

УДК 625.85:519.6

Иван Иосифович ЛЕОНИВИЧ,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
"Строительство и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

Александр Семенович КОВАЛЬЧУК,  
старший преподаватель кафедры  
"Автомобильные дороги"  
Белорусско-Российского университета,  
аспирант Белорусского национального  
технического университета

Владимир Анатольевич ПУМПУР,  
кандидат технических наук, доцент,  
заместитель директора  
Института металлов  
Национальной академии наук Беларуси

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕГРЕГАЦИИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

SOFTWARE DEVELOPMENT  
FOR SIMULATION  
OF TEMPERATURE  
SEGREGATION IN  
ASPHALT-CONCRETE MIX

В статье 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 перспективные возможности разработки программного комплекса.

The paper describes a mathematical model and software package for temperature segregation analysis in the asphalt-concrete mix transported in the lorry body from the factory to the road site. The software interface has been described. The prospective results and software possibilities are presented.

### ВВЕДЕНИЕ

Основными свойствами, которые в наибольшей степени способствуют долговечности дорожного покрытия, являются его ровность и одинаковая плотность [1]. Для высококачественной укладки асфальтобетонного покрытия необходимо, чтобы температура укладываемой смеси по ее объему была примерно одинакова. В противном случае, в результате температурной сегрегации плотность смеси будет значительно отличаться. После укладки такого покрытия появляется множество неоднородных по свойствам участков. Участки, уложенные перохлажденной смесью, уплотняются хуже. В итоге в таких местах образуются различные дефекты [2, 3]. Поэтому особенно важно свести к минимуму температурную сегрегацию в асфальтобетонной смеси с тем, чтобы перед укладкой разница температур по всему объему смеси была незначительна. Один из путей решения данной проблемы — минимизация температурной сегрегации на этапе транспортировки асфальтобетонной смеси от завода к участку дороги [4, 5].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕГРЕГАЦИИ

Тепловые потери при транспортировке асфальтобетонной смеси и разница температур зависит 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 перед укладкой; задержки в пути [6, 7].

Поэтому предлагается задачу по исследованию и минимизации температурной сегрегации решать на осно-

ве 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 во всех направлениях (рисунк 1).

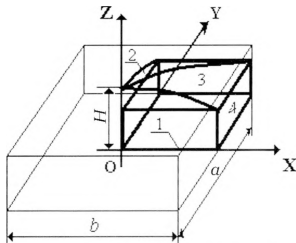


Рисунок 1. Схема расчетных областей  
1 - платформа кузова, 2 - асфальтобетонная смесь,  
3 - передний борт кузова, 4 - боковой борт,  
a - длина платформы, b - ширина платформы,  
H - максимальная высота асфальтобетонной смеси

$$\rho(T_i) \left( \lambda(T_i) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T_i) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T_i) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T_i) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) = 12 \quad (1)$$

где  $i = 1$  относится к асфальтобетонной смеси в кузове автомобиля;  $i = 2$  — к бортам и платформе кузова;  $\rho(T_i)$ ,  $\alpha(T_i)$ ,  $\lambda(T_i)$  — плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность асфальтобетонной смеси и материала кузова соответственно;  $T_i$  — температурные поля;  $t$  — время;  $x, y, z$  — координаты точек температурных полей.  
Начальные условия принимались в виде:

$$T_i|_{t=0} = T_{01}, \quad T_i|_{t=0} = T_{02}, \quad (2)$$

где  $T_{01}, T_{02}$  — начальная температура асфальтобетонной смеси и кузова после погрузки смеси в кузов 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 отличаются мало. Тогда можно решать задачу лишь для одной четверти кузова автомобиля (см. рисунок 1). Поэтому температурные поля определяли для 4 расчетных областей: 1 — асфальтобетонная смесь, 2 — платформа кузова, 3 — передний борт автомобиля, 4 — боковой борт. С учетом принятых допущений граничные условия имеют следующий вид:

1) условия симметрии тепловых потоков в центре:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (3)$$

2) на поверхности контакта асфальтобетонной смеси: - с боковым бортом:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=b/2} = \alpha_{1k} (T_1 - T_3) \Big|_{x=b/2}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=b/2} = \alpha_{2k} (T_2 - T_3) \Big|_{y=b/2}; \quad (4)$$

- с передним бортом:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{1k} (T_1 - T_3) \Big|_{y=0}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{2k} (T_2 - T_3) \Big|_{y=0}; \quad (5)$$

- с платформой кузова:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{1k} (T_1 - T_2) \Big|_{z=0}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{2k} (T_2 - T_1) \Big|_{z=0}; \quad (6)$$

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

- на поверхности бокового борта:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=b/2} = \alpha_{1k} (T_1 - T_3) \Big|_{x=b/2}; \quad (7)$$

- на поверхности переднего борта:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{2k} (T_2 - T_3) \Big|_{y=0}; \quad (8)$$

- на внешней поверхности платформы:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{2k} (T_2 - T_3) \Big|_{z=0}; \quad (9)$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha_{1k} (T_1 - T_3) \Big|_{z=h}; \quad (10)$$

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;  $\alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}, \alpha_{4k}$  — коэффициенты контактного теплообмена на поверхностях контакта смеси и элементов кузова;  $\alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}, \alpha_{4k}$  — коэффициенты конвективного теплообмена на внешних поверхностях платформы, асфальтобетонной смеси, переднего и бокового бортов соответственно;  $T_3$  — температура внешней среды.

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

Для участков с нелинейными очертаниями поверхности асфальтобетонной смеси осуществлялась ее аппроксимация кусочно-непрерывной линейной функцией вдоль осей OX и OY. На рисунке 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.

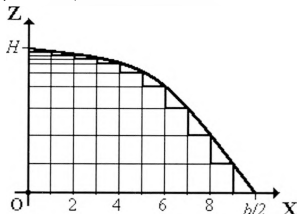
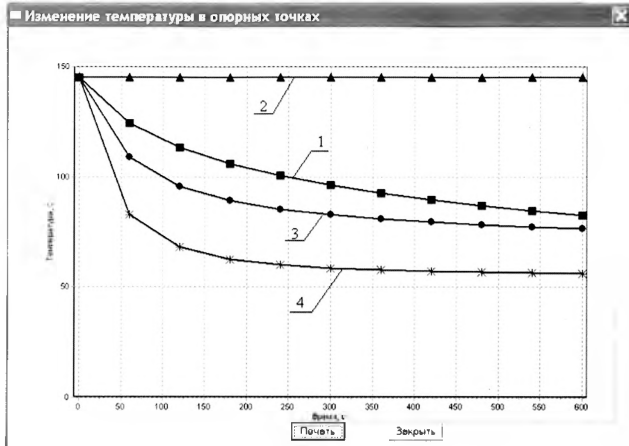


Рисунок 2 Аппроксимация криволинейной поверхности смеси в сечении XOZ

Для численной реализации математической модели (1) - (10) в операционной среде Windows с использованием системы визуального объектно-ориентированного программирования Borland C++ Builder в разработанном программном обеспечении, представляющем 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.

На рисунке 3 представлен пример вывода динамики охлаждения в двух поперечных сечениях асфальтобетонной смеси (АВС) в центральном сечении и в сечении, расположенном непосредственно у переднего борта, в момент времени, равный 600 с от начала транспортировки. Как видно из рисунка температурное поле 1 на поверхности АВС, в углу у переднего борта и дна кузова, а также в углу между передним и боковым бортами является наименьшим и лежит в пределах 35 °С—65 °С. Температурное поле 4 у переднего борта по ширине кузова лежит в пределах от 60 °С до 65 °С и значительно отличается от температурного поля 2





**Рисунок 5** Вывод динамики температур в опорных точках:  
1 - температура в точке 1; 2 - в точке 2; 3 - в точке 3; 4 - в точке 4

ния температур в опорных точках во времени. Температурное поле представляет собой матрицу, в которой по строкам и столбцам расположены температуры вдоль соответствующих координатных осей. На рисунке 4, в частности, представлены температурные поля для ранее указанных сечений (см. рисунок 3).

В программе предусмотрена возможность вывода динамики температур в опорных точках в виде графиков, что удобно для визуального анализа. На рисунке 5 представлена динамика температур в четырех точках, указанных на рисунке 3: в центре кузова у дна (точка 1), на уровне верха бортов (точка 2), на поверхности АБС (точка 3), а также на стыке переднего борта и днища кузова на его оси симметрии (точка 4).

Проведены предварительные расчеты по грубой оценке температурной сегрегации в различных сечениях асфальтобетонной смеси, образовавшейся через 10, 15 и 20 минут транспортировки. Полученные результаты во многом совпадают с результатами, описанными в [10]. Очевидно наличие значительных температурных дифференциалов в объеме смеси.

Разработанное программное обеспечение 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 темпе-

ратурной 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.

В результате решения указанных задач будет сведена к минимуму температурная сегрегация смеси, а значит и ее влияние на качество асфальтобетонного покрытия.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Асфальтобетонные покрытия занимают центральное место на магистральных дорогах как в Беларуси, так и в других странах Европы. Качество покрытий зависит не только от состава асфальтобетонных смесей, но и от их температуры при укладке.

2 Теория и практика свидетельствуют, что температура асфальтобетонной смеси не всегда отличается однородностью, а это приводит к варьированию плотности при ис-

пользовании даже одинаковых средств и технологий уплотнения. Неоднородность температуры асфальтобетонной смеси принимается как температурная сегрегация.

3 Температурная сегрегация асфальтобетонной смеси обусловлена воздействием на нее погоднo-климатических факторов (осадки, ветер, температура воздуха, солнечная радиация и др.) и различной теплопроводностью контактирующих сред в системе: асфальтобетонная смесь — кузов транспортного средства — защитные устройства.

4 Для снижения уровня температурной сегрегации и повышения однородности температуры асфальтобетонной смеси необходимы меры по управлению процессом перевозки и

модернизации транспортных средств с целью термоизоляции смесей.

5 Предложенная трехмерная математическая модель теплообмена позволяет решать ряд задач теплофизического, технологического и транспортно-организационного характера по оптимизации использования асфальтобетонных смесей в дорожном строительстве, повышению 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. Автомобильные дороги Беларуси: энциклопедия / Под ред. А.В. Мина. — Мн.: БелЭН, 2002. — 672 с.
2. Дорожно-строительные материалы / И.М.Грушко, И.В.Королев, И.М.Борщ, Г.М. Мищенко. М.: Транспорт, 1983. — 383 с.
3. Крашков О.А. Мониторинг и стратегия ремонта автомобильных дорог. — Алматы: КазгосИНТИ, 2004. — 263 с.
4. Леонович И.И., Котлобай А.Я. Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог. — Мн.: БНТУ, 2005. — 552 с.
5. Леонович И.И. Содержание и ремонт автомобильных дорог. В 2-х ч. Ч. 1. Общие вопросы содержания и ремонта дорог. - Мн.: БНТУ, 2003. — 270 с. Ч. 2. Технология и организация дорожных работ. - Мн.: БНТУ, 2003. — 470 с.
6. Вознесенский В.А., Должников Ю.П., Ламин В.Г. Однородность как критерий оценки качества бетона (обзор) ИЗИТИ. Кишинев, 1967. — 239 с.
7. СТБ 1115-98 Смесей асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытания.
8. Быстров Н.В. Определение теплопроводности дорожно-строительных материалов в полевых условиях // Автомобильные дороги. 1988, № 4. — С. 21-23.
9. Быстров Н.В., Финашин В.Н. Теплофизические свойства жестких дорожных одежд с высокопористыми основаниями // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1982, № 2. — С. 110-112.
10. Технический бюллетень Американской национальной ассоциации асфальтовых дорог (Астек) Т-134. Издание Американской ассоциации работников дорожной и транспортной отрасли (ASSHTO), 2001.