

времени будет иметь большее значение, чем средняя температура бетонной смеси.

Графически этот процесс представлен на рис. 3. Средняя температура смеси здесь принята равной 50°C , вяжущее охлаждается от 90 до 50°C (кривая 1), а заполнитель подогревается от 15 до 50°C и также он охлаждается от 90 до 50°C , а вяжущее при этом греется от 15°C до 50°C (кривая 2).

В первом случае (кривая 1) средняя температура вяжущего в течение 3 мин равна $+60^{\circ}\text{C}$, а во втором (кривая 2) — $+40^{\circ}\text{C}$, т.е. подвижная часть бетонной смеси в случае применения горячих заполнителей имеет более низкую температуру, что благоприятно сказывается на подвижности бетона и начале сроков схватывания.

Изложенное экспериментально подтверждено сотрудниками кафедры Строительной теплофизики БПИ совместно с лабораторией ДСК–1.

Таким образом, представляется наиболее рациональным получение "горячего" бетона за счет подогрева крупных заполнителей.

УДК 536.2

А.Д. Зарецкая, *мл. научн. сотр.*
(БПИ)

МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРЕВЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СУШИЛЬНОМ БАРАБАНЕ

В современных сушильных барабанах, применяемых при производстве асфальтобетонных смесей, около 70% тепла передается сыпучему материалу в радиационной зоне, занимающей около трети длины барабана. Для предохранения корпуса и насадки радиационной зоны от деформации и прогорания, а также для обеспечения интенсивной передачи тепла факела сыпучему материалу лопастную насадку в этой зоне выполняют особой конструкции [1,2 и др.], которая способствует минимальному пересыпанию частиц по сечению барабана. При этом основной нагрев засыпки происходит за время контакта частиц с поверхностью лопатки, в свою очередь нагреваемой факелом.

В настоящее время теоретически и экспериментально доказано, что сыпучий материал при контактном нагреве имеет граничный слой, теплофизические характеристики которого оказывают решающее влияние на теплообмен в начальной стадии процесса [3,4]. На модели элементарной ячейки граничного слоя сыпучего материала, находящегося на лопатке, рассмотрим механизм передачи тепла в радиационной зоне барабана (рис. 1). Плотность теплового потока излучения факела $q_{\text{ф}}$, зависящая от температуры и излучательной способности факела, за время контакта частиц с лопаткой изменяется незна-

чительно. Поэтому при расчете можно принять граничные условия с постоянным тепловым потоком. Благодаря симметрии задачи расчеты рационально производить на области ($0 \leq z \leq \delta$; $0 \leq r \leq R$) (рис. 1).

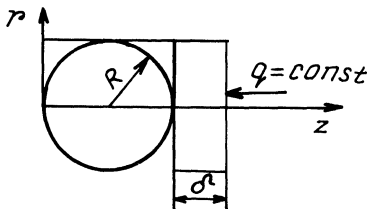


Рис. 1. Модель элементарной ячейки граничного слоя сыпучего материала при контактом нагреве последнего на лопатках барабана.

Математическая формулировка задачи в безразмерном виде в цилиндрической системе координат (z, r, φ) может быть записана следующим образом:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=2R+\delta} = q = \text{const}; \quad (2)$$

$$T \Big|_{r=0} = T_0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0,1} = 0; \quad (4)$$

$$\lambda(z, r) = \begin{cases} \lambda_{\text{СТ}} & \text{при } z < \delta; \\ \lambda_{\text{М}} & \text{при } (z - \delta)^2 + r^2 < R^2; \\ \lambda_{\text{В}} & \text{при } R < (z - \delta)^2 + r^2; z > \delta, \end{cases} \quad (5)$$

где T — температура; τ — время; q — плотность теплового потока; $\lambda_{\text{СТ}}$, $\lambda_{\text{М}}$, $\lambda_{\text{В}}$ — коэффициент теплопроводности соответственно пластины, материала частицы, воздуха; $c\rho$ — объемная теплоемкость; z и r — координаты.

Выражение (1) представляет собой уравнение Лапласа для безразмерной температуры при условии, что T не зависит от φ .

Имеется два безразмерных параметра $K_{\text{М}} = \lambda_{\text{В}}/\lambda_{\text{СТ}}$; $K_{\text{Л}} = \lambda_{\text{М}}/\lambda_{\text{СТ}}$.

Задача (1)–(5) решалась численно с помощью метода сеток [5]. Формула (1) аппроксимировалась системой конечно-разностных алгебраических уравнений. Основная особенность решаемой задачи в том, что коэффициент λ имеет разрыв первого рода по линиям $(z - \delta)^2 + r^2 = 1$ и $z = \delta$. Компоненты же теплового потока $(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \text{и } \lambda \frac{\partial T}{\partial r})$ непрерывны. Этот факт налагает существенные ограничения на выбор сетки и конечно-разностной схемы. Сетка выбиралась таким образом, чтобы точки пересечения координатных линий с

линиями разрыва были узлами. Это условие не позволяет в данном случае использовать сетку с равномерным шагом. Схема при этом должна быть консервативна. Расчетная область покрывалась неравномерной сеткой (рис. 2). При построении схемы использовался интегро-интерполяционный метод, основанный на аппроксимации законов сохранения, записанных для элементарного объема сеточной области. Элементарным объемом в нашем случае служит

$$\left\{ z_{i-1/2} \leq z_i \leq z_{i+1/2}; r_{j-1/2} \leq r_j \leq r_{j+1/2}; 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\}. \quad (6)$$

Проинтегрируем уравнение (1) по этому объему, учитывая независимость от φ .

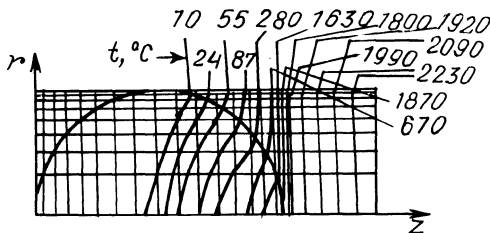


Рис. 2. Один из возможных вариантов изотерм, полученных при решении модельной задачи.

Заменяя производные их разностными аналогами, получим консервативную разностную схему в виде

$$\begin{aligned} A_{ij} \frac{U_{ij}^{n+1/2} - U_{ij}^n}{\tau} = & \lambda \frac{1}{(+)} \frac{U_{i+1,j}^{n+1/2} - U_{ij}^n}{h_{i+1}} - \lambda \frac{1}{(-)} \frac{U_{ij}^{n+1/2} - U_{i-1,j}^{n+1/2}}{h_{i-1}} + \\ & + \lambda \frac{2}{(+)} \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{h_{j+1}} - \lambda \frac{2}{(-)} \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{h_{j-1}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda \frac{1}{(\pm)} &= \int_{j-1/2}^{j+1/2} \lambda(z_i(\pm)1/2, r) r dr; \\ \lambda \frac{2}{(\pm)} &= \int_{i-1/2}^{i+1/2} (\lambda r) (r_j(\pm)1/2, z) dz; \end{aligned} \quad (8)$$

$$A_{ij} = \frac{(r_j + 0,5 h_j)^2 - (r_j - 0,5 h_{j-1})^2}{\tau} 0,25 (h_i + h_{i-1});$$

U – значение температуры в узлах сетки; i, j – обозначения сетки соответственно по z и r ; h, τ – шаг по координатам и времени.

Для решения применялся метод продольно-поперечной прогонки. Решение выражений (8), (9) сводится к решению системы уравнений с трехдиагональной матрицей методом прогонки. Ввиду наличия разрыва и неравномерности сетки схема (8) имеет первый порядок аппроксимации по h .

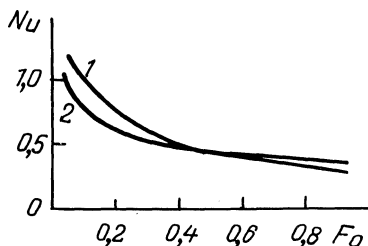
Аналогичная задача для начальной стадии нагрева частицы, находящейся в контакте с поверхностью при $\delta = 0$, решалась численно в работе [6]. При этом в качестве граничных условий было принято

$$T|_{z=0} = T_0. \quad (9)$$

Решалась система уравнений теплопроводности отдельно для твердой и жидкой фазы с последующим сопряжением вдоль линии разрыва. Используемая в настоящей работе консервативная разностная схема сквозного счета значительно упрощает расчет. Применение разрывного коэффициента теплопроводности и неравномерной сетки позволяет более точно учесть особенности в области контакта.

Численный расчет проводимости цилиндрической системы, составленной из сферы и газового зазора, был произведен в стационарных условиях в работе [7]. Используемая при этом неравномерная сетка была рационально выбрана и позволила получить большую точность расчета. Однако решение задачи [7] не могло лечь в основу расчета нестационарной задачи (1)–(5).

Рис. 3. Зависимость критерия Нуссельта от Фурье при контакте частицы с плоскостью: 1 – по результатам [6]; 2 – по результатам данной работы.



Для сопоставления с результатами работы [6] решалось уравнение (1) с граничными условиями (9). Было получено значение безразмерного теплового потока (аналог числа Нуссельта). При этом количество теплоты, отдаваемое поверхностью, рассчитывалось по формуле

$$Q = R \Delta T \lambda_M Nu. \quad (10)$$

Значения R , ΔT , λ_M были взяты согласно [6]. На рис. 3 показана зависимость $Nu=f(Fo)$, полученная в [6] и в настоящей работе.

В результате решения задачи (7), (8) установлены значения T в узлах сетки в различные моменты времени. Их можно представить в виде изотерм (рис. 2).

Разработанный метод решения модельной задачи позволяет оценить температурное поле и коэффициент теплообмена пластины, контактирующей с частицей засыпки. На основании этого, используя экспериментальные данные

по теплофизическим характеристикам сыпучих строительных материалов, можно оценить интенсивность контактного нагрева в рациональной зоне сушильного барабана, решить вопросы надежности и долговечности лопаток и определить оптимальный диаметр барабана.

Л и т е р а т у р а

1. Неусихин И.Я., Зарецкая А.Д. Рациональное заполнение сушильных барабанов смесителей и оптимальная система эвакуации дымовых газов. — В кн.: Всесоюз. производств.-техн. семинар "Повышение качества материалов, применяемых при строительстве и ремонте город. дорог": Тез. докл. М., 1979, с. 33–34. 2. Гарбер М.Р. Основные направления в современном зарубежном асфальтосмесителестроении: обзорная информация ЦНИИТЭстроймаш. — М., 1978. — 47 с. 3. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое/Под ред. А.П. Баскакова. — М., 1978. — 248 с. 4. Гарнашев и ч Г.С. Исследование процесса теплопроводности строительных сыпучих материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 1974. — 25 с. 5. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. — М., 1973. — 552 с. 6. Botterill I.S.M., Williams I.R. The mechanism of heat transfer to gas—fluidised beds. — Trans. Instn. Chem. Engrs., 1963, Vol. 41, p. 217–230. 7. Комбинированный численный метод определения проводимости составных тел/ Г.Н. Дульнев, М.А. Еремеев, Ю.П. Заричняк, Е.Н. Колтунова. — ИФЖ, 1977, т XXXII, № 2, с. 284–289.

УДК 536.2

И.Я. Неусихин, *канд.техн.наук*,
А.Д. Зарецкая, *мл.науч.сотр.*
(БПИ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целый ряд аппаратов работает по принципу кратковременного контакта зернистого слоя с поверхностью нагрева. При теплотехнических расчетах таких аппаратов, например барабанных сушилок заполнителей горячих бетонов, промышленных печей и др., необходимо знать коэффициенты переноса засыпок в нестационарном режиме. В связи с малым временем контакта частиц с поверхностью ($Fo_1 < 0,1 - 0,2$) толщина граничного слоя отличается от принятой в [1] для стационарных условий. Поэтому возникает необходимость экспериментально определить коэффициенты теплопереноса сыпучих строительных материалов при нестационарном режиме как для основного, так и граничного слоя, причем последний определяющий. Необходимость экспериментального исследования объясняется также тем, что имеющиеся в литературе данные по теплофизическим характеристикам крупнодисперсных материалов отличаются большим разбросом и в сильной степени зависят от метода их определения. Это было отмечено рядом авторов [1,2 и др.] и мо-