



## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕГРЕГАЦИИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Иван Иосифович Леонович<sup>1</sup>, Александр Семенович Ковальчук<sup>2</sup>,  
Владимир Анатольевич Пумпур<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65. 220013 Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет, пр. Независимости, 150. 220013 Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Институт технологии металлов НАН Беларуси,  
Бялиницкая-Бирули, 11. 212030 Могилев, Беларусь

Получено 13-09-2005; принято 05-12-2005

**Резюме.** Описана математическая модель и программный комплекс для исследования температурной сегрегации в асфальтобетонной смеси, которая транспортируется в кузове автомобиля с завода на участок дороги. Дано описание интерфейса программного обеспечения. Описаны предварительные результаты и возможности программного комплекса.

**Ключевые слова:** асфальтобетонная смесь, температурная сегрегация, тепловые потери.

## PROGRAM COMPLEX FOR RESEARCH TEMPERATURE SEGREGATION IN ASPHALT CONCRETE MIXES

Ivan I. Leonovich<sup>1</sup>, Alexander S. Kovalchuk<sup>2</sup>,  
Vladimir A. Pumpur<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarus National Technical University, ave. Nezavisimosti, 65. 220013 Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belorussian-Russian University, ave. Nezavisimosti, 150. 220013 Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Institute of Technology of Metals of National Academy of Science of Belarus,  
Bialynitskaga-Biruli, 11. 212030 Mogilev, Belarus

Received 13 September 2005; accepted 5 December 2005

**Abstract.** The problem of temperature segregation which is the reason of the damage of asphalt concrete coverings of highways is described in the article. The description of a mathematical model of the process of heat exchange during transportation is given. The interface of software is described. Preliminary results of the numerical decision of the problem of heat exchange are described.

**Keywords:** asphalt concrete, temperature segregation, heat exchange.

Ровность и одинаковая плотность дорожного покрытия являются двумя основными свойствами, которые в наибольшей степени способствуют его долговечности [1]. Для высококачественной укладки асфальтобетонного покрытия необходимо, чтобы температура укладываемой смеси во всем объеме была примерно одинаковой. В противном случае в результате температурной сегрегации плотность смеси будет значительно различаться. После укладки такого покрытия появляется множество неоднородных по свойствам участков. Участки, уложенные переохлажденной смесью, уплотняются хуже. В итоге в таких местах образуются различные дефекты [2, 3]. Поэтому особенно важно температурную сегрегацию в асфальтобетонной смеси свести к минимуму для того, чтобы перед укладкой разница температур смеси была незначительной. Одним из путей решения данной проблемы является минимизация температурной сегрегации на этапе транспортировки асфальтобетонной смеси от завода к участку дороги, а также выбор машин для производства дорожных работ [4, 5].

Тепловые потери при транспортировке асфальтобетона и разница температур в смеси зависят от множества факторов, таких как: температура смеси при погрузке в самосвал; температура окружающего воздуха; наличие изоляции кузова самосвала; размер кузова по отношению к количеству перевозимой смеси; дальность перевозки; скорость перевозки; время ожидания до укладки; задержки в пути [6, 7].

Задачу по исследованию и минимизации температурной сегрегации предлагается решать на основе математического моделирования с использованием современных средств неразрушающего контроля и обработки информации.

С этой целью разработана трехмерная математическая модель теплообмена при транспортировке асфальтобетонной смеси, учитывающая тепловые потери по всем направлениям (рис. 1):

$$\rho(T_i)c(T_i)\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T_i)\frac{\partial T_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T_i)\frac{\partial T_i}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T_i)\frac{\partial T_i}{\partial z}\right), i = 1, 2, \quad (1)$$

где индекс 1 применяется в отношении асфальтобетонной смеси в кузове автомобиля; 2 – то же в отношении бортов и платформы кузова;  $\rho_i(T_i)$ ,  $c_i(T_i)$ ,  $\lambda_i(T_i)$  – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность асфальтобетонной смеси и материала кузова соответственно;  $T_i$  – температурные поля;  $\tau$  – время;  $x, y, z$  – координаты точек температурных полей.

Начальные условия принимались в виде:

$$T_1|_{\tau=0} = T_{01}, \quad T_2|_{\tau=0} = T_{02}, \quad (2)$$

где  $T_{01}, T_{02}$  – начальная температура асфальтобетонной смеси и кузова после погрузки соответственно.

Очевидно, что тепловые потери со стороны боковых бортов кузова будут примерно одинаковыми. С незначительной погрешностью можно допустить, что интенсивность теплообмена и тепловые потери со стороны переднего и заднего бортов различаются мало. В таком случае можно решать задачу лишь для одной четверти кузова автомобиля (рис. 1). Температурные поля определяли для четырех расчетных областей: 1 – асфальтобетонной смеси, 2 – платформы кузова, 3 – переднего борта кузова, 4 – бокового борта.

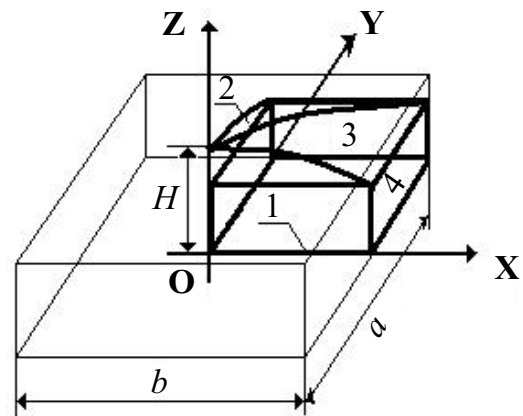


Рис. 1. Схема расчетных областей

1 – платформа кузова; 2 – асфальтобетонная смесь; 3 – передний борт кузова; 4 – боковой борт;  $a$  – длина платформы;  $b$  – ширина платформы;  $H$  – максимальная высота асфальтобетонной смеси

Fig 1. The scheme of estimated areas

С учетом принятых допущений граничные условия имеют следующий вид:

1) условия симметрии тепловых потоков в центре:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (3)$$

2) на поверхности контакта асфальтобетонной смеси и элементов кузова:

– с боковым бортом:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=b/2} = \alpha_K (T_1 - T_4) \Big|_{x=b/2}, \quad (4)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=b/2} = \alpha_K (T_1 - T_4) \Big|_{x=b/2};$$

– с передним бортом:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=a/2} &= \alpha_K (T_1 - T_3) \Big|_{y=a/2}, \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=a/2} &= \alpha_K (T_1 - T_3) \Big|_{y=a/2}; \end{aligned} \quad (5)$$

– с платформой кузова:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=h} &= \alpha_K (T_1 - T_2) \Big|_{z=h}, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=h} &= \alpha_K (T_1 - T_2) \Big|_{z=h}; \end{aligned} \quad (6)$$

3) на внешней поверхности контакта элементов кузова с внешней средой – потоками воздуха:

– на поверхности бокового борта:

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=b/2+\delta} = \alpha_{4,k} (T_4 - T_b) \Big|_{x=b/2+\delta}; \quad (7)$$

– на поверхности переднего борта:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=a/2+\delta} = \alpha_{3,k} (T_3 - T_b) \Big|_{y=a/2+\delta}; \quad (8)$$

– на внешней поверхности платформы:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{2,k} (T_2 - T_b) \Big|_{z=0}; \quad (9)$$

4) на наружной поверхности асфальтобетонной смеси, контактирующей с внешней средой:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=h+H(x,y,z)} = \alpha_{1,k} (T_1 - T_b) \Big|_{z=h+H(x,y,z)}, \quad (10)$$

здесь  $a, b$  – длина и ширина полезного объема кузова;  $\delta$  – толщина стенки борта;  $h$  – толщина платформы;  $H(x,y,z)$  – высота асфальтобетонной смеси на платформе кузова;  $\alpha_K$  – коэффициент контактного теплообмена на поверхностях контакта смеси и элементов кузова;  $\alpha_{1,k}, \alpha_{2,k}, \alpha_{3,k}, \alpha_{4,k}$  – коэффициенты конвективного теплообмена на внешних поверхностях асфальтобетонной смеси, платформы, переднего и бокового бортов соответственно;  $T_b$  – температура внешней среды.

Задача (1)–(10) решалась методом конечных разностей по трем направлениям. Определялись температурные поля для каждой расчетной области. Теплофизические свойства асфальтобетона принимались линейно зависящими от температуры на основе данных, представленных в работах Н. В. Быстрова [8, 9]. Шаг по времени принимали равным 6 с, по координате – 10 мм. Это позволило получать результаты с незначительной погрешностью при приемлемом времени расчета.

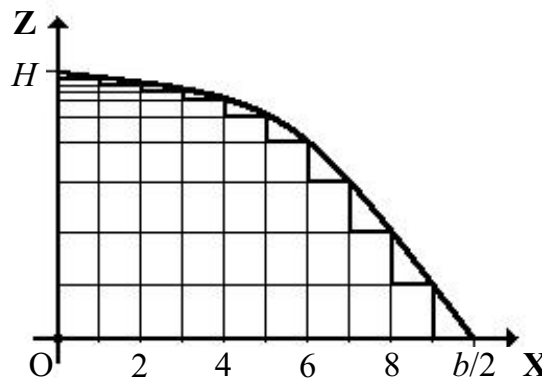


Рис. 2. Аппроксимация криволинейной поверхности в сечении XOZ

Fig 2. Approximation of a curvilinear surface in section XOZ

Для участков с нелинейными очертаниями поверхности асфальтобетонной смеси осуществлялась ее аппроксимация кусочно-непрерывной линейной функцией вдоль осей OX и OY. На рис. 2 представлена аппроксимация криволинейной поверхности смеси для сечения XOZ. При этом определялась высота смеси  $H(x,y,z)$  в каждом граничном узле конечно-разностной сетки по оси OZ.

Для численной реализации математической модели (1)–(10) в операционной среде Windows с использованием системы визуального объектно-ориентированного программирования Borland C++ Builder 6 разработан программный комплекс, предоставляющий пользователю эффективные и удобные средства как для ввода исходных данных, так и для анализа и обработки результатов расчетов. В частности, предусмотрен вывод на экран монитора в цветном графическом режиме динамики охлаждения асфальтобетонной смеси в любом из ее сечений, что удобно для визуальной оценки температурной сегрегации (рис. 3). Кроме того, в виде

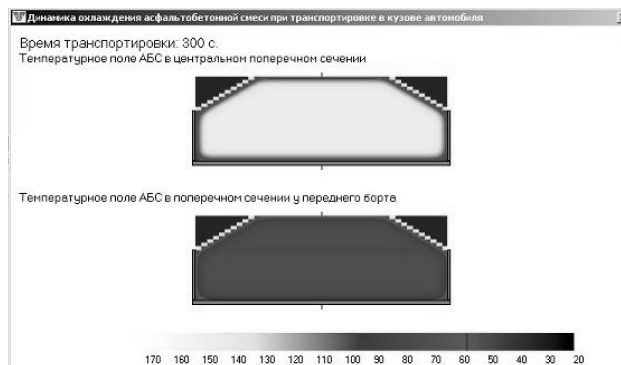


Рис. 3. Представление динамики охлаждения асфальтобетонной смеси в различных поперечных сечениях

Fig 3. Representation of dynamics of cooling asphalt concrete mixes in various cross sections

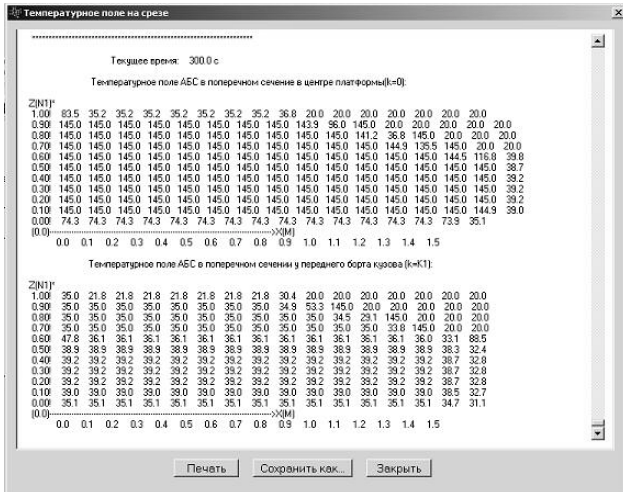


Рис. 4. Представление температурных полей

Fig 4. Representation of temperature fields

таблицы представлены температурные поля для каждой из расчетных областей (рис. 4).

Проведены предварительные расчеты по грубой оценке температурной сегрегации в различных сечениях асфальтобетонной смеси, спустя 20 минут транспортировки. Полученные результаты коррелируют с результатами ASSHTO [10]. Очевидны значительные различия температур в объеме смеси.

Разработанный программный комплекс после адаптации к реальным условиям погрузки и транспортировки позволит решить следующие задачи:

- оценить степень влияния различных технологических, теплофизических и климатических факторов на динамику температурных полей в объеме смеси;
- определить характерные и критические зоны температурной сегрегации в объеме асфальтобетонной смеси после транспортировки;
- построить зависимости, отражающие влияние основных технологических, теплофизических и климатических факторов на динамику температурных полей в характерных и критических зонах асфальтобетонной смеси;
- определить оптимальные условия погрузки, подготовки к перевозке и транспортировки асфальтобетонной смеси для минимизации температурной сегрегации;
- построить необходимые графические зависимости и номограммы, подготовить рекомендации, изложить требования к подготовке и условиям транспортировки для обеспечения минимальной температурной сегрегации асфальтобетонной смеси.

## Выводы

1. Магистральные автомобильные дороги как Беларуси, так и других стран Европы в основном имеют асфальтобетонные покрытия. Их качество зависит не только от состава асфальтобетонных смесей, но и от температуры их укладки.

2. Теория и практика свидетельствуют о том, что температура асфальтобетонной смеси не всегда одинакова, что приводит к варьированию плотности при использовании даже одинаковых средств и технологии уплотнения. Температурная неоднородность асфальтобетонной смеси принимается как температурная сегрегация.

3. Температурная сегрегация асфальтобетонной смеси обусловлена воздействием на смесь погодноклиматических факторов (осадков, ветра, температуры воздуха, солнечной радиации и др.) и различной теплопроводностью контактирующих сред в системе: асфальтобетонная смесь – кузов транспортного средства – защитные устройства.

4. Для снижения уровня температурной сегрегации и улучшения температурной однородности асфальтобетонной смеси необходимы меры по управлению процессом перевозки смеси и модернизации транспортных средств с целью термоизоляции.

5. Предложенная трехмерная математическая модель теплообмена позволяет решать ряд задач теплофизического, технологического и транспортно-организационного характера по оптимизации использования асфальтобетонных смесей в дорожном строительстве, повышения качества выполнения работ при устройстве асфальтобетонных покрытий.

6. Для практического применения указанной модели необходимо использовать фактические данные, которые структурно входят в приведенные в статье аналитические зависимости.

## Литература

1. Highways Belarus: The encyclopedia (Автомобильные дороги Беларуси: Энциклопедия). Ed. A. V. Minin. Minsk: BelEN, 2002. 672 p. (in Russian).
2. Grushko, I. M.; Korolev, I. V.; Borshch, I. M.; Mishchenko, G. M. Road building materials (Дорожно-строительные материалы). Moscow: Transport, 1983. 383 p. (in Russian).
3. Krasikov, O. A. Monitoring and strategy of repair of highways (Мониторинг и стратегия ремонта автомобильных дорог). Almaty: KazgosINTI, 2004. 263 p. (in Russian).
4. Leonovich, I. I.; Kotlobaj, A. J. A machine for construction, repair and the maintenance of highways (Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог). Minsk: BNTU, 2005. 552 p. (in Russian).
5. Leonovich, I. I. The maintenance and the repair of motor roads.

- Part 1: General questions of the maintenance and repair (Содержание и ремонт автомобильных дорог. Ч. 1. Общие вопросы содержания и ремонта). Minsk: BNTU, 2003. 270 p.; Part 2: Technology and the organization of the road work (Ч. 2. Технология и организация дорожных работ). Minsk: BNTU, 2003. 470 p. (in Russian).
6. Voznesensky, V. A.; Dolzhinkov, Yu. P.; Lamin, V. G. Uniformity as the criterion of evaluation of the quality of concrete (survey) (Однородность как критерий оценки качества бетона (обзор). IEINTI. Kishinev, 1967. 239 p. (in Russian).
  7. STB 1115-98 Asphalt-concrete mixtures for roads, airports. Asphalt concrete. Testing methods (СТБ 1115-98 Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытания) (in Russian).
  8. Bystrov, N. V. The determination of the thermal conductivity of roadbuilding materials under the field conditions. *The motor roads* (Автомобильные дороги), No 4, 1988, p. 21–23 (in Russian).
  9. Bystrov, N. V.; Finashin, V. N. The thermophysical properties of nonrigid pavements with the highly porous bases. *Building and the architecture* (Строительство и архитектура), No 2, 1982, p. 110–112 (in Russian).
  10. The technical bulletin of the American National Association of Asphalt Roads (Astek) T-134 (Технический бюллетень Американской национальной ассоциации асфальтовых дорог (Астек) Т-134). The edition of the American association of workers of road and transport branch (ASSHTO), 2001 (in Russian).

## PROGRAMINIS KOMPLEKSAS TEMPERATŪROS SEGREGACIJAI ASFALTBETONIO MIŠINYJE TIRTI

I. I. Leonovič, A. S. Kovalčiuk, V. A. Pumpur

### S a n t r a u k a

Straipsnyje aprašomas asfaltbetonio mišinio temperatūros segregacijos tyrimo matematinis modelis ir programinis kompleksas, kai jis automobilio kėbule pervežamas iš gamyklos į naudojimo vietą. Pateiktas darbo su programine įranga aprašymas. Apibūdintos programos galimybės ir pateikti preliminarūs skaičiavimo rezultatai.

**Raktažodžiai:** asfaltbetonio mišinys, temperatūros segregacija, šilumos nuostoliai.

**Ivan Iosifovich LEONOVICH.** Prof. Dr. Tech. Sc., head of department of construction and maintenance of roads of the Belarus National Technical University. Honourable doctor of Vilnius Gediminas Technical University. The honourable professor of the Moscow Motor-road Institute (the State Technical University), the Academician of the Russian academy of natural sciences, the Vice-president of the International Academy of Organizational and Administrative Sciences.

Carries out researches on problems of construction and operation of highways, road materiology and engineering ecology. Is the author of: textbooks and manuals on road machines, road construction materials, diagnostics and quality management of highways, construction, maintenances and repair of roads, roadground mechanics, some monographies, manuals and encyclopedias on a road problematics. Scientific school of Prof I. I. Leonovich is widely known not only in Belarus, but also between scientific professionals of many countries.

**Alexander Semenovich KOVALCHUK.** The senior lecturer of Belorussian-Russian University, post-graduate student of BNTU. Carries out researches on problems of technology and the organization of construction of highways with asphalt concrete covering. Author of publications on regional features for a choice of road designs and efficiency of their maintenance.

**Vladimir Anatolevich PUMPUR.** Cand. Tech. Sci., the senior lecturer, the employee of the Mogilyov branch of a National Academy of Sciences. The expert in the field of a geodesy and road construction. Is interested in problems of the mathematical analysis.