

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89>

## Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды

Е.Г. Пахомова <sup>1</sup>, Л.В. Макая <sup>2</sup>, К.А. Андрианов <sup>2</sup>, А.Ф. Зубков <sup>2</sup>,  
П.В. Монастырев <sup>2</sup> ✉, Д.М. Мордасов <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Тамбовский государственный технический университет,  
ул. Советская, д. 106/5, г. Тамбов 392000, Российская Федерация

✉ e-mail: [monastyrrev68@mail.ru](mailto:monastyrrev68@mail.ru)

### Резюме

**Цель исследования.** Целью данной работы является разработка математической модели, обобщающей силовые характеристики катков, которые влияют на процесс уплотнения с учетом изменения свойств уплотняемого материала. Предложенная математическая модель позволяет моделировать процесс уплотнения слоя материала при разных методах уплотнения и изменении свойств уплотняемого материала.

**Методы.** При разработке математической модели процессов уплотнения использовались методы математического моделирования при определении напряжений в зоне контакта вальца катка с поверхностью уплотняемого слоя. Установление закономерностей изменения свойств уплотняемого материала под действием нагрузки проводилось на основе реологических исследований, по результатам которых получены зависимости характеристик слоя смеси (коэффициенты жесткости и вязкого сопротивления) от действующей нагрузки. Для уточнения полученных результатов моделирования влияния нагрузки и свойств материала на качество работы проведены экспериментальные исследования на стенде модели CRT-RC-H2, по результатам которых установлена связь между деформацией слоя и его коэффициентом уплотнения.

**Результаты.** Предложенная математическая модель позволяет моделировать процесс уплотнения слоя дорожной одежды при применении разных катков и изменении характеристик слоя материала в процессе уплотнения. По результатам исследования установлена связь между качеством уплотнения (коэффициентом уплотнения) и деформацией слоя под действием нагрузки.

**Заключение.** 1. По результатам математического моделирования установлены аналитические зависимости для расчета контактных напряжений в зоне контакта жесткого вальца катка с поверхностью уплотняемого слоя материала.

2. По результатам реологических испытаний установлены связи между деформацией и характеристиками уплотняемого слоя материала под действующей нагрузкой.

3. Установлена связь между деформацией слоя смеси и коэффициентом уплотнения слоя асфальтоогранулята.

4. Представленная математическая модель процесса уплотнения позволяет моделировать технологию уплотнения слоев дорожной одежды.

**Ключевые слова:** математическая модель; асфальтоогранулят; деформация слоя; процесс уплотнения; контактные напряжения.

© Пахомова Е.Г., Макая Л.В., Андрианов К.А., Зубков А.Ф., Монастырев П.В., Мордасов Д.М., 2023

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды / Е.Г. Пахомова, Л.В. Макая, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков, П.В. Монастырев, Д.М. Мордасов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 75-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89>.

Поступила в редакцию 10.05.2023

Подписана в печать 28.06.2023

Опубликована 02.08.2023

## Development of a Mathematical Model of Compaction Processes Road Layer

Ekaterina G. Pakhomova <sup>1</sup>, Lionel V. Makaya <sup>2</sup>, Konstantin A. Andrianov <sup>2</sup>, Anatoly F. Zubkov <sup>2</sup>, Pavel V. Monastyrév <sup>2</sup> ✉, Denis M. Mordasov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Tambov State Technical University  
106/5 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russian Federation

✉ e-mail: monastyrév68@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of this work is to develop a mathematical model that generalizes the power characteristics of rollers that affect the compaction process, taking into account changes in the properties of the compacted material. The proposed mathematical model makes it possible to simulate the process of compaction of a material layer with different compaction methods and changes in the properties of the compacted material.

**Objectives.** To achieve this goal, it is necessary to establish the influence of the parameters of the roller roller, taking into account the sealing method used, on the magnitude of stresses in the zone of its contact with the surface of the material layer. The efficiency of the sealing process depends on the compliance of the stresses in the contact zone of the roller roller with the characteristics of the material, which are determined on the basis of experimental data.

**Methods.** When developing a mathematical model of compaction processes, mathematical modeling methods were used to determine stresses in the contact zone of the roller roller with the surface of the compacted layer. The establishment of patterns of changes in the properties of the compacted material under the influence of load was carried out on the basis of rheological studies, the results of which obtained the dependence of the characteristics of the mixture layer (coefficients of stiffness and viscous resistance) on the acting load. To clarify the obtained results of modeling the effect of load and material properties on the quality of work, experimental studies were carried out on the CRT-RC-H2 model stand, according to the results of which a connection was established between the deformation of the layer and its compaction coefficient.

**Results.** The proposed mathematical model makes it possible to simulate the process of compaction of the pavement layer when using different rollers and changing the characteristics of the material layer during the compaction process. According to the results of the study, a relationship was established between the quality of the seal (compaction coefficient) and the deformation of the layer under load.

**Conclusion.** 1. Based on the results of mathematical modeling, analytical dependences have been established for calculating contact stresses in the contact zone of the rigid roller roller with the surface of the compacted material layer. 2. According to the results of rheological tests, the connections between the deformation and the characteristics of the compacted layer of the material under the operating load are established.

3. The relationship between the deformation of the mixture layer and the compaction coefficient of the asphalt granulate layer is established.

4. The presented mathematical model of the compaction process makes it possible to simulate the technology of compaction of layers of pavement.

**Keywords:** mathematical model; asphalt granulate; layer deformation; compaction process; contact stresses.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Pakhomova E. G., Makaya L. V., Andrianov K. A., Zubkov A. F., Monastyrnev P. V., Mordasov D. M. Development of a Mathematical Model of Compaction Processes Road Layer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 75-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89>.

Received 10.05.2023

Accepted 28.06.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

Работоспособность дорожной конструкции зависит от соблюдения технологии строительства, обеспечивающей выбор параметров машин с учетом свойств применяемого материала. Основной операцией при устройстве дорожных одежд является процесс уплотнения. Наибольший эффект обеспечивается при условии соответствия контактных напряжений под рабочим органом машины прочностным характеристикам уплотняемого материала [1-7].

Строительство автомобильной дороги связано с использованием разных материалов (грунт, песок, щебень, асфальтобетонные и цементобетонные смеси), каждый из которых обладает своими свойствами и прочностными характеристиками. Установленные пределы прочности и влияющие на них факторы позволяют обосновать технологические режимы применяемых машин. Для обеспечения задач по повышению срока эксплуатации автомо-

бильных дорог применяют новые материалы, которые требуют дополнительных исследований.

Машины для уплотнения материала характеризуются разной массой, характеристиками и режимами воздействия на уплотняемый материал. Под действием нагрузки в слое материала возникает деформация, изменяющая свойства уплотняемого материала (плотность, жесткость, вязкость, пористость) и для достижения требуемого качества уплотнения необходимо повышение нагрузки в процессе уплотнения.

## Материалы и методы

Анализ параметров катков с жестким металлическим вальцом показал, что обобщающей величиной, характеризующей воздействие вальца на материал, является отношение  $Q/Br$  ( $\text{Кн/м}^2$ ) или  $q/r$ , где  $q$  – линейное давление вальца ( $\text{Кн/м}$ ),  $r$  – радиус вальца (м).

Установлено, что силовые характеристики катков находятся в определенных интервалах с учетом типа катка и

его массы [1-3]. Статистический анализ параметров катков показал, что в зависимости от типа катка отношение  $q/r$  составляет для легких катков 0,025-0,038, средних 0,035-0,052 и тяжелых более 0,052. Для вибрационных катков отношение  $q/r$  находится в пределах 0,09-0,15.

Установлено, что величина контактных напряжений под вальцом катка в статическом режиме работы определяется следующей зависимостью [1]:

$$\sigma_k = \sqrt{qE_d/r}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где  $E_d$  – модуль деформации уплотняемого слоя материала, МПа.

При работе вибрационных катков величина контактных напряжений под вальцом возрастает за счет вибрации, что позволяет повысить величину контактных напряжений. Величина контактных напряжений под вибрационным вальцом катка определяется по формуле

$$\sigma_k = K_3 \sqrt{qE_d/r}, \text{ МПа} \quad (2)$$

где  $K_3$  – коэффициент эффективности, зависящий от относительной вынуждающей силы, представляющий собой отношение вынуждающей силы ( $P$ ) к силе тяжести вальца и части рамы катка ( $Q$ ), приходящейся на валец.

Численное значение коэффициента определяется по формуле

$$K_3 = 1,67 + 1,31 \ln \square (P/Q), \text{ безразмерная величина.} \quad (3)$$

Из представленных выше зависимостей видно, что контактные напряжения зависят также от свойств материала, которые характеризуются модулем деформации уплотняемого материала ( $E_d$ ).

Экспериментально установлено, что контакт вальца катка с поверхностью слоя зависит от свойств материала. С учетом свойств материала угол контакта вальца при первом проходе катка ( $\beta_0$ ) определяется зависимостями с учетом вида грунта, град:

- глина:

$$\beta_0 = 24,75 - 5,69 \ln \square (E), \quad (4)$$

- суглинок:

$$\beta_0 = 22,94 - 6,18 \ln \square (E), \quad (5)$$

- мелкозернистая смесь:

$$\beta_0 = 24,53 - 5,02 \ln (E), \quad (6)$$

- крупнозернистая смесь:

$$\beta_0 = 17,53 - 4,04 \ln (E) \quad (7)$$

- асфальтогранулят:

$$\beta_0 = 19,67 - 4,87 \ln (E). \quad (8)$$

Коэффициенты корреляции уравнений находятся в пределах 0,97-0,99.

В процессе уплотнения за счет числа проходов по одному следу меняется деформативная способность материала и угол контакта вальца. Изменение угла контакта вальца в зависимости от числа проходов катка по одному следу с учетом вида материала можно определить по формулам:

- грунт:

$$\beta = \beta_0 - 3,80 \ln (N), \quad (9)$$

- мелкозернистая смесь:

$$\beta = \beta_0 - 3,74 \ln (N), \quad (10)$$

- крупнозернистая смесь:

$$\beta = \beta_0 - 4,09 \ln (N), \quad (11)$$

- асфальтогранулят:

$$\beta = \beta_0 - 4,10 \ln (N), \quad (12)$$

где  $N$  – число проходов катка по одному следу. Коэффициенты корреляции уравнений составляют 0,96-0,98.

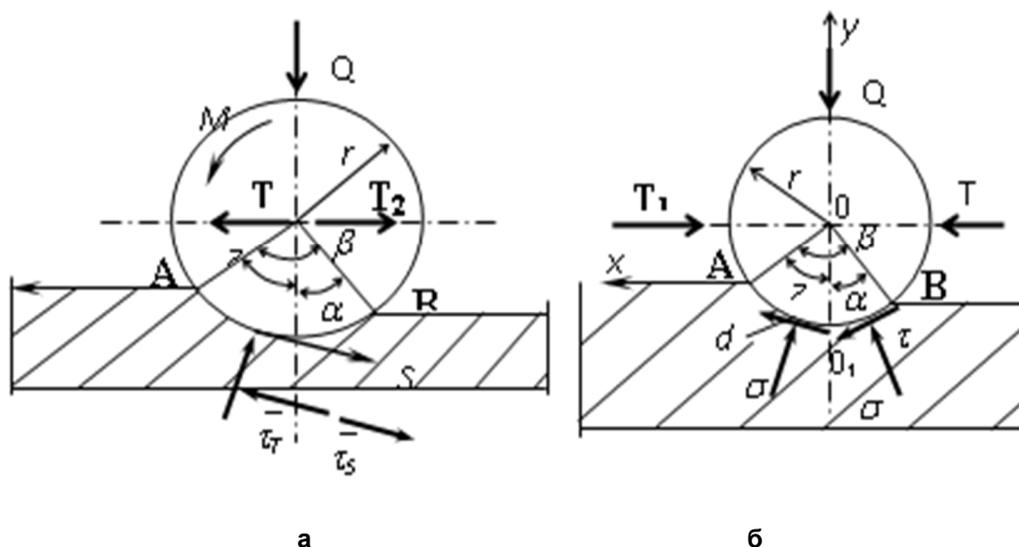
Установлено, что с числом проходов катка изменяется не только угол  $\beta$ , но и угол  $\alpha$ . Экспериментально установлено, что между углами контакта  $\beta$  и  $\alpha$  имеется связь, которая имеет вид:

$$\alpha/\beta = 0,016 \ln(n) + 0,465, \quad (13)$$

где  $n$  – номер прохода катка по одному следу. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Установленные закономерности изменения углов контакта вальца с поверхностью слоя в процессе уплотнения позволяют моделировать контактные напряжения в зоне контакта вальца с учетом свойств материала и параметров катка.

На рис. 1 представлена схема контакта вальцов катка с поверхностью слоя материала. Контактная поверхность вальца с материалом зависит от деформативной способности материала и определяется углом контакта вальца  $\beta$ .



**Рис. 1.** Взаимодействие вальцов катка с уплотняемым материалом: **а** – ведущий валец; **б** – ведомый; **Q** – масса вальца и нагрузка от рамы катка; кН; **M** – крутящий момент, приложенный к ведущему вальцу катка, кН·м; **r** – радиус вальца, м; **T** – усилие от рамы катка на валец, кН;  $\alpha$  – угол, отражающий упругую деформацию, град.;  $\beta$  – угол, отражающий полную деформацию материала под вальцом;  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\tau}$  – нормальные и касательные напряжения в зоне контакта вальца с материалом; **T<sub>1</sub>** – сила сопротивления движению вальца катка со стороны уплотняемого материала; **S** – сила тяги катка, кН

**Fig. 1.** The interaction of the rollers of the roller with the compacted material: **a** – the driving roller; **b** – the driven one; **Q** – the mass of the roller and the load from the roller frame; кN; **M** – the torque applied to the driving roller of the roller, кN·m; **r** – the radius of the roller, m; **T** – the force from the roller frame on the roller, кN;  $\alpha$  – angle reflecting elastic deformation, deg.;  $\beta$  – angle reflecting the complete deformation of the material under the roller;  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\tau}$  – normal and tangential stresses in the contact zone of the roller with the material; **T<sub>1</sub>** – the force of resistance to the movement of the roller roller from the side of the compacted material; **S** – the traction force of the roller, кN

Экспериментально установлено, что напряжения под вальцом катка равномерно распределяются по его ширине. Следовательно расчет напряжений по дуге контакта вальца можно вести как для плоской задачи. В общем виде напряжение в зоне контакта вальца с материалом определяется:

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_y + \vec{\sigma}_x + \vec{\tau}_y + \vec{\tau}_x + \vec{\sigma}_s + \vec{\tau}_s, \text{ МПа} \quad (14)$$

где  $\vec{\sigma}_y, \vec{\sigma}_x, \vec{\tau}_y, \vec{\tau}_x, \vec{\sigma}_s, \vec{\tau}_s$  – составляющие общего напряжения от действия силовых факторов вальца катка.

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=0 \rightarrow \sigma_{0y} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \\ &= \tau_{Sx} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=\beta \rightarrow \sigma_{Qy} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \\ &= \tau_{Sx} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Граничные условия можно представить в виде:

$$\varphi=z \rightarrow d\sigma_{Qy}/d\varphi=0, \quad (17)$$

$$d\tau_{Fx}/d\varphi=0, \quad (18)$$

$$d\tau_{Sx}/d\varphi=0, \quad (19)$$

$$\sigma_{Qx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = 0. \quad (20)$$

В качестве аппроксимирующей функции принята зависимость:

$$\sigma = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 + a_4\varphi^4, \quad (21)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – коэффициенты ряда;  $\varphi$  – переменная величина, определяющая точку в зоне контакта вальца с материалом.

Начальные и граничные условия имеют вид:

Начальные условия:

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=0 \rightarrow \sigma_{Qy} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \\ &= \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \tau_{Sx} = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=\beta \rightarrow \sigma_{Qy} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \\ &= \tau_{Sx} = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Граничные условия:

$$\varphi = \frac{zd\sigma_{Qy}}{d\varphi} = 0; \quad (24)$$

$$\frac{d\tau_{Fx}}{d\varphi} = 0; \quad (25)$$

$$\frac{d\tau_{Sx}}{d\varphi} = 0; \quad (26)$$

$$\sigma_{Qx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = 0. \quad (27)$$

С учетом действия сил на валец, начальных и граничных условий получены зависимости для расчета составляющих общего напряжения под вальцом, которые имеют вид:

$$\vec{\sigma}_{Qy} = (A_{11}\varphi + A_{21}\varphi^2 + A_{31}\varphi^3 + A_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (28)$$

$$\vec{\sigma}_{Qx} = (B_{11}\varphi + B_{21}\varphi^2 + B_{31}\varphi^3 + B_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (29)$$

$$\vec{\tau}_{Fy} = (D_{11}\varphi + D_{21}\varphi^2 + D_{31}\varphi^3 + D_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (30)$$

$$\vec{\tau}_{Fx} = (\Phi_{11}\varphi + \Phi_{21}\varphi^2 + \Phi_{31}\varphi^3 + \Phi_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (31)$$

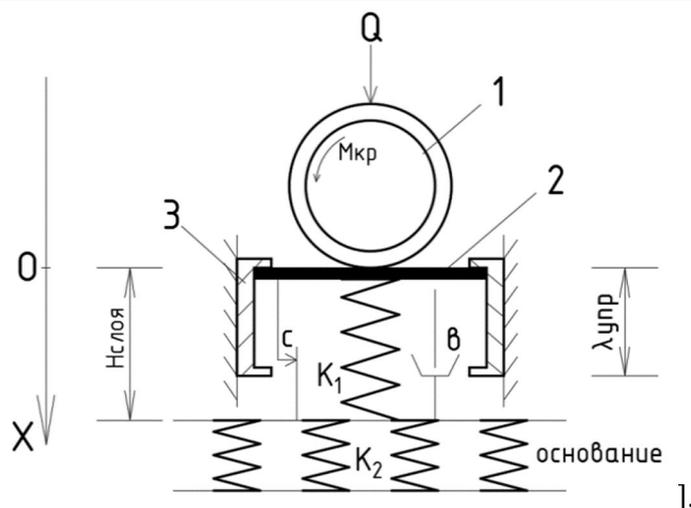
$$\vec{\tau}_{Sy} = (S_{11}\varphi + S_{21}\varphi^2 + S_{31}\varphi^3 + S_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (32)$$

$$\vec{\tau}_{Sx} = (O_{11}\varphi + O_{21}\varphi^2 + O_{31}\varphi^3 + O_{41}\varphi^4) / \Delta, \quad (33)$$

где  $A_{il}, B_{il}, \Phi_{il}, D_{il}, S_{il}, O_{il}$  – коэффициенты, зависящие от параметров катка и свойств материала;  $\Delta$  – определитель системы уравнений [8].

Для расчета напряжений в зоне контакта вальца с материалом разработана программа для ЭВМ, позволяющая установить зависимость величины напряжений от числа проходов катка по одному следу и свойств уплотняемого материала [9].

Анализ работ, связанных с уплотнением материалов, показал, что моделирование процесса выполняется с применением теории реологии. В реологических моделях свойства материала представляются в виде моделей, характеризующих упругость, вязкость и трение. Реологическая модель уплотнения асфальтогранулята представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Реологическая модель уплотнения битумоминеральной смеси: **1** – валец катка; **2** – поверхность покрытия; **3** - невесомая пробка.  $Q$  - сила тяжести, передаваемая от вальца катка на уплотняемую поверхность, кН;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты жесткости материала и основания, МПа/мм;  $\eta$  – коэффициент вязкого сопротивления, МПа·с;  $\lambda_{упр}$  – деформация (перемещение невесомой пробки), характеризующая упругую деформацию материала, мм;  $X_1$  – перемещение поверхности покрытия под действием нагрузки, мм;  $X_2$  – перемещение пробки, характеризующее остаточную деформацию, мм

**Fig. 2.** Rheological model of compaction of bitumen-mineral mixture: **1** – roller roller; **2** – coating surface; **3** - weightless plug.  $Q$  - is the gravity force transmitted from the roller roller to the compacted surface, kN;  $K_1$  and  $K_2$  - are the stiffness coefficients of the material and the base, MPa / mm;  $\eta$  - is the coefficient of viscous resistance, MPa·s;  $\lambda_{upr}$  - is the deformation (movement of the weightless plug) characterizing the elastic deformation of the material, mm;  $X_1$  - is the movement of the coating surface under the action of a load, mm;  $X_2$  – the movement of the plug, characterizing the residual deformation, mm

## Результаты и их обсуждение

На поверхность слоя материала действует сила  $Q$ , представляющая нагрузку от вальца катка. В зоне контакта вальца возникают напряжения, способствующие развитию деформации материала. Невесомая пробка **3** под действием нагрузки перемещается вместе с площадкой **2** и моделирует остаточную деформацию материала. Пробка **3** перемещается вместе с площадкой **2** вниз при условии, что  $x_1 - x_2 = 0$ . При снятии нагрузки площадка **2** перемещается вверх до верхнего упора пробки **3**. Ско-

рость подъема пробки определяется скоростью перемещения вальца.

Из представленной реологической модели видно, что развитие деформации уплотняемого слоя зависит от прочности нижележащего слоя. При его недостаточной прочности в процессе уплотнения происходит его доуплотнение при условии высокой уплотняющей способности катка. Если  $K_1 > K_2$ , то происходит уплотнение основания под дорожной одеждой, а при условии, что  $K_1 < K_2$  – уплотняется слой материала.

Начальные условия перемещения поверхности покрытия и пробки имеют вид:

$$T=t_0; x_1=0; x_2=\lambda_{упр}; \quad (34)$$

$$N=(k_1+k_2)x_1+bx_2 \text{ при } x_2-x_1 \leq \lambda_{упр}; \quad (35)$$

$$N=x_2=\lambda_{упр} \text{ при } x_2-x_1 > \lambda_{упр}; \quad (36)$$

$$x_2=x_{2max}-v_0t \text{ при } x_2-x_1 > \lambda_{упр}, \quad (37)$$

где  $N$  – сила, действующая на частицу материала, кН,  $v_0$  – скорость перемещения пробки.

Представленная модель процесса уплотнения позволяет установить влияние нагрузки (напряжения) на остаточную деформацию слоя под действием нагрузки. Требования к прочности основания зависят от вида грунта, дорожно-климатической зоны и определяются нормативным документом, согласно которому модуль жесткости грунта находится в пределах от 0,3 до 1,8 МПа.

По результатам проведенных исследований установлена зависимость влияния размера частиц материала, толщины слоя и напряжения на общий коэффициент жесткости слоя (асфальтогранулята) при устройстве дорожных конструкций, который определяется зависимостью:

$$K_{ж}=3,82 K_{\sigma} K_{\phi} K_h, \quad (38)$$

где  $K_{\sigma}$ ,  $K_{\phi}$ ,  $K_h$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние напряжения, в зависимости от размера частиц асфальтогранулята и толщины слоя.

Численное значение коэффициентов определяется выражениями:

$$K_{ж\sigma}=-0,079\sigma^3+0,182\sigma^2+0,76\sigma+0,195; \quad (39)$$

$$K_{\phi}=0,96e^{0,046N}; \quad (40)$$

$$K_h=1,56e^{-4,78h}, \quad (41)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $h$  – толщина слоя, м;  $N$  – размер частиц материала.

Под действием нагрузки изменяется не только коэффициент жесткости, но коэффициент вязкости слоя. В общем виде коэффициент вязкости слоя определяется по формуле:

$$\eta=0,289 K_{\text{фрак}} K_{\sigma} K_h,$$

где  $K_{\sigma}$ ,  $K_{\text{фрак}}$ ,  $K_h$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние напряжения в зависимости от размера частиц асфальтогранулята и толщины слоя.

Численное значение коэффициентов определяется по формулам:

$$K_{\eta\sigma}=-0,094\sigma^3+0,23\sigma^2+0,72\sigma+0,22, \text{ с/мм}^2; \quad (43)$$

$$K_{\text{фрак}}=0,138N^3-0,99N^2+2,33N-0,48; \quad (44)$$

$$K_h=0,826\ln(h)+3,48, \quad (45)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $h$  – толщина слоя, м;  $N$  – номер фракции. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Установлено, что между коэффициентами вязкости и жесткости, независимо от толщины слоя и размера фракций гранулята, существует связь, которая имеет вид:

$$\eta=bK_{ж}, \quad (46)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от толщины слоя при укладке, численное значение которого находится в пределах от 2,5 до 10.

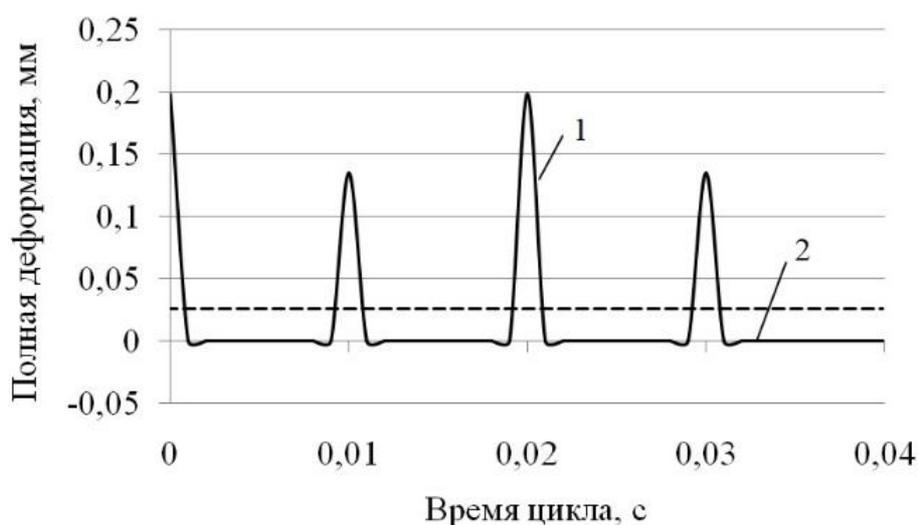
Полученные закономерности изменения свойств уплотняемого материала от нагрузки и конструктивных параметров слоя позволяют моделировать воздействие нагрузки на деформацию слоя. Для расчета деформации слоя разработана программа на ЭВМ, позволяющая моделировать влияние свойств матери-

ала и параметров нагрузки на развитие деформаций в уплотняемом материале [10]. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

Динамическая нагрузка	<input type="text" value="0,15"/>	Н/мм <sup>2</sup>	Площадь штампа	<input type="text" value="4000"/>	мм <sup>2</sup>
Напряжение рабочего органа	<input type="text" value="0,1"/>	Н/мм <sup>2</sup>			
w	<input type="text" value="314"/>	Рад/с			
m	<input type="text" value="0,001"/>	граммы			
k	<input type="text" value="5"/>	Н/мм <sup>2</sup>			
b	<input type="text" value="10"/>	Н*с/мм <sup>2</sup>			
y	<input type="text" value="5"/>	град			
Упругий прогиб	<input type="text" value="0,1"/>	мм			

**Рис. 3.** Интерфейс программы по расчету деформации слоя

**Fig. 3.** Interface of the program for calculating the deformation of the layer



**Рис. 4.** Деформации слоя при уплотнении вибрационным вальцом катка за время действия одного цикла нагрузки: **1** – полная деформация; **2** – упругая деформация

**Fig. 4.** Deformations of the layer during compaction by a vibrating roller of the roller during the action of one load cycle: **1** – complete deformation; **2** – elastic deformation

Развитие деформации под действием нагрузки приводит к повышению плотности уплотняемого слоя. величиной, характеризующей качество уплотнения, является коэффициент уплотнения.

Для уточнения полученных результатов моделирования влияния нагрузки и свойств материала на деформацию слоя и установления связи деформации с коэффициентом уплотнения в лабораторных условиях проведены исследования на стенде модели CRT-RC-H2. В процессе проведения эксперимента определялись плотность и деформация слоя после проходов рабочего органа катка. В качестве уплотняемого материала применялся асфальтогранулят фракций 5-20 и 20-40 мм. Коэффициент уплотнения слоя асфальтогранулята определялся неразрушающим методом с применением прибора ПАБ-1. Исследования проводились в соответствии с ПНСТ 185-2016 (EN 12697-33) [11-20].

По результатам моделирования установлены зависимости коэффициента уплотнения от деформации слоя, размера фракции и толщины, которые имеют вид:

- при толщине 0,05м:
  - для фракции 5-20 мм  $K_y=0,73e^{0,013\lambda}$ ,
  - для фракции 20-40 мм  $K_y=0,66e^{0,041\lambda}$
- при толщине 0,1м:
  - для фракции 5-20 мм  $K_y=0,47e^{0,0363\lambda}$ ,
  - для фракции 20-40 мм  $K_y=0,72e^{0,014\lambda}$ ,

где  $\lambda$  – деформация слоя материала, мм.

Коэффициент корреляции уравнений равен 0,96-0,98.

### Выводы

1. Выбор параметров уплотняющих машин необходимо осуществлять с учетом характеристик битумоминеральной смеси.
2. Установлены зависимости для определения контактных напряжений под вальцом катка с учетом силового воздействия на уплотняемую смесь.
3. Установлены взаимосвязи между характеристиками слоя асфальтогранулята при действии нагрузки и их влияние на его деформацию.
4. Получены аналитические зависимости между деформацией слоя и его коэффициентом уплотнения.

### Список литературы

1. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: тр. Союздорнии. М., 1980. С. 64-71.
2. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. 1989. № 5. С. 12-13.
3. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. 2005. №10. С.8-9.

4. Цупиков С.Г. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог / под ред. С.Г. Цупикова. М.: Инфра-Инженерия, 2009. 924 с.

5. Калгин Ю.И., Строкин А.С., Тюков Е.Б. Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов. Воронеж, 2014. 223с.

6. Руденский, А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ // Новости в дор. деле: науч.-техн. информ. сб. Информавтодор. М., 2006. Вып.1. С. 11 - 42.

7. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. 272 с.

8. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.И. Антонов, В.Г. Однолько. Тамбов, 2017. 316 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611722 «Расчет напряжений в зоне контакта вальца с уплотняемым материалом» С.А. Сенибабнов, И.С. Архелов, А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.М. Макаров

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663676 «Расчет деформаций материала при действии динамической нагрузки», А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.М. Макаров, М.Э. Пилецкий

11. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement / E.G. Pakhomova, A.F. Zubkov, K.A. Andrianov, P.V. Monastyrev // Journal of applied engineering science. 2020. Vol. 18. № 2. С. 192-197.

12. Макая Л.М., Зубков А.Ф., Андрианов К.А. Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 2023. С. 316-318.

13. Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние свойств материала, получаемого при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа, на деформацию слоя при устройстве дорожной одежды // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 1 (65). С. 85-95.

14. Определение реологических характеристик асфальтогранулята при устройстве слоев дорожной одежды / С.А. Сенибабнов, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков, А.А. Кузнецов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2021. № 1 (12). С. 37-42.

15. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние толщины слоя асфальтогранулята и выбор параметров катков при укреплении обочин автомобильных дорог // Приволжский научный журнал. 2020. №4 (56). С. 163-173.

16. Эффективность применения асфальтогранулята при ремонте и реконструкции автомобильных дорог / Л.М. Макая, С.А. Сенибабнов, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов, 2022. С. 346-349.

17. Зубков А.Ф. Обоснование параметров контакта металлического вальца катка с уплотняемым материалом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Дорожно-транспортное строительство. 2004. № 3. С. 77.

18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 1 (45). P. 42-54.

19. Зубков А.Ф., Зарапина Л.С., Андрианов К.А. Влияние нагрузки на модуль упругости слоя из асфальтогранулята при восстановлении покрытия дорожной одежды // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 1 (65). С. 96-105.

20. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Сенибабнов С.А. Моделирование процессов уплотнения асфальтогранулята с использованием экспериментальных данных // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 2023. С. 293-295.

## References

1. Kharkhuta N.Ya. [Questions of the theory of road surface compaction]. *Uplotnenie zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd. tr. Soyuzdornii* [Compaction of earth bed and road pavements. Proc. of Soyuzdornia. Soyuzdornia]. Moscow, 1980, pp. 64-71 (In Russ.).

2. Permyakov V.B., Zakharenko A.V. Obosnovanie velichiny kontaknykh davlenii dlya uplotneniya asfal'tobetonykh smesei [Justification of the contact pressure value for compaction of asphalt concrete mixtures]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = SDM journal*, 1989, no. 5, pp. 12-13.

3. Permyakov V.B. Effektivnost' uplotneniya asfal'tobetonykh smesei v dorozhnykh pokrytiyakh [Efficiency of compaction of asphalt-concrete mixtures in road pavements]. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*, 2005, no.10, pp. 8-9.

4. Tsupikov S.G. *Spravochnik dorozhnogo мастера. Stroitel'stvo, ekspluatatsiya i remont avtomobil'nykh dorog* [Reference book of a road master. Construction, operation and repair of motorways]; ed. by S.G. Tsupikov. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2009, 924 p.

5. Kalgin Yu.I., Strokin A.S., Tyukov E.B. *Perspektivnye tekhnologii stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii s primeneniem modifitsirovannykh bitumov* [Perspective technol-

ogies of construction and repair of road surfaces with the use of modified bitumen]. Voronezh, 2014, 223 p.

6. Rudenskiy A.V. [Cold asphalt concrete. Possibilities of extending the season of construction and repair works]. *Novosti v dor. dele. Nauch.-tekhn. inform. sb. Informavtodor* [News in dor. business: Scientific and technical inform. sb. Informavtodor]. Moscow, 2006, is. 1, pp. 11 - 42 (In Russ.).

7. Kalgin Yu.I. *Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modifitsi-rovannykh bitumov* [Road bitumen-mineral materials based on modified bitumen]. Voronezh, 2006, 272 c.

8. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Antonov A.I., Odnolko V.G. *Tekhnologiya stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii nezhestkogo tipa s uchetom temperaturnykh rezhimov asfal'tobetonnykh smesei* [Technology of construction and repair of non-rigid road pavements taking into account the temperature conditions of asphalt concrete mixtures]. Tambov, 2017. 316 p.

9. Senibabnov S.A., Arkhelov I.S., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM* [Certificate of state registration of the computer programme No. 2020611722 "Calculation of stresses in the contact zone of the roller with the compacted material"].

10. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M., Piletsky M.M. Certificate of State Registration of Computer Programme No. 2017663676 *Raschet napryazhenii v zone kontakta val'tsa s uplotnyaemym materia-lom* ["Calculation of Material Deformations under Dynamic Load Action"].

11. Pakhomova E.G., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Monastirev P.V. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement. *Journal of applied engineering science*. 2020, vol. 18, no. 2, pp. 192-197.

12. Makaya L.M., Zubkov A.F., Andrianov K.A. [Development of the mathematical model of the processes of compaction of the pavement layer]. *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzhenii. Tezisy докладов VIII-go mezh-dunarodnogo simpoziuma* [Actual problems of computer modelling of structures and constructions. Theses of reports of the VIII-th International Symposium]. Tambov, 2023, pp. 316-318 (In Russ.).

13. Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Vliyanie svoistv materiala, poluchaemogo pri kholodnom frezerovanii pokrytii nezhestkogo tipa, na deformatsiyu sloya pri ustroistve dorozhnoi odezhdy [Influence of the material properties obtained by cold milling of non-rigid type pavements on the layer deformation during pavement construction]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2022, no. 1 (65), pp. 85-95.

14. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Kuznetsov A.A. Opredelenie reologicheskikh kharakteristik asfal'togranulyata pri ustroistve sloev dorozhnoi odezhdy [Determination of rheological characteristics of asphalt granulate in the process of pavement layer construction]. *Vestnik PGUAS: stroitel'stvo, nauka i obrazovanie = Vestnik PSUAS: Construction, Science and Education*, 2021, no. 1 (12), pp. 37-42.

15. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Vliyanie tolshchiny sloya asfal'togranulyata n vybor paramtrov katkov pri ukreplenii obochin avtomobil'nykh dorog [Influence of the asphalt granulate layer thickness and the choice of roller parameters for road shoulder reinforcement]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal = Volga Region Scientific Journal*, 2020, no.4 (56), pp. 163-173.

16. Makaya L.M., Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. [Efficiency of asphalt granulate application at repair and reconstruction of motor roads]. *Ustoichivoe razvitie regiona: arkhitektura, stroitel'stvo i transport. Materialy IX-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Sustainable development of the region: architecture, construction and transport. Proceedings of the IX-th International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2022, pp. 346-349 (In Russ.).

17. Zubkov A.F. Obosnovanie parametrov kontakta metallichesкого val'tsa katka s uplotnyaemym materialom [Justification of the contact parameters of the roller metal roller with the compacted material]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Dorozhno-transportnoe stroitel'stvo = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Road and Transport Construction*, 2004, no. 3, 77 p.

18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. [Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method]. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2020, no. 1 (45), pp. 42-54.

19. Zarapina L.S., Andrianov K.A. Vliyanie nagruzki na modul' uprugosti sloya iz asfal'togranulyata pri vosstanovlenii pokrytiya dorozhnoi odezhdy [Load effect on the elasticity modulus of the asphalt granulate layer at the road pavement rehabilitation]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2022, no. 1 (65), pp. 96-105.

20. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Senibabnov S.A. [Modelling of asphalt granulate compaction processes using experimental data]. *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruktsii i sooruzhenii. Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma* [Actual problems of computer modelling of structures and constructions. Theses of reports of the VIII-th International Symposium]. Tambov, 2023, pp. 293-295 (In Russ.).

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Пахомова Екатерина Геннадиевна**, кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [egpakhomova@yandex.ru](mailto:egpakhomova@yandex.ru)

**Ekaterina G. Pakhomova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail address: [egpakhomova@yandex.ru](mailto:egpakhomova@yandex.ru)

**Мавунгу Макая Лионель**, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

**Makaya Lionel Mavungu**, Post-Graduate Student, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

**Андрианов Константин Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [konst-68@yandex.ru](mailto:konst-68@yandex.ru)

**Konstantin A. Andrianov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department "Urban Construction and Highways", Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [konst-68@yandex.ru](mailto:konst-68@yandex.ru)

**Зубков Анатолий Федорович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@yandex.ru)

**Anatoly F. Zubkov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department "Urban Construction and Highways", Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail address: [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@yandex.ru)

**Монастырев Павел Владиславович**, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент, директор института «Архитектура, строительство и транспорт», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [monastyrev68@mail.ru](mailto:monastyrev68@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0885-0937>, Researcher ID: S-6516-2016

**Pavel V. Monastyrev**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Architecture, Construction and Transport, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [monastyrev68@mail.ru](mailto:monastyrev68@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0885-0937>, Researcher ID: S-6516-2016

**Мордасов Денис Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [dmmordasov@rambler.ru\\_mit@tstu.ru](mailto:dmmordasov@rambler.ru_mit@tstu.ru)

**Denis M. Mordasov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Materials and Technology Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [dmmordasov@rambler.ru\\_mit@tstu.ru](mailto:dmmordasov@rambler.ru_mit@tstu.ru)