

УДК 625 7/8

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-146-161

*Б. БЕХЗОДИ, К.А. АНДРИАНОВ, А.Ф. ЗУБКОВ,  
Тамбовский государственный технический университет*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ХОЛОДНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Отдаленность места строительства от производственной базы, большие объемы работ, недостаточная производительность асфальтобетонных заводов по приготовлению горячих асфальтобетонных смесей делают актуальным вопрос применения холодных асфальтобетонных смесей для строительства дорожных покрытий. В этом случае возможность заранее заготавливать на производственной базе предприятия смеси с учетом сохранности ее свойств в течение нескольких месяцев позволяет увеличивать длительность строительного сезона.

Цель исследования – повышение качества строительства дорожных покрытий нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей.

Рассмотрены расчетные модели конструкции дорожного покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей, уточняющие влияние конструктивных, климатических, технологических и теплофизических свойств материалов на качество устройства покрытия.

Показано, что устройство дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей на основе битумных материалов (СГ 130-200; БНД 200-300 и МГ 70-130) даже при положительных температурах окружающего воздуха не обеспечивает требуемого качества покрытия.

Для повышения качества устройства дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей необходимо выполнять нагрев основания перед укладкой слоя холодной смеси. Температура нагрева основания зависит от толщины укладываемого слоя и температуры окружающего воздуха.

**Ключевые слова:** покрытия нежесткого типа; холодные асфальтобетонные смеси; тепловые процессы; нагрев основания; уплотнение.

**Для цитирования:** Бехзоди Б., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Моделирование тепловых процессов при строительстве покрытий нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 146–161.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-146-161

*B. BEHZODI, K.A. ANDRIANOV, A.F. ZUBKOV,  
Tambov State Technical University*

## **MODELING OF THERMAL PROCESSES IN CONSTRUCTION OF NONRIGID PAVEMENTS USING BITUMEN CONCRETE MIXES**

**Relevance.** The remoteness of the construction site from the production base, large volumes of work, insufficient productivity of asphalt concrete plants for the preparation of hot asphalt concrete mixtures makes urgent the use of cold bitumen concrete mixes for the road construction. The preliminary mix preparation on the production sites with preservation of

its properties for several months allows to increase the duration of the construction season.

**Purpose.** Quality improvement of construction of non-rigid road surfaces using cold bitumen concrete mixes. **Materials and methods.** Models of road pavement structure based on cold bitumen concrete mixes are proposed to clarify the influence of the structural, climatic, technological and thermophysical properties of materials on the pavement quality. **Research results.** It is shown that the construction of road surfaces using cold bitumen concrete mixes even at positive ambient temperatures, does not provide the required surface quality. **Conclusions.** To improve the road paving quality using cold bitumen concrete mixes is necessary to heat the base before laying the cold mix. The heating temperature of the base depends on the layer thickness and ambient temperature.

**Keywords:** nonrigid pavements; cold bitumen concrete mix; thermal process; heating, sealing.

**For citation:** Behzodi B., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Modelirovanie teplovykh protsessov pri stroitel'stve pokrytii nezhestskogo tipa s primeneniem kholodnykh asfal'tobetonnnykh smesei [Modeling of thermal processes in construction of nonrigid pavements using bitumen concrete mixes]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 146–161.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-146-161

### Введение

Обеспечение жизнедеятельности населенных пунктов, расположенных на значительном удалении от промышленных центров, возможно при наличии путей сообщений. В большинстве случаев доставка грузов осуществляется автомобильным транспортом, который требует наличия автомобильных дорог с твердым покрытием, обеспечивающих доставку разных грузов в течение всего года. В настоящий момент асфальтобетонные покрытия являются основным типом покрытий автомобильных дорог. Для устройства покрытий нежесткого типа применяют асфальтобетонные смеси, которые согласно ГОСТ 9128 можно применять как в горячем, так и холодном состоянии. При выборе материала для устройства покрытия учитывают производственные факторы, влияющие на возможности строительства покрытия и организацию производства работ. С учетом отдаленности места строительства от производственной базы, незначительной интенсивности движения транспортных средств, больших объемах работ и недостаточной производительности асфальтобетонного завода по приготовлению горячей смеси решить данный вопрос возможно за счет применения холодных асфальтобетонных смесей [1, 2]. Это позволяет на производственной базе предприятия заготавливать их заранее и обеспечивает сохранность свойств смеси в течение нескольких месяцев, увеличить длительность строительного сезона и сократить количество транспортных средств в период строительства.

Нормативным документом ПНСТ 362-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные холодные и асфальтобетон» определены области применения холодных асфальтобетонных смесей при устройстве дорожных покрытий. Применение жидких органических вяжущих марок СГ, МГ и МГО по ГОСТ 11955 или модифицированных жидких битумов с условной вязкостью в соответствии с ГОСТ 11955 позволяет сохранять свойства смеси до шести месяцев [3].

Образование тонкой битумной пленки на поверхности минеральных частиц смеси в процессе приготовления способствует слабым микроструктурным связям между частицами при хранении и обеспечивает ее рыхлое состояние в течение длительного времени. Применение менее вязких битумов позволяет укладывать смеси при минусовой температуре окружающего воздуха при условии, что температура смеси должна быть не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . Размер фракций минерального материала принимается в интервале от 5,6 до 22,4 мм в зависимости от интенсивности движения транспортных средств и осевой нагрузки. Холодный асфальт выпускают как для устройства покрытия при температуре воздуха от  $+15^{\circ}\text{C}$  и выше, так и для ремонтных работ покрытия в течение всего года.

К недостаткам применения холодного асфальта при устройстве дорожного покрытия следует отнести длительный период формирования структуры покрытия (1–1,5 мес.) и более низкие физико-механические характеристики по отношению к покрытиям с применением горячих смесей. Уплотнение слоя смеси выполняют несколькими проходами легких катков статического действия или катками на пневматических шинах. В процессе эксплуатации дороги уплотнение покрытия осуществляется за счет движения транспортных средств. Применение в качестве вяжущего материала битумов требует учета их свойств от температуры. Поэтому в случае устройства покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей без учета свойств смеси практически невозможно обеспечить требуемые показатели покрытия.

Целью данной работы является обоснование технологии устройства покрытия нежесткого типа с применением холодных асфальтобетонных смесей с использованием прогрева основания, обеспечивающей более высокое качество строительства.

#### **Моделирование технологии устройства дорожного покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей**

Конструкция автомобильной дороги представляет собой сооружение, состоящее из слоев материалов с разными физико-механическими и теплофизическими свойствами. Количество слоев дорожной одежды зависит от технической категории дороги. При устройстве покрытия с применением холодного асфальта укладка смеси осуществляется одним или двумя слоями. При устройстве щебеночного основания укладывают два слоя покрытия. На дорогах III и IV категорий при условии обеспечения требуемого модуля упругости покрытие может устраиваться в один слой. Минимальная толщина дорожной одежды из холодных асфальтобетонных смесей регламентирована нормативным документом СП 34.13330.2012.

С целью уточнения влияния разных факторов (конструктивных, климатических, технологических и теплофизических свойств материалов) на качество устройства дорожного покрытия с применением холодных асфальтобетонных смесей рассмотрены расчетные модели конструкции дороги. Модели приняты с учетом следующих допущений:

– при устройстве покрытия из асфальтобетона смесь распределяется при температуре, равной температуре окружающего воздуха;

- температура основания перед укладкой смеси имеет одинаковую температуру на захватке;
- материал укладываемого слоя однороден;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярно к поверхности слоя;
- потери тепла в слое происходят за счет теплопроводности применяемого материала;
- температура окружающей среды и скорость воздушных масс в процессе устройства покрытия остаются постоянными;
- сцепление слоев обеспечивает термоконтакт.

Конструктивные расчетные модели представлены в виде дифференциальных уравнений, описывающих процессы нестационарной теплопроводности в слоях дорожной одежды с разными свойствами.

Система дифференциальных уравнений в частных производных имеет следующий вид:

а) для одного слоя покрытия:

- слой покрытия

$$\partial t_1 / \partial \tau = (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2);$$

- щебеночный слой основания

$$\partial t_2 / \partial \tau = (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2);$$

- дополнительный слой основания

$$\partial t_3 / \partial \tau = (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2);$$

- грунт земляного полотна

$$\partial t_4 / \partial \tau = (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2); \quad (1)$$

б) для двух слоев покрытия:

- верхний слой покрытия

$$\partial t_1 / \partial \tau = (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2);$$

- нижний слой покрытия

$$\partial t_2 / \partial \tau = (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2);$$

- щебеночный слой основания

$$\partial t_3 / \partial \tau = (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2);$$

- дополнительный слой основания

$$\partial t_4 / \partial \tau = (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2);$$

- грунт

$$\partial t_5 / \partial \tau = (\lambda_5 / c_5 \gamma_5) (\partial^2 t_5 / \partial x^2 + \partial^2 t_5 / \partial y^2 + \partial^2 t_5 / \partial z^2), \quad (2)$$

где  $x, y, z$  – координатные оси;  $t_{1-5}$  – температура, °С;  $\lambda_{1-5}$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м²·К);  $c_{1-5}$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·град;  $\gamma_{1-5}$  – объемная плотность кг/м³;  $\tau$  – время, с.

Экспериментально установлено, что температура слоя и ее распределение в слоях конструкции имеет одинаковое значение в двух плоскостях ( $x, z$ ) и меняется во времени в плоскости ( $y$ ). Поэтому решение задачи сводится к расчету температуры в одной плоскости. В общем виде системы уравнений можно представить как

$$\delta t_i / \delta \tau = (\lambda_i c_i \gamma_i) (\delta^2 t_i / \delta^2 t_i^2), \quad \tau > 0, \quad 0 < y_i < h_i, \quad i = 1-5. \quad (3)$$

Начальные условия имеют вид:

а) для одного слоя покрытия:

$$\begin{aligned} t_1 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_1)} &= t_1'; \\ t_2 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_2)} &= t_2' + \Delta t_2 e^{-\mu_2 \cdot y}; \\ t_3 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_3)} &= t_3' + \Delta t_3 e^{-\mu_3 \cdot y}; \\ t_4 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_4)} &= t_4' + \Delta t_4 e^{-\mu_4 \cdot y}; \end{aligned} \quad (4)$$

а) для двухслойного покрытия:

$$\begin{aligned} t_1 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_1)} &= t_1'; \\ t_2 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_2)} &= t_2' + \Delta t_2 e^{-\mu_2 \cdot y}; \\ t_3 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_3)} &= t_3' + \Delta t_3 e^{-\mu_3 \cdot y}; \\ t_3 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_3=0)} &= t_4 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_3=0)}; \\ t_4 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_4)} &= t_4' + \Delta t_4 e^{-\mu_4 \cdot y}; \\ t_5 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_5)} &= t_5' + \Delta t_5 e^{-\mu_5 \cdot y}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $t_1, t_1', t_2, t_2', t_3, t_3', t_4, t_4'$  – температура в начале и на глубине слоя дорожной конструкции, град;  $e$  – основание натурального логарифма;  $\mu_i$  – коэффициент, характеризующий свойства материала;  $\Delta t_i e^{-\mu_i y}$  – перепад температуры между поверхностью слоя и рассматриваемой точкой на глубине  $y$ .

Граничные условия приняты с учетом следующих допущений:

– соблюдается условие конвективного теплообмена на границе верхнего слоя с окружающей средой

$$\lambda_1 \delta t / \delta y \big|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_{\text{в}}]; \quad (6)$$

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид

$$\lambda_i \delta t_i / \delta y_i \big|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \delta_{i+1} / \delta y_{i+1} \big|_{(y_i=y_{i+1}=0)}, \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (7)$$

– условие на бесконечность, ограничивающую температуру в полупространстве:

$$t_4 \big|_{(\tau=0)}^{(y=h_4=\infty)} < \infty(t_{\text{очн}}), \quad (8)$$

где  $h_i$  – толщина слоев дорожной конструкции, м;  $\tau$  – время, с;  $t_{\text{в}}$  – температура грунта на заданной глубине, °С;  $t_{\text{очн}}$  – температура грунта на заданной глубине, °С;  $t(0; \tau)$  – температура смеси в момент уплотнения, °С;  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, величина которого определяется согласно [4, 5]:

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{изл}}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{изл}}$  – коэффициент теплоотдачи смеси за счет теплового излучения, величина которого зависит от температуры воздуха и смеси;  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи смеси за счет конвективного обмена с окружающей средой, значение которого определяется из выражения, приведенного ниже:

$$\alpha_k = 4,2V + 3,25 e^{-1,28V}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}),$$

где  $V$  – скорость ветра, м/с.

Значение  $\alpha_{\text{изл}}$  определяется по следующей формуле [6]:

$$\alpha_{\text{изл}} = \left\{ \xi c \left[ (t/100)^4 - (t_{\text{в}}/100)^4 \right] \right\} / (t - t_{\text{в}}), \quad (10)$$

где  $c$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $c = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>);  $\xi$  – коэффициент эмиссии, принимается равным 0,9.

С учетом данных, представленных в работе [4], значение коэффициента теплоотдачи асфальтобетонной смеси в зависимости от ее температуры и температуры воздуха определяется по формуле

$$\alpha_{\text{изл}} = 4,05 e^{0,0041t_{\text{см}} + 0,0034t_{\text{возд}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (11)$$

Коэффициент теплопроводности асфальтобетонной смеси зависит от плотности и температуры смеси и определяется зависимостью

$$\lambda = 0,298 e^{0,578\gamma + 0,0898(t/100)}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (12)$$

где  $\gamma$  – плотность смеси, т/м<sup>3</sup>;  $t$  – температура смеси, °C.

Удельная теплоемкость асфальтобетонной смеси, с учетом типа смеси и температуры, определяется по формуле

$$C_{\text{уд}} = 1,371 e^{0,0023t - 0,007\psi}, \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (13)$$

где  $\psi$  – содержание щебня в смеси, %;  $t$  – температура асфальтобетонной смеси, °C.

Известно, что эффективность уплотнения асфальтобетонной смеси достигается в диапазоне динамической вязкости от 10 до 25 Па·с, что соответствует температуре применяемого вяжущего для холодных смесей в пределах от 40 до 65 °C. На рис. 1 представлены зависимости числа циклов приложения нагрузки к горячей смеси от ее температуры при условии получения заданной плотности асфальтобетона с учетом марки битума. Зависимости представлены на основании данных, опубликованных в работе [7].

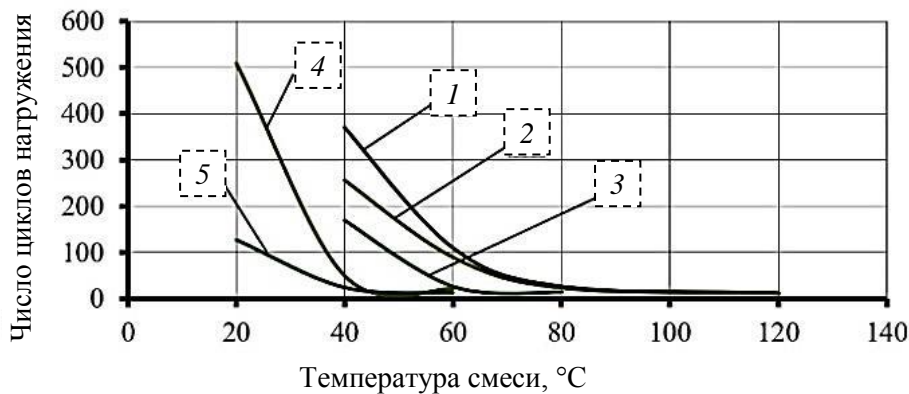


Рис. 1. Зависимость числа циклов приложения нагрузки от температуры смеси:

1 – для смесей с маркой битума БНД 60/90; 2 – БНД 90/130; 3 – БНД 130/200; 4 – БНД 200/300; 5 – СТ 130/200

Для битума марки СГ 130/200 оптимальная температура смеси при уплотнении находится в пределах 42–55 °С, для БНД200/300 – 55–65 °С и МГ70-130 – 40–60 °С [8]. При погрузке в транспортные средства смесь должна быть рыхлой и иметь температуру не выше +25 °С зимой и +30 °С летом. Температура смеси при условии ее длительного хранения равна температуре окружающего воздуха. Поэтому для обеспечения качества устройства покрытия необходимо обеспечить температурные режимы смеси при уплотнении. Нормативными документами определена температура воздуха при устройстве покрытия нежесткого типа. Установлено, что повышение температуры воздуха выше +20 °С способствует нагреву основания за счет солнечной энергии, что необходимо учитывать при расчетах температурных режимов смесей. Доказано, что повышение температуры воздуха выше +40 °С способствует продолжительности работ по уплотнению путем введения в расчетные формулы коэффициента 1,25 [5, 8]. На основании изложенного выше можно сделать вывод, что нагрев основания перед укладкой холодной смеси способствует перераспределению температуры по толщине слоя, что позволяет повысить качество устройства покрытия за счет обеспечения температурных режимов холодных смесей при устройстве покрытия.

Для расчета температуры и ее распределения по толщине слоя в процессе уплотнения с учетом условий производства работ использованы программы [8, 9]. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

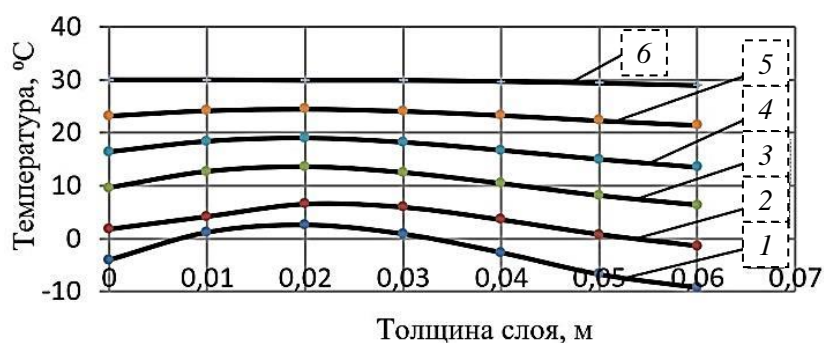


Рис. 2. Распределение температуры по толщине слоя в зависимости от температуры воздуха при температуре смеси при укладке +30 °С без нагрева основания (толщина слоя 0,05 м):  
1 – температура воздуха –20 °С; 2 – –10 °С; 3 – 0 °С; 4 – +10 °С; 5 – +20 °С; 6 – +30 °С

На рис. 2 видно, что при укладке холодной асфальтобетонной смеси с использованием битумов независимо от температуры воздуха обеспечить температурные режимы смеси при уплотнении практически невозможно, что приводит к низкому качеству строительства покрытия. Процесс уплотнения слоя холодной асфальтобетонной смеси регламентирован документом СТО НОСТРОЙ 2.25.40-2011.

Холодные асфальтобетонные смеси характеризуются сравнительно большей жесткостью по отношению к горячим смесям. Для обеспечения мак-

симальной плотности при уплотнении материала необходимо учитывать его прочностные характеристики, которые зависят от температуры смеси при уплотнении. Поэтому рекомендуемые параметры уплотняющих катков для повышения их эффективности требуют уточнения. Исследованиями В.Б. Пермякова доказано, что применение тяжелых катков при низких температурах смеси позволяет достичь требуемого коэффициента уплотнения, но при этом снижается предел прочности асфальтобетона от 18 до 30 % в зависимости от типа смеси [10].

Установлено, что процесс нагрева и охлаждения асфальтобетонных смесей относится к нестационарным тепловым процессам. В зоне контакта слоя с пониженной температурой за счет теплопередачи от нагретого слоя основания происходит повышение температуры с последующим охлаждением слоев покрытия. При расчете температурных режимов и продолжительности выполнения работ за расчетную температуру смеси принимают среднюю температуру слоя, которая соответствует температуре слоя, расположенного на расстоянии одной трети толщины от поверхности укладываемого слоя [4].

Распределение температуры по толщине слоя холодной асфальтобетонной смеси зависит от условий производства работ. Установлено, что за счет солнечной радиации температура поверхности превышает температуру окружающего воздуха порядка 30 % [5]. По результатам моделирования представлено распределение температуры смеси при разных условиях производства работ (рис. 3).

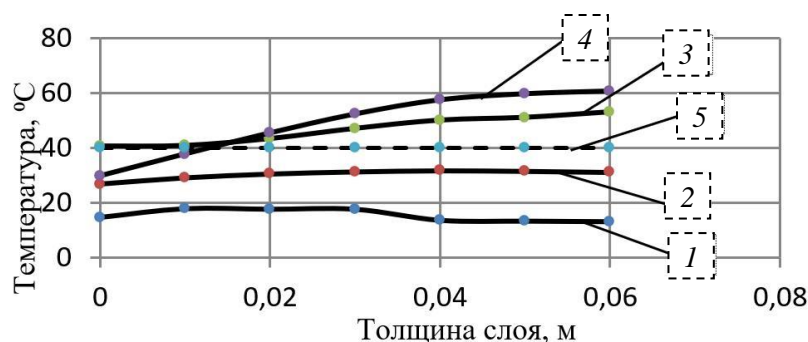


Рис. 3. Распределение температуры смеси при разных условиях производства работ:

1 – температура воздуха +5 °C; 2 – +20 °C; 3 – +30 °C; 4 – нагрев основания до +60 °C; 5 – нижняя граница эффективной температуры уплотнения

Из представленных на рис. 3 данных видно, что температура основания влияет на ее распределение по толщине слоя при укладке. Однако при температуре воздуха до +30 °C обеспечить температурные границы холодной асфальтобетонной смеси на основе битумных вяжущих практически невозможно. Обеспечить температурные режимы смеси и требуемое качество уплотнения возможно за счет нагрева основания. На основании этого можно сделать вывод, что температурные режимы смеси при уплотнении обеспечиваются при превышении температуры воздуха выше 30 °C. При более низких температурах обеспечить температурные режимы смесей можно за счет нагрева основания.



Практикой строительства покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей установлено, что при пониженных температурах воздуха, если предусмотрено устройство нескольких слоев асфальтобетона одного типа смеси, эффективнее укладывать смеси слоями повышенной толщины. Влияние толщины слоя при укладке на распределение температуры по толщине слоя и по времени укладки представлено на рис. 4.

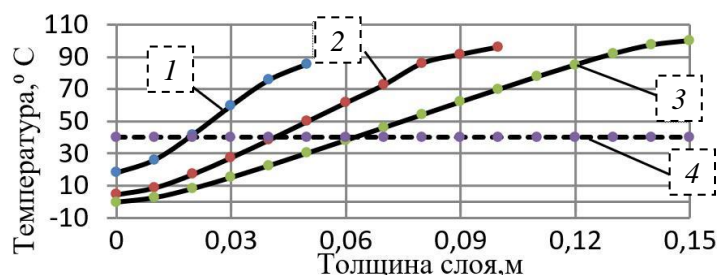


Рис. 4. Изменение средней температуры слоя по толщине через 5 мин после укладки смеси: температура воздуха – минус 10 °С, температура нагрева основания толщиной 0,03 м – +110 °С:  
1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,15 м; 4 – нижняя эффективная температурная граница

Из представленных данных на рис. 4 видно, что увеличение толщины слоя при укладке холодной смеси способствует повышению средней температуры по толщине слоя за счет передачи тепла от нижнего слоя к верхнему. Повышение средней температуры слоя зависит от плотности теплового потока, толщины слоя при укладке и коэффициента теплопроводности применяемого материала. Изменение средней температуры слоя в зависимости от толщины определяется по формулам:

– толщина слоя 0,05 м

$$t = -712037h^3 + 50671h^2 + 370h + 15,57;$$

– толщина слоя 0,1 м

$$t = -77801h^3 + 1266h^2 + 405,1h + 2,49;$$

– толщина слоя 0,15 м

$$t = -29726h^3 + 6490,6h^2 + 305,1h - 1,64, \quad (14)$$

где  $t$  – средняя температура слоя, °С;  $h$  – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 1,0.

Толщина слоя при укладке влияет на возможную продолжительность выполнения работ с учетом эффективной температуры уплотнения слоя в зависимости от температуры нагрева основания (рис. 5).

Из представленных данных на рис. 5 видно, что в зависимости от толщины слоя температура нагрева основания для прогрева слоя до требуемой средней температуры будет разной. Если при толщине укладываемого слоя 0,05 м температура нагрева основания до 110 °С обеспечивает эффективную температуру смеси при уплотнении, то с увеличением толщины слоя такая температура не обеспечивает температурные режимы уплотнения, что влияет

на качество устройства дорожного покрытия. Время выполнения работы по укладке и уплотнению слоя холодной смеси ограничено и составляет 20 мин, что предъявляет повышенные требования к организации производства работ.

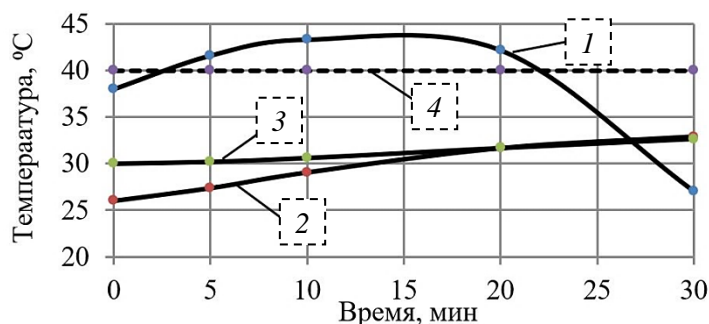


Рис. 5. Изменение средней температуры слоя холодной смеси от толщины во времени при температуре нагрева основания 110 °C:  
1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,15 м

Увеличение температуры нагрева основания и укладка слоя холодной смеси толщиной 0,1 м и выше способствуют при условии достижения средней эффективной температуры смеси уплотнения увеличению продолжительности работы по уплотнению слоя и обеспечению качества строительства покрытия (рис. 6).

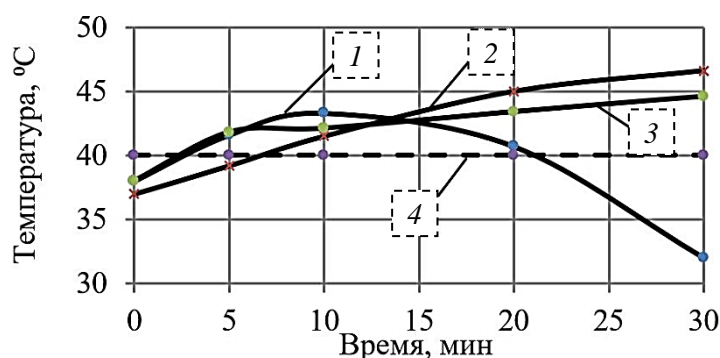


Рис. 6. Продолжительность работы при нагреве основания с разной толщиной слоя покрытия при температуре окружающего воздуха -10 °C:  
1 – толщина слоя при укладке 0,05 м и температуре нагрева основания 110 °C; 2 – 0,1 м и 150 °C; 3 – 0,15 м и 140 °C соответственно; 4 – нижняя эффективная температурная граница

Из представленных данных на рис. 6 видно, что в зависимости от толщины слоя при укладке холодной смеси время начала и окончания работ по уплотнению при условии достижения эффективной средней температуры слоя различается. При укладке слоя толщиной 0,05 м и температуре нагрева основания 110 °C начинать процесс уплотнения можно через 3–5 мин после

укладки. Продолжительность уплотнения составляет 18–20 мин. С увеличением слоя укладки (0,1–0,15 м) уплотнение слоя можно начинать через 8–10 мин после укладки слоя холодной смеси. Продолжительность уплотнения составляет 30–40 мин.

При нагреве основания ниже требуемой величины необходимое время для достижения эффективной температуры слоя возрастает, что следует учитывать при организации работ по уплотнению покрытия (рис. 7).

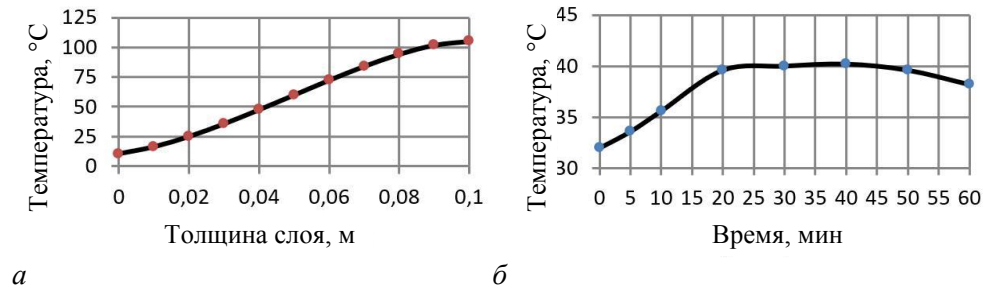


Рис. 7. Распределение температуры по толщине слоя во времени (а) и при нагреве основания 130 °С и толщине слоя 0,1 м (б)

По результатам моделирования установлена зависимость температуры нагрева основания при разных значениях температуры окружающего воздуха, которая представлена на рис. 8.

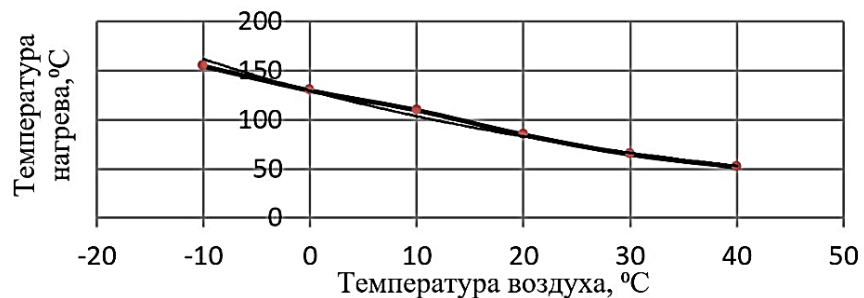


Рис. 8. Зависимость нагрева основания от температуры окружающего воздуха

Численное значение температуры нагрева основания перед укладкой холодной асфальтобетонной смеси с учетом температуры окружающего воздуха определяется по формуле

$$t_{\text{нагр}} = 129,6 e^{-0,022 t_{\text{возд}}}, \quad (15)$$

где  $t_{\text{возд}}$  – температура воздуха при укладке, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

При реконструкции автомобильной дороги и капитальном ремонте дорожных покрытий нежесткого типа широкое применение получили инфракрасные асфальторазогреватели, обеспечивающие температуру нагрева слоя

покрытия. В зависимости от области применения используют асфальтозагреватели с разными техническими характеристиками, выбор которых зависит от времени и интенсивности прогрева, температуры окончания нагрева и мощности асфальтозагревателя. Продолжительность нагрева слоя зависит от мощности теплового потока, технологических режимов работы и геометрических параметров асфальтозагревателя. Продолжительность нагрева слоя асфальтобетона определяется из выражения [11, 12]:

$$\tau = \frac{F_0 h^2}{\alpha}, \quad (16)$$

где  $h$  – толщина слоя, м;  $F_0$  – критерий гомохронности Фурье, м;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{ч}$ , который определяется по формуле

$$\alpha = \lambda / c\gamma, \quad (17)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град})$ ;  $\gamma$  – удельный вес,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ .

Продолжительность разогрева слоя асфальтобетона до температуры нагрева  $110^\circ\text{C}$  можно определить на основе данных, представленных в работах [13–16]. Представив данные в относительных значениях, можно установить зависимость времени нагрева от толщины слоя и начальной температуры поверхности, которая имеет вид

$$\tau_{\text{наг}} = 0,66h^2 e^{-0,015t_{\text{см}}}, \quad (18)$$

где  $h$  – толщина нагреваемого слоя асфальтобетона, см;  $t_{\text{см}}$  – температура асфальтобетона до нагрева,  $^\circ\text{C}$ . Коэффициент корреляции равен 0,99.

С учетом теплофизических свойств асфальтобетонной смеси скорость перемещения разогревателя с учетом начальной температуры и толщины слоя определяется по формуле

$$V = 0,298le^{0,578\gamma+0,0898(t/100)} / 0,19e^{0,023t_{\text{см}} - 0,007\Theta + 5,6766\Theta}, \quad (19)$$

где  $l$  – длина блока разогревателя, % щебня в смеси;  $\Theta$  – безразмерная температура асфальтобетона на глубине  $h$  при постоянном тепловом потоке, значение которой на глубине слоя асфальтобетона определяется из зависимости

$$\Theta = 0,43e^{1,64 F_h}. \quad (20)$$

Коэффициент корреляции уравнения равен 0,96.

Мощность излучения на поверхности покрытия с учетом постоянного теплового потока определяется из выражения

$$S = \frac{(t_n - t_0)\sqrt{\pi\gamma\lambda c}}{2\sqrt{\tau}}. \quad (21)$$

Эффективность работы разогревателя зависит от интенсивности нагрева слоя асфальтобетона, которая определяется высотой расположения разогревателя над поверхностью полосы покрытия. При постоянном тепловом потоке, в соответствии с экспериментальными данными для горелок с керамическими насадками, высота  $R$  установки горелок над покрытием определяется по формуле

$$R = \sqrt{\frac{320}{S}}. \quad (22)$$

Для расчета режимов работы разогревателя разработано программное обеспечение с использованием программы Labview, позволяющее определять технологические параметры разогревателя с учетом конструктивных и погодных условий производства работ [17–20].

Значения скорости перемещения разогревателя от температуры воздуха при толщине слоя 0,02 и 0,03 м могут быть рассчитаны по уравнениям, представленным в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимость скорости перемещения разогревателя  
от температуры асфальтобетона**

Длина блока разогревателя, м	Глубина нагрева, м	Скорость перемещения, м/мин	Коэффициент корреляции
1,25	0,02	$V = 0,76e^{0,0151t_a}$	0,99
2,00	0,02	$V = 0,46e^{0,0151t_a}$	0,99
1,25	0,03	$V = 0,39e^{0,0153t_a}$	0,99
2,00	0,03	$V = 0,25e^{0,0149t_a}$	0,99

На основании уточненной методики по расчету параметров инфракрасного разогревателя в табл. 2 представлены результаты расчета технологических режимов при разогреве слоя асфальтобетона толщиной 0,03 м от –10 до +110 °С при разной температуре асфальтобетона.

Таблица 2

**Технологические режимы разогревателя при нагреве слоя  
асфальтобетона толщиной 0,03 м и длине блока разогревателя 2,0 м**

Температура воздуха, °С	Время нагрева, мин	Высота расположения горелки относительно поверхности, м	Мощность излучения, кВт/м <sup>2</sup>	Скорость перемещения разогревателя, м/мин
–10	6,9	0,17	8,1	0,29
0	5,9	0,20	7,4	0,34
10	5,1	0,20	7,1	0,39
20	4,4	0,20	6,9	0,45
30	3,8	0,20	6,5	0,53

**Заключение**

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– устройство дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей на основе битумных материалов (СГ 130/200; БНД 200/300 и МГ 70-130) даже при положительных температурах окружающего воздуха до +30 °С не обеспечивает требуемого качества покрытия;

- для повышения качества устройства дорожных покрытий с применением холодных асфальтобетонных смесей необходимо осуществлять нагрев основания перед укладкой слоя;
- температура нагрева основания зависит от толщины слоя укладки холодной смеси в дорожное покрытие;
- установлена зависимость температуры нагрева основания от температуры воздуха.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калгин Ю.И., Строкин А.С., Тюков Е.Б. Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов. Воронеж, 2014. 223 с.
2. Руденский А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ // Новости в дорожном деле : науч.-техн. информ. сб. Москва : Информавтодор, 2006. Вып. 1. С. 11–42.
3. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. 272 с.
4. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Антонов А.И., Однолько В.Г. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2017. 315 с.
5. Ладыгин Б.И. Прочность и долговечность асфальтобетона // Наука и техника. Минск, 1972. 81 с.
6. Ларионов Н.Н. Общая теплотехника. Москва : Стройиздат, 1975. 559 с.
7. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. Изд. второе. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.
8. Зубков А.Ф. Расчет нагрева толщины слоя асфальтобетона по времени. Свидетельство № 2006613129 о регистрации программы для ЭВМ : опубл. 5.09.2006 г.
9. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Макаров А.М., Антонов А.И., Бехзоди Б. Моделирование и расчет температурных режимов дорожных одежд нежесткого типа в нестационарных условиях. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020660065 от 27.08.2020 г.
10. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. 2005. № 10. С. 8–9.
11. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Ленинград : Энергия, 1968. 304 с.
12. Zubkov A.F., Ledenev V.I., Kupriyanov R.V. A study of temperature modes and strength characteristics of stone-mastic asphalt // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. № 1 (21). P. 54–64.
13. Villiers R.L. Maintenance engineering standards to fulfil the legal duty of road authorities towards saferoads // Dissertation presented for the Degree of Doctor of Philosophy (Stellenbosch University). 2016, March. 246 p. URL: <https://scholar.sun.ac.za>
14. Wang P., Hu Y., Dai Y., Tian M. Asphalt Pavement Pothole Detection and Segmentation Based on Wavelet Energy Field // Journal Mathematical Problems in Engineering. 2017. 13 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/1604130>
15. Hot Mix Asphalt Repair // Sitemap Pavement Resources Inc. URL: <http://pavement-resources.com/hot-mix-asphalt-repair>.
16. Цупиков С.Г. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог. Москва : Инфра-Инженерия, 2009. 924 с.
17. Yevseev Ye.Yu., Matveev V.N., Zubkov A.F., Ledenev V.I. Modeling of contact stresses in vibration plates and hot asphalt mix for road surfacing repairs // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2013. № 3 (19). С. 52–62.

18. Kupriyanov R.V., Luzgachev V.A., Zubkov A.F. Determining the temperature of the asphalt mix during the construction of asphalt concrete non-rigid pavement // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2016. № 1 (29). P. 63–74.
19. Kuprianow R., Andrianow K., Zubkow A., Plewa A. Analiza zmian temperatury ukladanych warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w strefie spoiny podluznej // *Budownictwa i Inzynierii Srodowiska*. 2015. № 3. P. 113–117.
20. Зубков А.Ф., Куприянов Р.В. Программа по расчету параметров инфракрасных разогревателей для асфальтобетонного покрытия. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015616928, 25.06.2015 г.

## REFERENCES

1. Kalgin Yu.I., Strokin A.S., Tyukov E.B. Perspektivnye tekhnologii stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii s primeneniem modifitsirovannykh bitumov [Promising technologies for construction and repair of road pavements using modified bitumen]. Voronezh, 2014. 223 p. (rus)
2. Rudenskii A.V. Kholodnyi asfal'tobeton. Vozmozhnosti prodleniya sezona stroitel'nykh i remontnykh rabot [Cold bitumen concrete. Possibilities for extending the construction and repair period]. Moscow: Informavtodor, 2006. No. 1. Pp. 11–42. (rus)
3. Kalgin Yu.I. Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modifitsirovannykh bitumov [Bituminous mineral road materials based on modified bitumen]. Voronezh, 2006. 272 p. (rus)
4. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Antonov A.I., Odnol'ko V.G. Tekhnologiya stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii nezhestkogo tipa s uchetom temperaturnykh rezhimov asfal'tobetonnykh smesei [Construction and repair of nonrigid pavements and temperature behaviour of asphalt mixes]. Tambov, 2017. 315 p. (rus)
5. Ladygin B.I. (Ed.) Prochnost' i dolgovechnost' asfal'tobetona [Strength and durability of bitumen concrete]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1972. 81 p. (rus)
6. Larikov N.N. Obshchaya teplotekhnika [General heat engineering]. Moscow: Stroiizdat, 1975. 559 p. (rus)
7. Gezentsvei L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Dorozhnyi asfal'tobeton [Road bitumen concrete]. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (rus)
8. Zubkov A.F. Raschet nagreva tolshchiny sloya asfal'tobetona po vremeni [Time calculation of heating bitumen concrete layer thickness]. RF Certificate of State Registration of Software N 2006613129, 2006. (rus)
9. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M., Antonov A.I., Bekhzodi B. Modelirovanie i raschet temperaturnykh rezhimov dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa v nestatsionarnykh usloviyakh [Temperature modelling and calculation nonrigid pavements under nonstationary conditions]. RF Certificate of State Registration of Software N 2020660065, 2020. (rus)
10. Permyakov V.B. Effektivnost' uplotneniya asfal'tobetonnykh smesei v dorozhnykh pokrytiyakh [Efficiency of compaction of bitumen concrete mixes for road pavements]. *Stroitel'nye materialy*. 2005. No. 10. Pp. 8–9. (rus)
11. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel [Heat calculation of solids]. Leningrad: Energiya, 1968. 304 p. (rus)
12. Zubkov A.F., Ledenev V.I., Kupriyanov R.V. A study of temperature modes and strength characteristics of stone-mastic asphalt. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014. No. 1 (21). Pp. 54–64. (rus)
13. Villiers R.L. Maintenance engineering standards to fulfil the legal duty of road authorities towards saferoads. Dissertation presented for the Degree of Doctor of Philosophy (Stellenbosch University). 2016. 246 p. Available: <https://scholar.sun.ac.za>
14. Wang P., Hu Y., Dai Y., Tian M. Asphalt pavement pothole detection and segmentation based on wavelet energy field. *Journal Mathematical Problems in Engineering*. 2017. 13 p. DOI: 10.1155/2017/1604130
15. Hot mix asphalt repair. Sitemap Pavement Resources Inc. Available: <http://pavement-resources.com/hot-mix-asphalt-repair>

16. *Tsupikov S.G. (Ed.) Spravochnik dorozhnogo mastera. Stroitel'stvo, ekspluatatsiya i remont avtomobil'nykh dorog* [Road Master's Handbook. Construction, maintenance and repair of roads]. Moscow: Infra-Inzheneniya, 2009. 924 p. (rus)
17. *Yevseev Ye.Yu., Matveev V.N., Zubkov A.F., Ledenev V.I.* Modeling of contact stresses in vibration plates and hot asphalt mix for road surfacing repairs. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013. No. 3 (19). Pp. 52–62.
18. *Kupriyanov R.V., Luzgachev V.A., Zubkov A.F.* Determining the temperature of the asphalt mix during the construction of asphalt concrete non-rigid pavement. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2016. No. 1 (29). Pp. 63–74.
19. *Kuprianow R., Andrianow K., Zubkow A., Plewa A.* Analiza zmian temperatury ukladanych warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w strefie spoiny podluznej. *Budownictwa i Inzynierii Srodowiska*. 2015. No. 3. Pp. 113–117.
20. *Zubkov A.F., Kupriyanov R.V.* Programma po raschetu parametrov infrakrasnykh razogrevatelei dlya asfal'tobetonnoho pokrytiya [Parameter calculation program for infrared pavement heaters for bitumen concrete pavements]. RF Certificate of State Registration of Software N 2015616928, 2015. (rus)

#### Сведения об авторах

*Бехзоди Бахтиёр*, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

*Андрюанов Константин Анатольевич*, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, [konst-68@yandex.ru](mailto:konst-68@yandex.ru)

*Зубков Анатолий Федорович*, докт. техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@yandex.ru)

#### Authors Details

*Bakhtiyor Behzodi*, Research Assistant, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

*Konstantin A. Andrianov*, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, [konst-68@yandex.ru](mailto:konst-68@yandex.ru)

*Anatoly F. Zubkov*, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@yandex.ru)