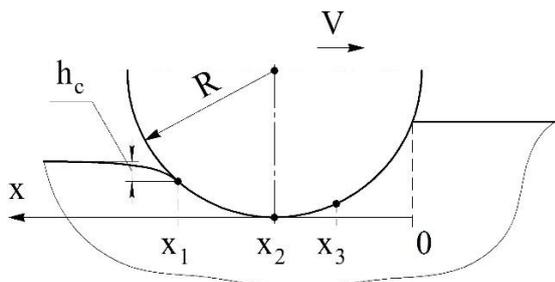


Рис. 2. Схема взаимодействия вальца с асфальтобетонной смесью

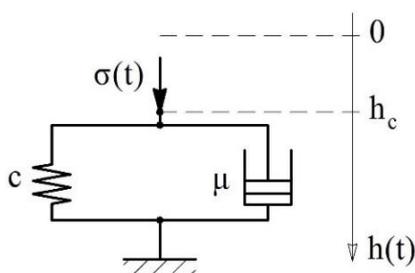


Рис. 3. Модель тела Кельвина

$$\sigma = \mu \frac{dh}{dt} + ch. \quad (2)$$

Так как в процессе последействия внешняя сила отсутствует ($\sigma = 0$), уравнение (2) примет вид

$$\mu \frac{dh}{dt} + ch = 0. \quad (3)$$

Общим решением дифференциального уравнения (3) является следующее выражение

$$h(t) = Ce^{-\frac{c}{\mu}t}. \quad (4)$$

Найдем частное решение, исходя из начальных условий: $t = 0, h(t) = h_c$

$$h(t) = h_c e^{-\frac{c}{\mu}t}. \quad (5)$$

С учетом (1) уравнение (5) примет вид

$$h(t) = \left[x_2^2 - (x_1 - x_2)^2 - (x_2 - x_3)^2 \right] \times (2R)^{-1} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (6)$$

где $T = \mu \cdot c^{-1}$ – период упругого последействия.

Уравнение (6) представляет собой закон поведения материала при упругом последействии.

Отметим, что в уравнении (6) за начало отсчета времени принимается момент отрыва материала от поверхности вальца (момент t_1 ,

соответствующий координате x_1 на рис. 2), а за начало отсчета деформаций – поверхность уплотненного материала по окончании упругого последействия.

На основе уравнения (6) получена имитационная модель поведения асфальтобетонной смеси в процессе упругого последействия, представленная на рис. 4.

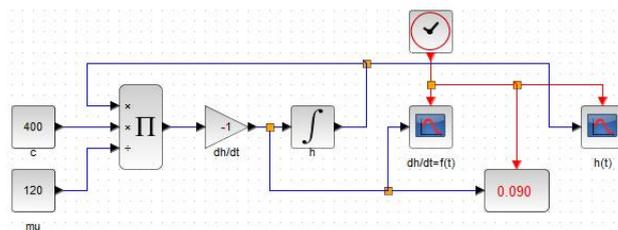


Рис. 4. Имитационная модель поведения асфальтобетонной смеси в процессе упругого последействия

Разработанная модель позволяет определять численные значения деформации и скорости деформации материала в различные моменты времени течения процесса упругого последействия (рис. 5, 6).

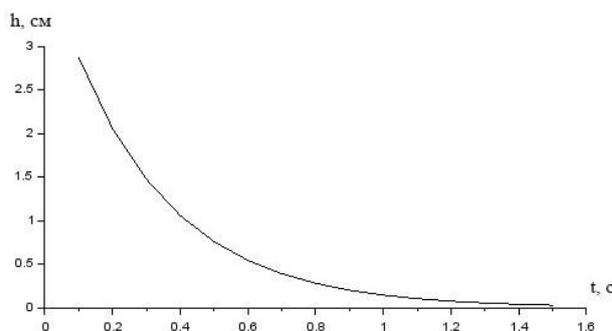


Рис. 5. График изменения деформации при упругом последействии

Согласно (6) период упругого последействия T определяется физико-механическими характеристиками асфальтобетонной смеси. Приведенный на рис. 6 график получен для материала, характеризующегося периодом $T = 0,3 \text{ c}$, на основе значений скорости деформации в моменты времени, кратные периоду упругого последействия. Для смеси, характеризующейся другим значением T , качественно график аналогичен приведенному на рис. 6. Анализ графика изменения скорости деформации показывает, что

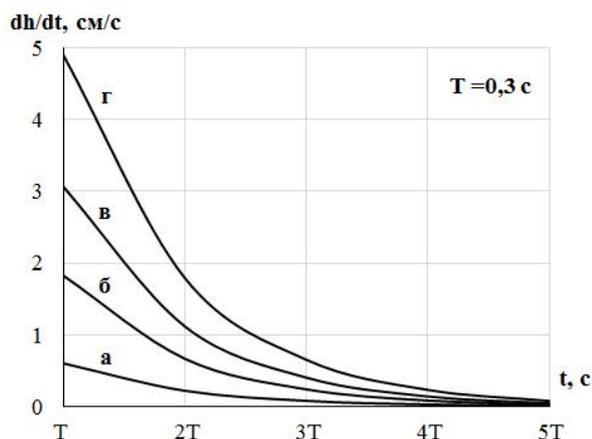


Рис. 6. График изменения скорости деформации при упругом последствии:

$$a - h_c = 0,5 \text{ см}; \quad б - h_c = 1,5 \text{ см};$$

$$в - h_c = 2,5 \text{ см}; \quad г - h_c = 4 \text{ см}$$

вне зависимости от начальной деформации материала процесс упругого последствия можно считать завершённым по прошествии пяти периодов упругого последствия T . Это утверждение согласуется с теоретическими исследованиями [6].

Введем понятие времени упругого последствия $T_{уп} = 5T$.

Результаты моделирования процесса упругого последствия упруго-вязких материалов с различными физико-механическими характеристиками представлены на рис. 7.

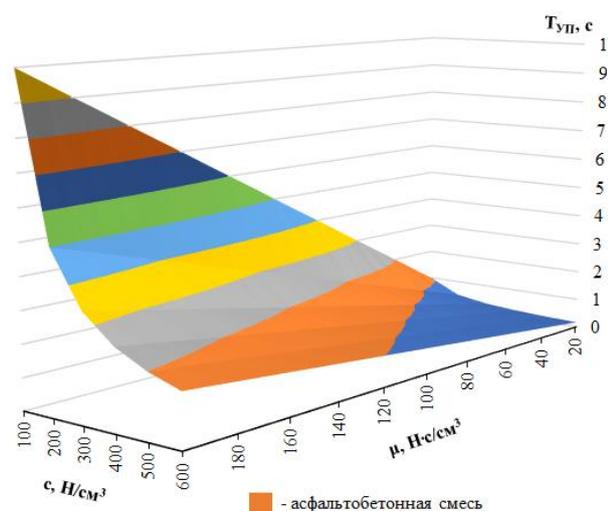


Рис. 7. График зависимости времени упругого последствия от физико-механических характеристик материала

Часть поверхности на рис. 7 характеризует процесс упругого последствия асфальтобетонной смеси при соответствующих значениях параметров c и μ . Интерполяция полученных значений методом наименьших квадратов позволяет получить следующую зависимость

$$T_{уп} = 2,5667 - 0,01925 \cdot c + 0,000027 \cdot c^2 + 0,0462 \cdot \mu - 0,000074 \cdot c \cdot \mu. \quad (7)$$

В соответствии с рис. 7 для асфальтобетонной смеси значения времени упругого последствия $T_{уп}$ находятся в диапазоне 0,9...1,7 с.

При уплотнении дорожным катком асфальтобетонная смесь подвергается периодическому воздействию [7]. Промежуток времени между воздействиями на заданную площадку покрытия передним и задним вальцом зависит от колесной базы A и скорости передвижения V катка. Для обеспечения высокой эффективности уплотнения смеси необходимо, чтобы материал успевал полностью восстановиться перед следующим воздействием. Для этого нужно, чтобы промежуток времени между соседними проходами вальца по одному следу был не меньше времени упругого последствия материала

$$\frac{A}{V} \geq T_{уп}. \quad (8)$$

В настоящее время промышленностью выпускаются тандемные дорожные катки. Расстояние между вальцами, называемое колесной базой, варьируется для различных моделей.

В результате статистического анализа более 250 моделей дорожных катков отечественного и зарубежного производства (рис. 8) получена статическая зависимость колесной базы катка A от его эксплуатационной массы $M_э$,

$$A = -18,787M_э^2 + 477,99M_э + 624,83. \quad (9)$$

3. Практическая значимость полученных результатов

Проведенный статистический анализ (рис. 8) позволил получить диапазоны значений колесной базы A для различных типов катков:

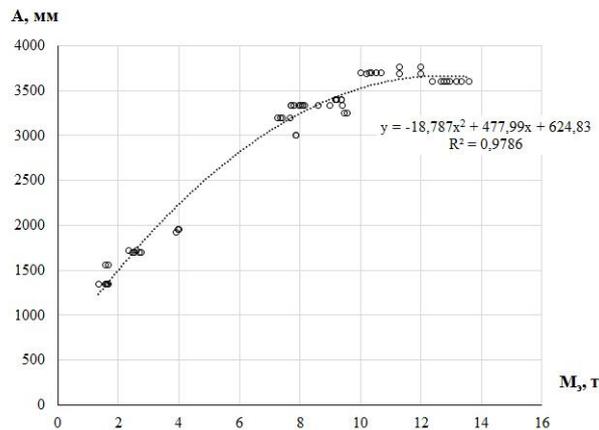


Рис. 8. Взаимосвязь колесной базы и эксплуатационной массы катка

- легкие катки $A = 1,3 - 2 \text{ м}$;
- средние катки $A = 3 - 3,4 \text{ м}$;
- тяжелые катки $A = 3,6 - 3,8 \text{ м}$.

Преобразуем условие (8) к виду

$$V \leq \frac{A}{T_{\text{уп}}}. \quad (10)$$

С учетом (7) и (9) условие (10) примет вид

$$V \leq (-18,787M_0^2 + 477,99M_0 + 624,83) \times \\ \times (2,5667 - 0,01925c + 0,000027c^2 + \\ + 0,0462\mu - 0,000074c\mu)^{-1}. \quad (11)$$

Условие (11) устанавливает связь между параметрами дорожного катка и характеристиками асфальтобетонной смеси, и позволя-

ет получать рекомендуемые значения скорости катка для различных этапов уплотнения материала.

Произведенные по формуле (11) расчеты показали, что для предварительного этапа уплотнения асфальтобетонной смеси рекомендуемая скорость находится в диапазоне 2...3 км/ч, для основного – 4...5 км/ч, а для заключительного – 6...8 км/ч. Эти значения соответствуют рекомендациям [8 - 10].

4. Заключение

Установлено, что для упруго-вязких тел упругое последствие может протекать с различной скоростью, а конечная деформация материала может достигать различных значений. На интенсивность процесса упругого последствия влияют вязкость и жесткость материала.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при назначении технологических режимов работы комплекта дорожных катков при уплотнении асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Для этого необходимо получить значения физико-механических характеристик асфальтобетонной смеси на различных этапах уплотнения материала. Это может быть сделано в результате проведения серии лабораторных экспериментов.

Список литературы

1. Иванченко С.Н. Основные положения теории уплотнения композиционных материалов при сложном нагружении // Строительные и дорожные машины: сборник трудов. Хабаровск. 1996. С. 100-107.
2. Сунь И., Хуан Б., Чен Ц. Единая методика оперативного определения спектров дискретной релаксации и ретардации асфальтобетона // Строительство и строительные материалы. 2015. № 93. С. 35-48.
3. Белицкий В.Д., Катунин А. . Тезаурус математических моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси // Омский научный вестник. 2013. №3 (123). С. 18-21.
4. Збицяк А., Гресикевич В., Вакулич А.

References

1. Ivanchenko S.N. The theory basic provisions of composite materials compaction under complex loading. In: *Stroitelnye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines]. Khabarovsk, 1996, pp. 100-107. (In Russian).
2. Sun Y., Huang B., Chen J. Unified procedure for rapidly determining asphalt concrete discrete relaxation and retardation spectra. *Construction and Building Materials*, 2015, No. 93, pp 35-48. (In English).
3. Belickij V.D., Katunin A.V. Mathematical models thesaurus of the asphalt concrete mixture compaction process. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2013, No. 3 (123), pp. 18-21. (In Russian).
4. Zbiciak A., Grzesikiewicz W., Wakulicz

Одномерные реологические модели асфальтобетонных смесей // Логистика. 2010. №6. С. 3825-3832.

5. Ерохин С.В., Гачаев А.М. Модель деформаций вязкоупругих материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №1. С. 39-43.

6. Биггз У.Д. Механическое поведение инженерных материалов. Амстердам: Эльзевир, 2013. 156 с.

7. Кромский Е.И., Лебедь А.Р., Гаврилина И.Н. Совершенствование техники и технологии уплотнения дорожно-строительных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. №2 (16). С. 22-27.

8. Костельов М.П., Посадский Л.М. Технологические особенности и параметры уплотнения горячего асфальтобетона гладковальцовыми катками // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд: труды Союздорнии. Москва. 1980. С. 61-79.

9. СТО НОСТРОЙ 2.25.37-2011. Автомобильные дороги. Устройство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Часть 2. Устройство асфальтобетонных покрытий из горячего асфальтобетона. М.: ООО Издательство «БСТ», 2012. 42 с.

10. ТР 103-07. Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона. М.: ГУП НИИМосстрой, 2007. 109 с.

† A. One-dimensional rheological models of asphalt-aggregate mixtures. *Logistyka*, 2010, No. 6, pp 3825-3832. (In English).

† 5. Erohin S.V., Gachaev A.M. Deformation model of viscoelastic materials. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*, 2011, No. 1, pp. 39-43. (In Russian).

† 6. Biggs W.D. *The mechanical behavior of engineering materials*. Amsterdam, Elsevier. 2013. 156 p.

† 7. Kromskij E.I., Lebed A.R., Gavrilina I.N. Improvement of technique and technology for compaction of road building materials. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arhitektura*, 2016, No. 2 (16), pp. 22-27. (In Russian).

† 8. Kostelov M.P., Posadskij L.M. Technological features and parameters of hot asphalt concrete compaction with smooth drum rollers. *Uplotnenie zemlyanogo polotna i konstruktivnykh sloev dorozhnykh odezhd* [Proceedings of the Union Road Research Institute]. Moscow, 1980, pp. 61-79.

† 9. *СТО НОСТРОЙ 2.25.37-2011. Автомобильные дороги. Устройство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Часть 2. Устройство асфальтобетонных покрытий из горячего асфальтобетона* [Motor road. The device of asphalt concrete coverings of highways. Part 2. The device of asphalt concrete coverings from hot asphalt concrete]. Moscow, ООО Izdatelstvo "BST", 2012. 42 p. (In Russian).

† 10. *ТР 103-07. Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона* [Technical recommendations for the construction of road structures using asphalt concrete]. Moscow, ГУП НИИМосстрой, 2007. 109 p. (In Russian).