

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 536.24

И.В. Калинин, Г.В. Смольников, Р.Т. Емельянов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ С ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНВЕЙЕРНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ В ГАЛЕРЕЯХ

В статье рассматриваются вопросы теплоотдачи с поверхности нагретых материалов при конвейерной транспортировке. Определены факторы, влияющие на теплообмен нагретых материалов при конвейерной транспортировке, получены эмпирические зависимости для расчёта коэффициентов теплоотдачи, что позволяет рассчитать тепловыделение с поверхности данных материалов.

Ключевые слова: нагретые материалы, теплообмен, теплоотдача, коэффициент теплоотдачи, цилиндрическая полупластина, тепловой поток, температурный фактор, конвекция.

I.V. Kalinich, G.V. Smolnikov, R.T. Emelyanov

THE ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER FROM THE SURFACE OF THE HEATED MATERIALS IN THE CONVEYOR TRANSPORTATION IN GALLERIES

The issues of the heat transfer from the surface of the heated materials in the conveyor transportation are considered in the article. The factors influencing the heat exchange of the heated materials in the conveyor transportation are defined, the empirical dependences for the calculation of the heat transfer coefficients that allows to calculate the heat emission from the surface of these materials are received.

Key words: heated materials, heat exchange, heat emission, heat emission coefficient, cylindrical semi-plate, heat stream, temperature factor, convection.

Введение. При проектировании систем отопления и вентиляции конвейерных галерей нагретых материалов необходимы данные о коэффициентах теплоотдачи с поверхности транспортируемых материалов. Получить их можно только при проведении экспериментальных исследований.

Цель исследований. Проведение экспериментальных исследований теплоотдачи с поверхности нагретых материалов при конвейерной транспортировке.

Задачи исследований. Определение факторов, влияющих на теплообмен при конвейерной транспортировке; получение эмпирических зависимостей для расчёта коэффициентов теплоотдачи.

Методика и результаты исследований. Исследования теплообмена материалов при конвейерной транспортировке в галереях были проведены на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

Схема регулирования температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций галереи установки позволила произвести измерения конвективного и лучистого тепловых потоков, поступающих с поверхности материалов. Для того чтобы исключить поступление теплового потока от нижней поверхности исследуемой цилиндрической полупластины и каркаса конвейера, в установке

использовалась система охлаждения каркаса конвейера. Вода, подававшаяся от распределительного устройства в секции конвейеров, производила охлаждение. Расход воды регулировался с помощью пережимных устройств и устанавливался так, чтобы средняя температура воды, циркулирующей в секции конвейера, равнялась температуре воздуха под конвейером в среднем сечении секции.

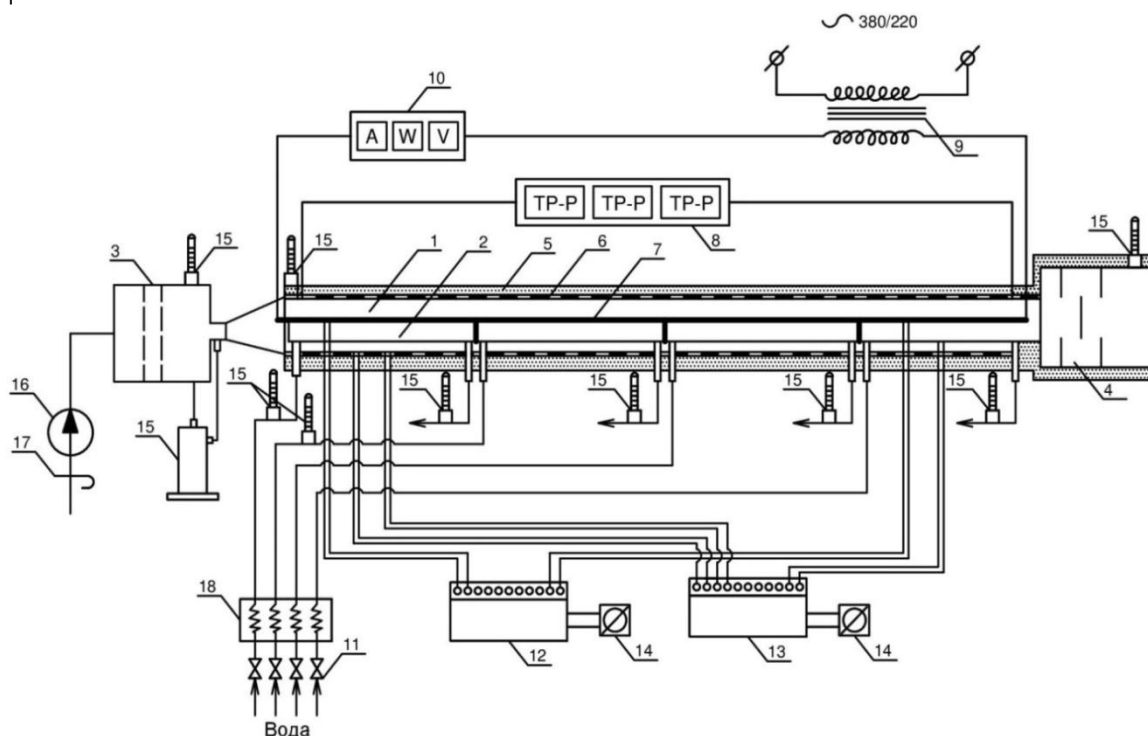


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования теплообмена:

- 1 – галерея; 2 – конвейер; 3 – камера давления с коллектором; 4 – камера смешения;
 5 – теплоизоляция из пенопласта; 6 – обогреваемые ограждающие конструкции; 7 – исследуемая пластина; 8 – трансформаторы АОМН 40-220-74-4И; 9 – силовой трансформатор РНО-220-40;
 10 – электроизмерительный комплект К-505; 11 – регуляторы расхода воды;
 12 – потенциометр КСП-4; 13 – потенциометр ЭПП-09; 14 – переключатель; 15 – термометр;
 16 – вентилятор; 17 – регулирующая заслонка; 18 – термостат ТС-24

Проведенные эксперименты позволили определить следующие величины:

- 1) расход воздуха, проходящего через галерею;
- 2) температуру воздуха на входе и выходе из галереи;
- 3) локальную температуру исследуемой поверхности цилиндрической пластины.

Расход воздуха был определен по перепаду давлений в камере статического давления и коллекторе по известной методике, которая изложена в работе [1]. Давление измерялось микроманометром МКВ-250-0,02 с классом точности 0,02 и пределом измерений 0–250 кг/м².

Температура воздуха на входе и выходе из галереи измерялась термометрами с ценой деления 0,1°С и пределом измерений 0–50°С. Локальные температуры поверхности цилиндрической пластины измерялись хромель-никелевыми термопарами, которые были установлены в семи сечениях пластины по три в каждом сечении. Данные термопары были изготовлены из проволоки диаметром 0,1 мм. В качестве регистрирующих приборов были использованы потенциометры КСП-4 с классом точности 0,25 и пределами измерений 0–100 и 0–600°С.

Для каждого из режимов были найдены следующие величины:

- 1) локальные числа Рейнольдса и Нуссельта в рассматриваемом сечении цилиндрической пластины;

$$Re = \frac{v_{ex} * x}{\nu_{ex}}; \quad (1)$$

$$Nu_x = \frac{\alpha_{kx} * x}{\lambda_{ex}}; \quad (2)$$

2) средние числа Рейнольдса, Нуссельта, Грасгофа для всей исследуемой цилиндрической пластины:

$$Re = \frac{v_{\theta} * l}{\nu_{\theta}}; \quad (3)$$

$$Nu_k = \frac{\alpha_k * l}{\lambda_{\theta}}; \quad (4)$$

$$Gr = \frac{gl^3(\bar{t}_c - \bar{t}_{\theta})}{\nu_{\theta}^2 * T_{\theta}}, \quad (5)$$

где v_{ex} – скорость, подсчитанная по средней температуре воздуха в рассматриваемом сечении галереи;

λ_{ex} – коэффициент теплопроводности, подсчитанный по средней температуре воздуха в рассматриваемом сечении галереи;

ν_{ex} – коэффициент кинематической вязкости, подсчитанный по средней температуре воздуха в рассматриваемом сечении галереи;

v_{θ} – скорость, определённая по среднеобъёмной температуре воздуха в галерее;

λ_{θ} – коэффициент теплопроводности, определённый по среднеобъёмной температуре воздуха в галерее;

ν_{θ} – коэффициент кинематической вязкости, определённый по среднеобъёмной температуре воздуха в галерее;

α_{kx} – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи;

α_k – средний коэффициент конвективной теплоотдачи;

x – расстояние до рассматриваемого сечения галереи;

l – длина цилиндрической пластины;

g – ускорение силы тяжести;

$\bar{t}_c$ – среднеинтегральная температура поверхности цилиндрической пластины (определялась интегрированием профиля локальных температур поверхности);

$\bar{t}_{\theta}$ – среднеобъёмная температура воздуха в галерее (определялась как среднеарифметическое значение температур воздуха на входе и выходе в галерею).

Локальные коэффициенты конвективной теплоотдачи определялись по формуле:

$$\alpha_{xk} = \frac{q_k}{t_c - t_{\theta}}, \quad (6)$$

где q_k – удельный конвективный тепловой поток;

t_c – локальная температура поверхности цилиндрической пластины;

t_{θ} – средняя по сечению галереи температура воздуха (определялась расчётом по измеренным значениям температуры на входе и выходе из галереи с учётом линейного закона распределения температуры воздуха по длине галереи).

Средние коэффициенты конвективной теплоотдачи цилиндрической пластины определялись по формуле:

$$\alpha_k = \frac{q_k}{t_c - t_{\theta}}. \quad (7)$$

Удельный тепловой поток определялся по методу энтальпии, который приведён в работе [2]:

$$q_k = \frac{c_{\theta} * G_{\theta} (t_{\theta}'' - t_{\theta}')}{F_c}, \quad (8)$$

где G_θ – масса воздуха, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха;
 c_θ – удельная теплоёмкость воздуха, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха;
 t'_θ, t''_θ – температура воздуха на входе и выходе из галереи;
 F_c – площадь поверхности цилиндрической пластины.

Для исследования локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи было проведено 117 опытов. По результатам опытов был выполнен расчёт средних коэффициентов конвективной теплоотдачи при следующих изменениях: числа Рейнольдса от $8,7 \cdot 10^5$ до $43 \cdot 10^5$; температурного фактора от 1,8 до 14,1; углы наклона галереи 0 и 30° .

Локальные коэффициенты в каждом из опытов были рассчитаны в семи сечениях пластины на следующих расстояниях от входа: 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,75; 1,25; 1,75 м. При этом в каждом сечении локальный коэффициент конвективной теплоотдачи был определён в трёх точках пластины, после чего было проведено его осреднение по сечению. Локальные и средние коэффициенты конвективной теплоотдачи были рассчитаны по формулам (6)–(7).

Обработка результатов экспериментов методом наименьших квадратов позволила получить эмпирическую зависимость для расчёта локальных коэффициентов конвективной теплоотдачи при транспортировке материалов в конвейерных галереях:

$$Nu_x = 0,014 Re_x^{0,89}. \quad (9)$$

Данная зависимость справедлива при $\bar{t}_c = 40\text{--}90^\circ\text{C}$ в диапазоне чисел $Re_x = (0,2 - 30) \cdot 10^5$. В уравнении (9) за определяющий размер принято значение текущей координаты x , отсчитываемое от начала пластины, за определяющую температуру – t_θ . Скорость воздуха была рассчитана по сечению галереи при температуре t_θ .

Исследование влияния угла наклона модели на конвективный теплообмен позволяет сделать вывод о том, что при увеличении угла наклона модели до 30° теплообмен уменьшается. Теплообмен уменьшается от 6 до 8 %, что находится в пределах точности экспериментальных исследований, поэтому в нашем случае можно пренебречь влиянием угла наклона модели на конвективный теплообмен.

Данные экспериментального исследования конвективного теплообмена выражаются зависимостью $Nu_x = f(Re)$ для средних коэффициентов теплоотдачи при разных величинах чисел Грасгофа. Критерий Грасгофа изменялся в пределах $Gr = (20,7\text{--}55,1) \cdot 10^5$. По результатам исследований выявлено, что естественная конвекция влияет на конвективный теплообмен незначительно. Это согласовано с данными, которые приведены в работе [3]. Экспериментальные данные, вычисленные для средних коэффициентов теплоотдачи, описывает зависимость

$$Nu_k = 0,26 Re^{0,67}, \quad (10)$$

которая рассчитана в следующих интервалах измерения: $Re = (9\text{--}35) \cdot 10^5$; $Gr = (20,7\text{--}55,1) \cdot 10^{10}$; $\bar{t}_c = 40\text{--}90^\circ\text{C}$; $\varphi = 0\text{--}30^\circ$. В зависимости (10) за определяющий размер принята длина цилиндрической пластины – l , за определяющую температуру – $\bar{t}_\theta$, скорость воздуха рассчитывалась по среднему сечению галереи.

Из приведённых зависимостей видно, что конвективный теплообмен уменьшается с увеличением температурного фактора. Уменьшение коэффициента конвективной теплоотдачи объясняется увеличением толщины пограничного слоя. Полученные данные согласованы с результатами исследований, приведенными в [3, 4].

Вследствие обработки результатов исследований конвективного теплообмена высокотемпературных материалов удалось получить эмпирическую зависимость для расчёта средних коэффициентов конвективной теплоотдачи:

$$Nu_k = 0,28Re^{0,67} * \Psi^{-0,11} . \quad (11)$$

Уравнение справедливо при температуре материала 100–500°C в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (8,5-43)*10^5$. Температурный фактор Ψ определяется отношением среднеинтегральной температуры поверхности цилиндрической пластины к среднеобъёмной температуре воздуха в галерее.

Температурный фактор влияет на общий коэффициент теплоотдачи незначительно. Обработка полученных результатов позволила получить зависимость для расчёта коэффициентов общей теплоотдачи при конвейерной транспортировке высокотемпературных материалов:

$$Nu_0 = 1,48Re^{0,5} . \quad (12)$$

Данная зависимость актуальна при температуре материала 100–500°C в диапазоне чисел $Re = (8,5-45)*10^5$.

Полученные данные экспериментов могут быть соотнесены с результатами работ [3, 6], в которых рассмотрен теплообмен пластины в свободном турбулентном потоке, а также при конвейерной транспортировке. Сравнив уравнение (11) с уравнением теплообмена пластины в свободном турбулентном потоке [3, 4]

$$Nu_0 = 0,032Re^{0,8}, \quad (13)$$

можно сделать вывод о том, что интенсивность теплообмена в нашем случае в 2–2,3 раза больше. Это вызвано тем, что течение воздуха осложняется наличием ограждающих конструкций, которые вызывают дополнительную турбулизацию потока. Теплоотдающая поверхность пластины в рассматриваемом случае находится в ядре потока, что ограничивает рост пограничного слоя и приводит к дополнительному проникновению пульсаций скорости в пограничный слой. Кроме того, наличие конвейеров ведёт к появлению циркуляционных потоков, также увеличивающих теплообмен.

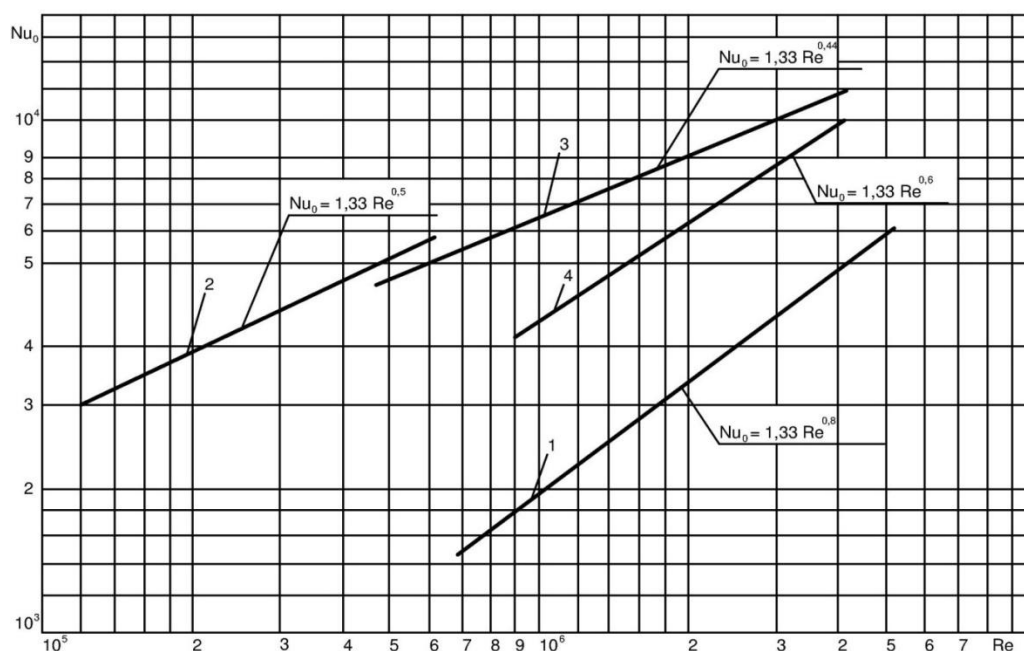


Рис. 2. Сравнение результатов исследования теплообмена: 1 – данные работ [3, 4]; 2 – данные работы [5]; 3 – данные работы [6]; 4 – данные настоящих исследований

Сравнив полученные данные с ранее выполненными исследованиями [5] в диапазоне $Re = (5-50) \cdot 10^4$

$$Nu_0 = 8,95 Re^{0,5}, \quad (14)$$

и результатами, показанными в работе [6] в диапазоне $Re = (5-40) \cdot 10^5$

$$Nu_0 = 17,9 Re^{0,44}, \quad (15)$$

можно сделать вывод о том, что теплообмен в нашем случае на 40–60 % менее интенсивен. Это можно объяснить тем, что в работах [5, 6] исследования теплообмена проводились на одинаковых по конструкции установках, в которых нагревательные элементы, имитирующие транспортируемый материал, были изготовлены из двух сложенных асбестоцементных пластин, между которыми была проложена проволока из нихрома. В результате теплоотдача в воздух галереи происходила с верхней и нижней поверхностями пластины, а при расчёте коэффициента теплоотдачи весь тепловой поток относился только к верхней поверхности пластины. Поэтому в результате исследований были получены завышенные коэффициенты теплоотдачи. Кроме того, воздух в модель галереи подавался плоской настиляющей струёй, из-за чего нарушалось моделирование на начальном участке.

Таким образом, полученные в наших исследованиях данные можно считать более полно отражающими процесс теплообмена материалов при конвейерной транспортировке в галереях.

Выводы

1. При конвейерной транспортировке материалов с температурой 40–90°C влияние угла наклона и естественной конвекции на конвективный теплообмен незначительно.
2. При конвейерной транспортировке материалов с температурой 100–500°C на конвективный теплообмен оказывает влияние температурный фактор. При увеличении температурного фактора коэффициент конвективной теплоотдачи уменьшается.
3. При конвейерной транспортировке материалов с температурой 100–500°C влияние температурного фактора на общий коэффициент теплоотдачи незначительно.
4. Полученные эмпирические зависимости (9), (10), (11), (12) позволяют определить локальные и средние коэффициенты общей и конвективной теплоотдачи при конвейерной транспортировке материалов с температурой 40–500°C и рассчитать тепловой поток, поступающий с поверхности этих материалов.

Литература

1. *Посохин В.Н.* Аэродинамика вентиляции. – М.: АВОК-пресс, 2008. – 208 с.
2. *Осипова В.А.* Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
3. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
4. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – 5-е изд. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
5. *Нейков О.Д., Логачёв И.Н., Шумилов Р.Н.* Аспирация паропылевых смесей при обеспыливающих технологического оборудования. – Киев: Наукова думка, 1974. – 128 с.
6. *Маринченко В.М.* Внешний тепло- и массообмен при конвейерной транспортировке зернистых материалов // Механика сыпучих материалов: тез. докл. III Всесоюз. конф. – Одесса, 1975. – С. 71–72.

