

УДК (УДК) 625.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ
ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙRHEOLOGICAL MODEL PARAMETERS DETERMINATION BASED ON
LABORATORY STUDIESШишкин Е.А.
Shishkin E.A.Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)
Pacific national university (Khabarovsk, Russian Federation)

Аннотация. Для исследования напряженно-деформированного поведения асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения используются различные типы моделей. Для моделирования необходимо знать значения параметров моделей во всем диапазоне изменения характеристик уплотняемого материала. Целью статьи является разработка методики определения параметров модели по результатам лабораторного испытания асфальтобетонной смеси на ползучесть-восстановление. В работе принята модель, отражающая упругие, вязкоупругие и вязко-текучие свойства уплотняемого материала. Получено дифференциальное уравнение, представляющее собой закон поведения слоя асфальтобетонной смеси под нагрузкой. Аналитически описаны этапы испытания на ползучесть-восстановление, а именно: быстрое нагружение постоянной нагрузкой и деформирование под этой нагрузкой; снятие нагрузки и восстановление. Определены начальные условия для указанных этапов. С учетом начальных условий получены аналитические выражения законов деформирования модели под действием постоянной нагрузки и в процессе восстановления. Описана методика проведения лабораторных экспериментов на ползучесть-восстановление, по результатам которых получают искомые значения параметров модели с минимальной абсолютной погрешностью. Разработанная методика позволяет определять параметры модели, описывающей напряженно-деформированное поведение асфальтобетонной смеси различной плотности и температуры. Следовательно, появляется возможность моделирования поведения слоя асфальтобетонной смеси на предварительном, основном и заключительном этапах уплотнения с целью определения эффективных режимов работы уплотняющего оборудования.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, уплотнение, упругость, вязкость, ползучесть-восстановление, эксперимент.

Дата получения статьи: 02.05.2024
Дата принятия к публикации: 06.06.2024
Дата публикации: 25.06.2024

Abstract. Different types of models are used to study the stress-strain behavior of asphalt concrete mixture during compaction. For modeling it is necessary to know the values of model parameters in the whole range of changes in the characteristics of the compacted material. The aim of the paper is to develop a methodology for determining model parameters based on the results of laboratory creep-recovery testing of asphalt-concrete mixture. In the paper, a model reflecting elastic, viscoelastic and visco-fluid properties of the compacted material is adopted. A differential equation representing the law of behavior of the asphalt-concrete mixture layer under load is obtained. The stages of creep-recovery testing are analytically described, namely: rapid loading with a constant load and deformation under this load; load removal and recovery. Initial conditions for the mentioned stages are determined. Taking into account the initial conditions, analytical expressions of the laws of deformation of the model under the action of a constant load and in the process of recovery are obtained. The methodology of laboratory experiments on creep-recovery is described, according to the results of which the required values of the model parameters with minimum absolute error are obtained. The developed methodology allows to determine the parameters of the model describing the stress-strain behavior of asphalt-concrete mixture of different density and temperature. Consequently, it is possible to simulate the behavior of the asphalt concrete mixture layer at the preliminary, main and final stages of compaction in order to determine the effective operating modes of compaction equipment.

Keywords: asphalt-concrete mix, compaction, elasticity, viscosity, creep-recovery, experiment.

Date of manuscript reception: 02.05.2024
Date of acceptance for publication: 06.06.2024
Date of publication: 25.06.2024

Сведения об авторе:

Шишкин Евгений Алексеевич – доцент, Высшая школа промышленной инженерии, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,
e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

†
†
†
†
†
†**Author's information:**

Evgeniy A. Shishkin – Associate Professor, Graduate school of industrial engineering, Pacific national university, e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

1. Введение

Уплотнение является важной операцией строительства асфальтобетонного покрытия [1]. Выбор эффективных режимов работы уплотняющего оборудования является сложной задачей, для решения которой необходимо исследование напряженно-деформированного поведения слоя асфальтобетонной смеси. Полевые экспериментальные исследования являются дорогостоящими [2]. Рациональнее проводить исследования с использованием различных моделей. Каждая модель характеризуется структурой и параметрами, которые в совокупности определяют ее адекватность описываемому физическому процессу [3]. Целью данной статьи является разработка методики определения параметров модели, описывающей напряженно-деформированное состояние слоя асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения.

2. Теоретическое исследование явления ползучести-восстановления

Известно, что по мере усложнения модели точность получаемых результатов увеличивается [4]. Однако простая модель имеет менее сложное математическое описание, и кроме этого, каждый параметр такой модели имеет четкий физический смысл [5]. Модель, представленная на рис. 1, отражает упругие (c_1), вязко-текучие (μ_1) и вязко-упругие (c_2, μ_2) свойства материала. Определение значений перечисленных свойств будем производить по результатам лабораторного испытания материала на ползучесть-восстановление.

Рассматривая модель, изображенную на рис. 1, как частный случай обобщенной модели Кельвина [6], можно получить для нее соотношение между деформацией и напряжением в следующем виде:

$$h = \frac{\sigma}{c_1} + \frac{\sigma}{\mu_1 \delta_t} + \frac{\sigma}{c_2 + \mu_2 \delta_t}, \quad (1)$$

где h – деформация, м; σ – напряжение, Па; c_1, c_2 – коэффициенты жесткости, Н/м³; μ_1, μ_2 – коэффициенты вязкости, Н·с/м³; δ_t – линейный оператор дифференцирования по времени.

Выполняя указанные в (1) действия, получим определяющее уравнение модели, изображенной на рис. 1:

$$\frac{\mu_2}{c_1} \sigma'' + \left(1 + \frac{c_2}{c_1} + \frac{\mu_2}{\mu_1}\right) \sigma' + \frac{c_2}{\mu_1} \sigma = \mu_2 h'' + c_2 h'. \quad (2)$$

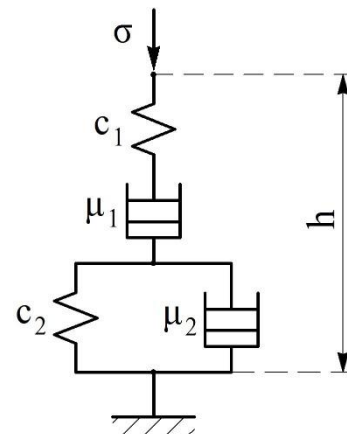


Рис. 1. Модель асфальтобетонной смеси

Испытание на ползучесть-восстановление предполагает:

- быстрое нагружение модели постоянной нагрузкой $\sigma = \sigma_c$ и деформация под этой нагрузкой при $t < t_1$;

- снятие нагрузки в момент времени $t = t_1$ и восстановление при $t > t_1$ (рис. 2).

Рассмотрим процесс деформирования модели при постоянной нагрузке $\sigma = \sigma_c = const$ при $t < t_1$. С учетом того, что $\sigma'' = 0$ и $\sigma' = 0$, уравнение (2) принимает вид

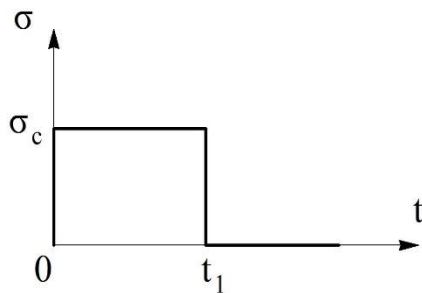


Рис. 2. График изменения напряжения во времени

$$h'' + \frac{c_2}{\mu_2} h' = \frac{c_2}{\mu_1 \mu_2} \sigma_c. \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой дифференциальное уравнение 2-го порядка. Для его решения определяем начальные условия при $t = 0$:

$$h(0) = \frac{\sigma_c}{c_1}; \quad (4)$$

$$h'(0) = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} \sigma_c. \quad (5)$$

Общее решение дифференциального уравнения (3) имеет вид

$$h' = \frac{\sigma_c}{\mu_1} + C_1 e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t}. \quad (6)$$

Используя начальное условие (5) в уравнении (6), получим частное решение дифференциального уравнения (3) в следующем виде:

$$h' = \frac{\sigma_c}{\mu_1} + \frac{\sigma_c}{\mu_2} e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t}. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7), получим общее решение:

$$h = \frac{\sigma_c}{\mu_1} t - \frac{\sigma_c}{c_2} e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t} + C_2. \quad (8)$$

Используя начальное условие (4) в уравнении (8), получим частное решение дифференциального уравнения (7):

$$h(t) = \frac{\sigma_c}{c_1} + \frac{\sigma_c}{\mu_1} t + \frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t} \right). \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой закон деформирования модели под действием постоянной нагрузки $\sigma = \sigma_c$ при $t < t_1$.

Рассмотрим процесс восстановления модели после снятия нагрузки в момент времени $t = t_1$. В этом случае $\sigma = 0$, $\sigma' = 0$, $\sigma'' = 0$ и уравнение (2) принимает вид:

$$h'' + \frac{c_2}{\mu_2} h' = 0. \quad (10)$$

Для решения дифференциального уравнения (10) определяем граничные условия при $t = t_1$:

$$h(t_1) = \frac{\sigma_c}{\mu_1} t_1 + \frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right); \quad (11)$$

$$h'(t_1) = -\frac{\sigma_c}{\mu_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right). \quad (12)$$

Общее решение дифференциального уравнения (10) имеет вид

$$h' = C_3 e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t}. \quad (13)$$

Используя граничное условие (12) в уравнении (13), получим частное решение дифференциального уравнения (10) в следующем виде:

$$h' = \frac{\sigma_c}{\mu_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right) e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t}. \quad (14)$$

Интегрируя уравнение (14), получим общее решение:

$$h = -\frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right) e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t} + C_4. \quad (15)$$

Используя граничное условие (11) в уравнении (15), получим частное решение дифференциального уравнения (10):

$$h(t) = \frac{\sigma_c}{\mu_1} t_1 + \frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right) e^{-\frac{c_2}{\mu_2} (t-t_1)}. \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собой закон деформирования модели в процессе восстановления при $t \geq t_1$.

Таким образом, определяющими уравнениями испытания на ползучесть-восстановление являются выражения (9) и (16).

3. Практическая значимость полученных результатов

По результатам лабораторного эксперимента появляется возможность определять параметры модели на основе полученных законов деформирования. Лабораторный эксперимент на ползучесть-восстановление выполняется в следующем порядке.

Испытуемый образец нагружается постоянным усилием $\sigma = \sigma_c$ до момента времени $t = t_1$. На участке нагружения ($t < t_1$) измеряется деформация $h(t_0)$ в некоторый момент времени $t = t_0$ (рис. 3). Значение деформации в момент снятия нагрузки принимается за $h(t_1)$.

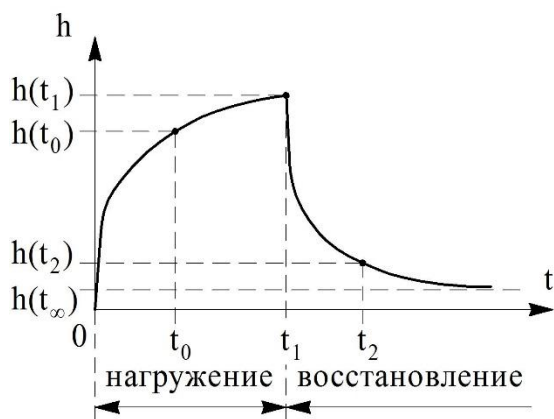


Рис. 3. График испытания на ползучесть-восстановление

В момент времени $t = t_1$ производится быстрое снятие нагрузки ($\sigma = 0$). При этом происходит резкий спад деформации и затем ее дальнейшее плавное уменьшение.

Далее ($t > t_1$) происходит процесс восстановления образца. На участке восстановления измеряется значение деформации $h(t_2)$ в некоторый момент времени $t = t_2$.

Восстановление считается завершенным, когда деформация перестает уменьшаться. Наименьшее значение деформации принимается за $h(t_\infty)$ - необратимую остаточную деформацию.

Учитывая то, что для моментов времени $t = t_0$ и $t = t_1$ справедлив закон (9), а для моментов времени $t = t_2$ и $t \rightarrow \infty$ - закон (16), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} h(t_0) = \frac{\sigma_c}{c_1} + \frac{\sigma_c}{\mu_1} t_0 + \frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_0} \right); \\ h(t_1) = \frac{\sigma_c}{c_1} + \frac{\sigma_c}{\mu_1} t_1 + \frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right); \\ h(t_2) = \frac{\sigma_c}{\mu_1} t_1 + \frac{\sigma_c}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{c_2}{\mu_2} t_1} \right) e^{-\frac{c_2}{\mu_2} (t_2 - t_1)}; \\ h(t_\infty) = \frac{\sigma_c}{\mu_1} t_1. \end{cases} \quad (17)$$

Решая систему уравнений (17) с использованием экспериментальных данных (σ_c , t_0 , $h(t_0)$, t_1 , $h(t_1)$, t_2 , $h(t_2)$, $h(t_\infty)$), определяем параметры модели асфальтобетонной смеси c_1 , c_2 , μ_1 , μ_2 .

В результате проведения серии лабораторных экспериментов на ползучесть-восстановление по описанной выше методике можно получить значения параметров модели с минимальной абсолютной погрешностью.

В лабораторных условиях была проведена серия испытаний на ползучесть-восстановление образцов из асфальтобетонной смеси типа Б марки I. Смесь вместе с цилиндрической формой предварительно разогревали до заданной температуры в сушильном шкафу (рис. 4).



Рис. 4. Сушильный шкаф для подогрева асфальтобетонной смеси

После этого порцию асфальтобетонной смеси помещали в цилиндрическую форму и с помощью электромеханического пресса создавали необходимую начальную плотность образца. Извлеченный из формы образец помещали на нижнюю траверсу пресса (рис. 5) с последующим нагружением и фиксацией диаграммы деформация-время.



Рис. 5. Общий вид электромеханического пресса

Результаты обработки серии испытаний образцов асфальтобетонной смеси различной температуры и начальной плотности представлены на рис. 6 - 9.

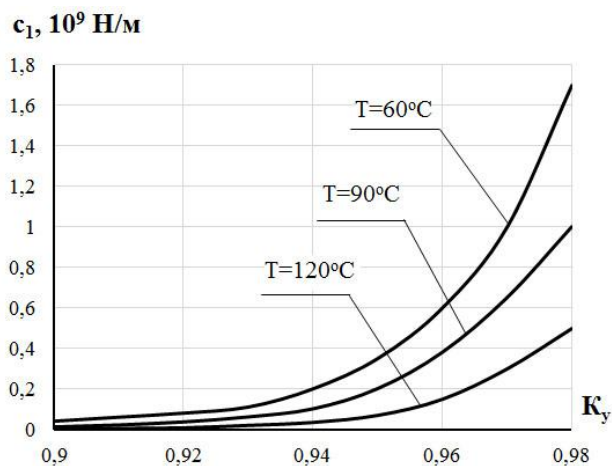


Рис. 6. Зависимость параметра модели c_1 от температуры T и коэффициента уплотнения K_y образца

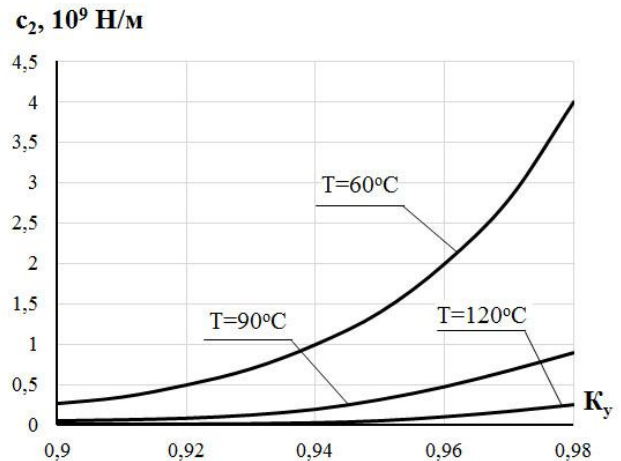


Рис. 7. Зависимость параметра модели c_2 от температуры T и коэффициента уплотнения K_y образца

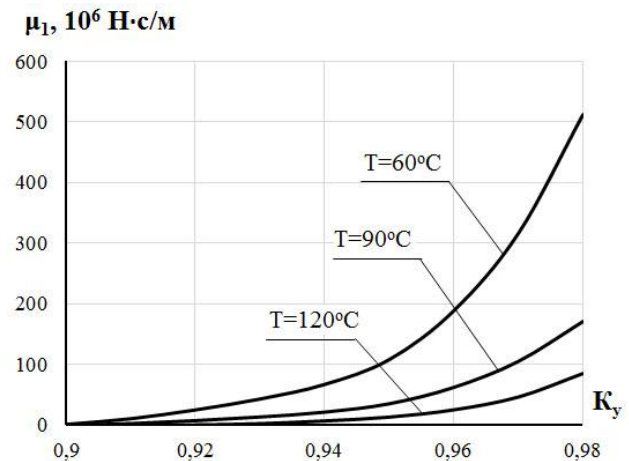


Рис. 8. Зависимость параметра модели μ_1 от температуры T и коэффициента уплотнения K_y образца

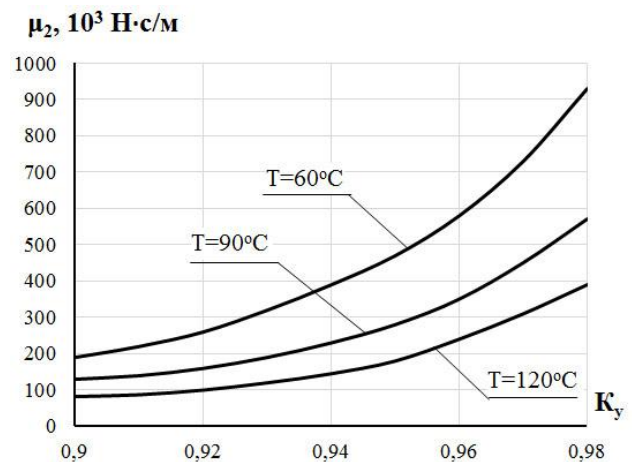


Рис. 9. Зависимость параметра модели μ_2 от температуры T и коэффициента уплотнения K_y образца

Из рис. 6 видно, что с увеличением температуры асфальтобетонной смеси при неизменной плотности параметр модели c_1 , характеризующий мгновенную упругую деформацию, уменьшается. С другой стороны, по мере увеличения плотности асфальтобетонной смеси при неизменной температуре наблюдается рост коэффициента жесткости c_1 . Выявленные тенденции коррелируют с физическим поведением асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения.

Из рис. 8 видно, что с уменьшением температуры асфальтобетонной смеси при неизменной плотности параметр модели μ_1 , характеризующий вязкую деформацию (течение), увеличивается. Такое поведение вызвано остыванием вяжущего, в результате чего смесь становится менее пластичной [7]. С другой стороны, по мере увеличения плотности асфальтобетонной смеси при неизменной температуре наблюдается рост коэффициента вязкости μ_1 , так как в смеси начинают преобладать упругие свойства [8].

Из рис. 7 и 9 видно, что параметры модели c_2 и μ_2 , совместно характеризующие вяз-

ко-упругую деформацию, возрастают при уменьшении температуры и увеличении плотности асфальтобетонной смеси, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [9, 10].

В целом адекватность результатов моделирования указывает на низкую погрешность значений параметров модели, определяемых согласно описанной в данной статье методике.

4. Заключение

Разработанная методика позволяет определять параметры модели, описывающей напряженно-деформированное поведение асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения. Серия лабораторных экспериментов на ползучесть-восстановление образцов асфальтобетонной смеси различной плотности и температуры позволит получить соответствующие значения параметров модели. Следовательно, появляется возможность моделирования поведения слоя асфальтобетонной смеси на различных этапах его уплотнения с целью определения эффективных режимов работы уплотняющего оборудования.

Список литературы

1. Шишкин Е.А., Иванченко С.Н., Смоляков А.А. Упругое последствие в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 1. С. 90-95. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-90-95.

2. Emelyanov R.T., Prokopen A.P., Vasiliev Y.V., Perebeynos D.I., Novruzov V.S. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller // Journal of Physics: Conference Series. 2021. No. 1889. P. 042059. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

3. Шишкин Е.А., Иванченко С.Н. Определение начальных условий дифференциального уравнения поведения реологической модели асфальтобетонной смеси // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 265-268. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-

References

1. Shishkin E.A., Ivanchenko S.N., Smolyakov A.A. Elastic aftereffect in the process of asphalt concrete mixture compaction. *Nauchnotekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No. 1, pp. 90-95. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-90-95. (In Russian)

2. Emelyanov R.T., Prokopen A.P., Vasiliev Y.V., Perebeynos D.I., Novruzov V.S. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, No. 1889, p. 042059. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

3. Shishkin E.A., Ivanchenko S.N. The initial conditions determination of the differential equation describing the behavior of the asphalt concrete rheological model. *Nauchnotekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 2, pp. 265-268. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-

265-268.

4. Прокопьев А.П. Теоретические основы построения интеллектуальных систем управления уплотнением асфальтобетонных смесей // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10-1. С. 48-58. DOI: 10.17513/snt.39345.

5. Cannone Falchetto A., Moon K.H., Wang D., Park H.-W. A modified rheological model for the dynamic modulus of asphalt mixtures // Canadian Journal of Civil Engineering. 2020. № 48(3). DOI: 10.1139/cjce-2019-0392.

6. Быков Д.Л., Мартынова Е.Д. Структурно-энергетический анализ моделей нелинейно вязкоупругих материалов с несколькими функциями старения и вязкости // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2011. № 1. С. 65-76.

7. Makaya L. M., Andrianov K. A., Zubkov A. F. Influence of the composition of asphalt granular concrete mixture on the deformation of the coating layer during the construction of the road pavement // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. No. 1(61). P. 86-100. DOI: 10.36622/VSTU.2024.61.1.008.

8. Albayati A., Faleh A. Influence of temperature on mechanical properties of asphalt concrete mixture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. No. 856. P. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/856/1/012025.

9. Wang X., Wang G. Gong F., Qin L., Gao Z., Cheng X. Evaluation and analysis of asphalt concrete density based on core samples // Journal of Materials in Civil Engineering. 2024. No. 36(1). DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15771.

10. Wang T., Jiang W., Ruan C., Xiao J., Yuan D., Wu W., Xing C. The rheological properties of high-viscosity modified reclaimed asphalt binder at multiple application temperatures // Construction and Building Materials. 2023. No. 372. P. 130758. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130758.

† 05-02-265-268. (In Russian)

† 4. Prokopev A.P. Theoretical foundations of building intelligent control systems for compaction asphalt mixtures. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2022, No. 10-1, pp. 48-58. DOI: 10.17513/snt.39345. (In Russian)

† 5. Cannone Falchetto A., Moon K. H., Wang D., Park H.-W. A modified rheological model for the dynamic modulus of asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2020, No. 48(3). DOI: 10.1139/cjce-2019-0392.

† 6. Bykov D. L., Martynova E. D. Structure-energy analysis of models of nonlinearly viscoelastic materials with several aging and viscosity functions. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*, 2011, No.1, pp. 65-76. (In Russian)

† 7. Makaya L. M., Andrianov K. A., Zubkov A. F. Influence of the composition of asphalt granular concrete mixture on the deformation of the coating layer during the construction of the road pavement. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2024, No. 1(61), pp. 86-100. DOI: 10.36622/VSTU.2024.61.1.008.

† 8. Albayati A., Faleh A. Influence of temperature on mechanical properties of asphalt concrete mixture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, No. 856, p. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/856/1/012025.

† 9. Wang X., Wang G. Gong F., Qin L., Gao Z., Cheng X. Evaluation and analysis of asphalt concrete density based on core samples. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2024, No. 36(1). DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15771.

† 10. Wang T., Jiang W., Ruan C., Xiao J., Yuan D., Wu W., Xing C. The rheological properties of high-viscosity modified reclaimed asphalt binder at multiple application temperatures. *Construction and Building Materials*, 2023, No. 372. p. 130758. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130758.