

ТЕОРИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЯХ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Сайлаубекова Н.С., кандидат технических наук, nauka_kou@mail.ru

Қызылординский открытый университет, г. Кызылорда, Республика Казахстан

Аннотация. В настоящей работе на основе теплотехнических законов и уравнений разработана математическая модель для определения изменения температурного поля в слоях дорожной одежды асфальтобетонного покрытия. Полученная формула позволяет произвести расчет температуры дорожного покрытия на различной глубине, тем самым определить в каких температурных режимах работает или будет работать асфальтобетонное покрытие автомобильных дорог.

Ключевые слова: дорожное покрытие, температурное поле, теплопроводность, закон Фурье, теплопередача, температурапроводность.

Аңдатпа. Мақалада жылу беру заңдары мен жылутехникалық теңдеулер негізінде асфальтбетон жол жамылғысының конструкциялық қабаттарындағы температуралық өрістің өзгеруін анықтауға арналған математикалық модель әзірленген. Ұсынылған математикалық тәуелділік материалдардың жылутехникалық сипаттамалары мен жылулық әсер ету жағдайларына байланысты жол жамылғысының әртүрлі тереңдіктегі температурасын анықтауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер автомобиль жолдарының асфальтбетон жамылғысының конструкциялық қабаттарындағы температуралық жұмыс режимін бағалауға және әртүрлі температуралық әсерлер жағдайындағы пайдалану ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: жол жамылғысы, асфальтбетон, температуралық өріс, жылуөткізгіштік, Фурье заңы, жылу беру, температураөткізгіштік.

Главным источником тепла, передаваемого в конструктивные слои дорожной одежды является солнечная радиация. Тепло, поступающее от солнечной радиации Q , не полностью поглощается асфальтобетонным покрытием, часть ее отражается от поверхности (рисунок 1). Количество отраженного тепла Q_2 зависит от коэффициента отражения. Для асфальтобетона коэффициент отражения $R=0,1$, соответственно коэффициент поглощения $A=0,9$, тогда количество поглощаемого тепла

$$Q_1 = 0,9 \cdot Q. \quad (1)$$

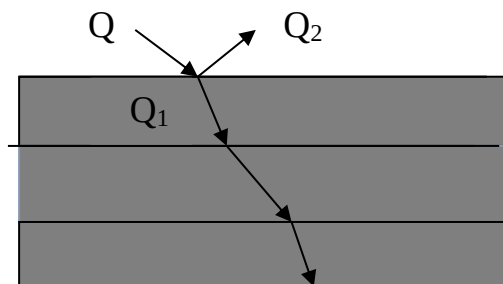


Рисунок 1– Схема распределения тепла, поступающего от солнечной радиации, в слоях дорожной одежды

Передача теплоты в конструктивных слоях дорожной одежды происходит теплопроводностью и связана с теплопроводностью материалов дорожной одежды и наличием разности температур между слоями [1]. Согласно закону Фурье, количество теплоты d^2Q_τ , проходящее через конструктивные слои дорожной одежды по

изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$, пропорционально температурному градиенту $\frac{\partial t}{\partial n}$:

$$d^2Q_\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau \quad (2)$$

Плотность теплового потока q , прошедшее в единицу времени τ по изотермной поверхности покрытия F через конструктивные слои n можно записывать таким образом:

$$q = \frac{d^2Q_\tau}{dF d\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \text{grad} t \quad (3)$$

тогда количество тепла имеет вид:

$$Q = \int_F q dF = - \int_F \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF \quad (4)$$

и из формулы (2) коэффициент теплопроводности определяется как:

$$\lambda = - \frac{d^2Q_\tau}{\frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau} \quad (5)$$

Передача теплоты в конструктивные слои дорожной одежды происходит от нагретого воздуха над поверхностью покрытия за счет солнечной радиации. А значит, этот процесс надо рассматривать как передачу теплоты от подвижной среды (воздух) через твердую поверхность (асфальтобетонное покрытие), которая называется теплопередачей [2].

В инженерных расчетах чаще всего рассматривается теплопередача от одной подвижной среды к другой через разделяющую их твердую многослойную поверхность. При этом задаются температуры сред $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$, и их коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 . Так как дорожная одежда состоит из конструктивных слоев, то ее можно рассматривать как многослойную поверхность, состоящую из n слоев. Коэффициент теплопроводности каждого слоя дорожной одежды – $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ и их толщина – $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$.

Согласно закону Фурье, общее количество тепла, передаваемое через конструктивные слои дорожной одежды в процессе теплопередачи через единицу поверхности F за время τ , определяется [3]

$$Q_\tau = k(t_{ж1} - t_{ж2})F\tau \quad (6)$$

Плотность теплового потока в процессе теплопередачи определяется уравнением

$$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (7)$$

отсюда

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8)$$

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (9)$$

где k – коэффициент теплопередачи, который выражает количество тепла, проходящее через единицу площади поверхности покрытия за единицу времени при разности температур между слоями дорожной одежды, также между горячей и холодной средой в 1 °С; R – термическое сопротивление, обратная коэффициенту теплопередачи.

Чем меньше сопротивление R , тем интенсивнее процесс теплопередачи, и наоборот, чем больше сопротивление, тем менее интенсивен процесс теплопередачи [4]. Так как интересующий нас процесс, это процесс теплопередачи от одной подвижной среды (нагретый воздух) через твердую поверхность (асфальтобетонное покрытие) в теле этой

поверхности, то значит, вторая подвижная среда отсутствует. Тогда формулы (6-9) будут иметь вид:

$$Q_{\tau} = k(t_{\varepsilon} - t_{c(i+1)})F\tau, \quad (10)$$

$$q = k(t_{\varepsilon} - t_{c(i+1)}), \quad (11)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (13)$$

Как было сказано выше, нагрев дорожного покрытия происходит от солнечной радиации, а значит, температура покрытия с течением времени изменяется, причем носит периодичный характер. Рассмотрим периодический тепловой процесс покрытия дорожной одежды [5-7].

Пусть температура поверхности T_n дорожного покрытия ($z=0$) изменяется по гармоническому закону

$$\vartheta_n = T_n - \bar{T} = \vartheta_0 \cos(\omega\tau), \quad (14)$$

где $\bar{T}$ - среднее значение температуры поверхности;

ϑ_0 - амплитуда колебаний;

ω - циклическая частота колебания температуры, в нашем случае это частота вращения Земли $\omega = 2\pi/24 \cdot 3600$, рад/с.

Если подобные колебания продолжаются достаточно долго, то влияние начального распределения температуры на ход процесса исчезает и в слоях устанавливается квазистационарное состояние, при котором температура в каждой точке совершает гармонические колебания около неизменного значения $\bar{T}$. Распределение температуры в этом случае имеет вид

$$\theta = \vartheta / \vartheta_0 = \cos(\omega\tau - z\sqrt{\omega/2a}) \exp(-z\sqrt{\omega/2a}), \quad (15)$$

где $\vartheta = T(z, \tau) - \bar{T}$;

$T(z, \tau)$ - температура на глубине z от поверхности тела в момент времени τ ;

a - температуропроводность материала тела.

Наряду с амплитудой изменяется и фаза колебаний температуры. В точках с координатой z в момент, когда температура принимает свое среднее значение $\bar{T}$, наступает позднее, чем на поверхности, на $\Delta\tau = z/\sqrt{2a\omega}$.

Скорость распространения тепловой волны u рассчитывается как

$$u = z / \Delta\tau = \sqrt{2a\omega}.$$

Плотность теплового потока $q_{z=0}$ на поверхности дорожного покрытия

$$q_{z=0} = \lambda \vartheta_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (16)$$

Колебания температуры поверхности (14) отстают по фазе на $\pi/4$ от колебания плотности теплового потока (16).

Амплитуда колебаний $\mathcal{G}_0 \exp(-z\sqrt{\omega/2a})$ быстро уменьшается с ростом z и на расстоянии, равном одной длине волны $\ell = 2\pi\sqrt{2\frac{a}{\omega}}$, составляет менее 0,2% $\mathcal{G}_0$. Поэтому формулу (15) можно с достаточной точностью использовать для определения температуры в конструктивных слоях дорожной одежды.

Список литературы:

1. Алексиков, С. В., Лескин, А. И., Гофман, Д. И., Лескина, Л. М., Крутилов, В. В. Температура асфальтобетонных покрытий в условиях жаркого климата Нижнего Поволжья // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – Вып. 4(101). – С.71-80.
2. Хрусталева, Б. М., Лю, Тингоу, Сизов, В. Д., Ли Чжунъюй, Бусел, А. В. Оценка реальных условий эксплуатации и фактических температурных изменений при моделировании состава конструктивных слоев асфальтобетона // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 6. – С. 481-491.
3. Алшахван, А., Калгин, Ю. И. Актуальность применения теплых асфальтобетонных смесей для дорожного строительства в условиях Сирийской Арабской Республики // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2020. – Т. 5, № 2. – С. 26-33.
4. Есболат, А. Г., Сунанда, Ж. Д., Бектурганова, Н. Е. Оптимизация свойств асфальтобетона с помощью моделирования // Вестник Казахской головной архитектурно-строительной академии. – 2025. – № 3.
5. Sun, Y., Du, C., Gong, H., Li, Y., Chen, J. Effect of temperature field on damage initiation in asphalt pavement: A microstructure-based multiscale finite element method // Mechanics of Materials. – 2020. – Vol. 144. – Article 103367.
6. Qian, G., He, Z., Yu, H., Gong, X. et al. Research on the affecting factors and characteristic of asphalt mixture temperature field during compaction // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 257. – Article 119509.
7. Fan, S., Zhu, H., Dong, H., Zhang, S. Thermal field investigation and temperature prediction of asphalt pavements across a relatively broad range of air temperatures // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2026. – Vol. 176. – Article 111332.