

УДК 621.782:662.998-494

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЯ ВОЛОКНИСТОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КОНВЕЙЕРЕ ПРИ БОКОВОЙ ПОДАЧЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

На основании литературных данных определены условия эффективной конструкции печи полимеризации минераловатных изделий. Показано, что боковая подача теплоносителя в рабочее пространство печи всегда сопровождается неравномерным распределением тепла по ширине минераловатного ковра. Обоснована конструкция внутренней части тепловой камеры в виде наклонной пластины. Средняя степень неравномерности температурного поля минераловатного слоя, оцененная по относительному изменению средней температуры по горизонтам и по всему сечению слоя после реконструкции тепловой камеры печи, снизилась от 122 до 5–7 %. При этом производительность всей технологической линии повысилась на 5–6 %, брак снизился на 3–4 %.

Ключевые слова: печь полимеризации, минераловатный ковер, тепловая камера, наклонная пластина, равномерность температурного поля.

Многостадийное производство волокнистых теплоизоляционных материалов, включающее высокотемпературное плавление минеральных компонентов с получением подвижного расплава и распыление его с помощью центрифуг, завершается механическим формованием минеральной ваты в виде плоского ковра заданной толщины; далее следуют введение в состав ковра жидкого связующего и последующая тепловая обработка в печах полимеризации [1]. От степени завершенности этих стадий во многом зависят технико-экономические показатели всего процесса производства волокнистых теплоизоляционных материалов.

Технологические ограничения параметров нагрева формованных изделий (температура, скорость нагрева, скорость фильтрации теплоносителя, состав газовой атмосферы) предполагают выбор печи для проведения этой стадии с использованием камерного режима [2]. В зависимости от требуемой производительности агрегата могут быть использованы тепловые аппараты камерного или проходного типа. В них при относительно низких температурах (до 200–300 °С) производятся сушка и упрочнение минераловат-

ного ковра, содержащего водный раствор органического связующего в количестве от 2–3 % (на легкой продукции) до 50–55 % (на тяжелой продукции). В состав агрегата обычно входят: узел подготовки исходных формованных изделий, тепловые камеры, камера охлаждения и узел подготовки готовых изделий.

Обязательным элементом технологической линии по производству формованных изделий является тепловая камера, в которой происходит тепловая обработка изделий последовательно на стадиях сушки, полимеризации (поликонденсации), низкотемпературного обжига и охлаждения. В тепловой камере проходят основные процессы удаления влаги из минераловатного ковра и отверждения связующего. Наиболее эффективно требуемые тепловые и температурные условия нагрева формованных изделий достигаются при перекрестной схеме движения материалов и теплоносителя [3]. При этом обеспечиваются условия гибкого управления тепловым режимом в отдельной тепловой камере за счет варьирования скоростей фильтрации газов, их температуры, распределения газовых потоков по объему.

Для обеспечения завершенности большинства физико-химических преобразований в каждом элементе слоя тепловой режим камер должен быть постоянным ($t_{\text{печи}} = \text{const}$), а количество проходящего через нее материала не должно существенно влиять на изменение температуры греющего газа [4]. Это достигается небольшой и постоянной подачей в камеру нагреваемого слоя, правильной организацией движения газа,



В. И. Матюхин

E-mail: matyhin53@mail.ru

в результате чего тепло постоянно поступает в каждый элемент слоя. В таких условиях средняя температура минераловатного ковра постепенно повышается до заданного значения, обеспечивая тем самым установление рациональных параметров его сушки и отверждения связующего. При этом величина удельного теплового потока остается постоянной. Благодаря большой разности температур между газами и материалом печи полимеризации способны поддерживать высокую производительность. В то же время для них характерна повышенная температура отходящих газов, что является причиной существенных теплопотерь, низкого теплового КПД и повышенного расхода тепла. Поэтому наиболее эффективными средствами улучшения технико-экономических показателей таких тепловых агрегатов являются выбор и поддержание рациональных рабочих температур в отдельных камерах при максимальном использовании тепла отходящих газов.

Для удобства наиболее часто подача и отвод теплоносителя в рабочей камере печи полимеризации осуществляются через боковую стенку, создавая перекрестную схему движения газов и материалов. Результаты экспериментальных исследований теплового состояния минераловатного ковра в этих условиях в многокамерной печи полимеризации типа СМТ 097 с подачей теплоносителя в первых трех камерах снизу вверх и с последующим реверсом газового потока сверху вниз показаны на рис. 1.

Анализ полученных данных показывает, что боковая подача теплоносителя в рабочее пространство всегда сопровождается неравномерным распределением тепла по ширине минераловатного ковра. Перепад температур по ширине изделий в рабочем пространстве печи полимеризации может достигать 50–70 град на каждый метр. Это обусловлено в первую очередь газодинамическими условиями движения газов.

Представим подающую газовую камеру агрегата в виде газораспределителя переменного сечения с подачей теплоносителя в слой через щель постоянной ширины (рис. 2) [5]. В нем поток горячих газов с расходом Q_n и скоростью W_n поступает во входное сечение размерами a_n и b . Длина газораспределителя равна L , ширина щели δ , а его закрытая часть ограничена наклонной поверхностью, образующей с другими поверхностями клин. Определим, какой должна быть конфигурация наклонной поверхности этого клина, т. е. профиль вертикального параметра $a = a_x$, чтобы обеспечить равномерную раздачу воздуха на условиях постоянного перепада статического давления в щели [6].

Для выбранных сечений x и $x + dx$ расходы воздуха составят Q_x и $Q_x + dQ_x$, а нормальная скорость истечения в сечении x будет равна W_x . Тогда по уравнению неразрывности из баланса расходов установим:

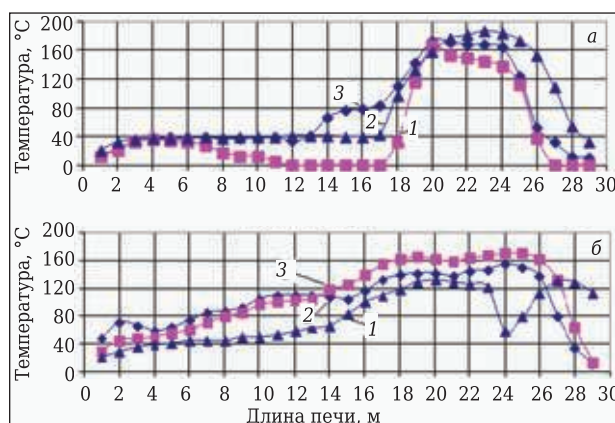


Рис. 1. Изменение температурного поля верха (а) и низа (б) минераловатного ковра: 1 — слева по ходу движения конвейера; 2 — по центру; 3 — справа по ходу движения конвейера

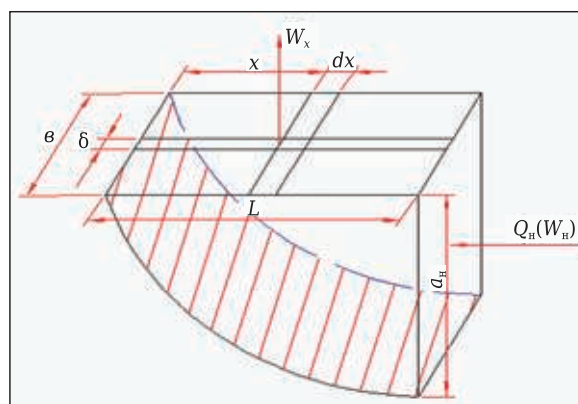


Рис. 2. Схема газораспределителя переменного сечения

$$dQ_x = W_x \delta dx, W = \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1)$$

где μ — кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; ΔP — перепад давления между сечениями, Па; ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Очевидно, что при $\Delta P = \text{const}$ и нормальной скорости газов через щель ($W = \text{const}$) можно записать

$$\int dQ = \int W \delta dx, Q_x = W \delta x. \quad (2)$$

Составим для выбранных сечений уравнение Бернулли:

$$\Delta P + \frac{\rho W_x^2}{2} + \frac{d(\rho W_x^2)}{2} = \Delta P + \frac{\rho W_x^2}{2} + \frac{\lambda}{d_s} \cdot \frac{\rho W_x^2}{2} dx, \quad (3)$$

где λ — коэффициент газодинамического сопротивления газораспределителя, доли ед.; d_s — эквивалентный размер щели газораспределителя, м.

После сокращения одинаковых членов уравнения, его дифференцирования и сокращения результата на W_x с подстановкой $d_s = \frac{4F}{\Pi}$ (F — поверхность поперечного сечения газораспределителя, м^2 ; Π — периметр поперечного сечения газораспределителя, м) получаем

$$W'_x = W_x \lambda (a_x + \epsilon) / 4 a_x \epsilon. \quad (4)$$

Так как $W_x = \frac{Q_x}{a_x \epsilon} = \frac{W \delta x}{a_x \epsilon}$, $W'_x = W' (a_x - a'_x) \cdot \epsilon \cdot a_x^2$ то из выражения (4) можно записать уравнение

$$a'_x - \chi a'_x = \lambda \chi (a_x + \epsilon) / 4 \epsilon. \quad (5)$$

Приводя уравнение (5) к нормальному виду, получим дифференциальное уравнение

$$a'_x + \left(\frac{\lambda}{4\epsilon} - \frac{1}{\chi} \right) a_x + \frac{\lambda}{4} = 0. \quad (6)$$

Его интегрирование дает выражение для расчета профиля наклонной поверхности газораспределителя в виде

$$a_x = \chi \cdot \exp\left(\frac{-\lambda \chi}{\epsilon}\right) \left[c - \left(\frac{\lambda}{4} \right) \int \exp\left(\frac{\lambda \chi}{4\epsilon}\right) \frac{d\chi}{\chi} \right], \quad (7)$$

где c — постоянная интегрирования, которую находим из граничных условий при $\chi = L$:

$$c = \frac{a_n}{\lambda} \cdot \exp\left(\frac{\lambda L}{4\epsilon}\right) + \frac{\lambda}{4} \int_0^L \exp\left(\frac{\lambda L}{4\epsilon}\right) \frac{d\chi}{\chi}. \quad (8)$$

После подстановки выражение (8) в выражение (7) получим уравнение для высоты канала:

$$a_x = \chi \cdot \exp\left(\frac{-\lambda \chi}{\epsilon}\right) \left[\frac{a_n}{\lambda} \cdot \exp\left(\frac{\lambda L}{4\epsilon}\right) + \frac{\lambda}{4} \int_0^L \exp\left(\frac{\lambda L}{4\epsilon}\right) \frac{d\chi}{\chi} \right]. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (9) в форму, удобную для вычисления:

$$a_x = A \cdot a_n + B \cdot \epsilon, \quad (10)$$

где $A = \bar{\chi} \cdot \exp\left[\frac{\lambda L}{4\epsilon} (1 - \bar{\chi})\right]$,

$$B = \frac{\lambda L}{4\epsilon} \bar{\chi} \cdot \exp\left[-\frac{\lambda L \bar{\chi}}{4\epsilon}\right] \int_{\bar{\chi}}^1 \exp\left(\frac{\lambda L}{4\epsilon} \frac{d\bar{\chi}}{\bar{\chi}}\right) \bar{\chi}, \quad \bar{\chi} = \frac{x}{L}, \quad 0 \leq \bar{\chi} \leq 1.$$

Тогда профиль газораспределителя при его заданных длине L и высоте a_n определится параметром $\frac{\lambda L}{4\epsilon}$. Для существующих печей полимеризации этот параметр изменяется в пределах 0,05–0,2, а профиль направляющей плиты представляет собой наклонную прямую плоскость. В этом случае конструкция входного и выходного патрубков тепловой камеры (рис. 3) должна претерпеть ряд изменений.

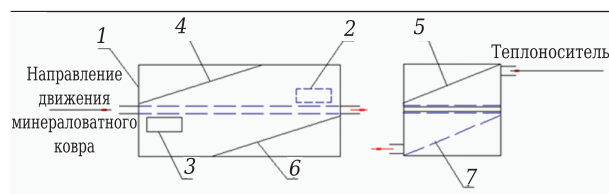


Рис. 3. Схема реконструкции внутренней части тепловой камеры: 1 — тепловая камера; 2 — входной патрубок; 3 — выходной патрубок; 4 — верхняя продольная пластина; 5 — верхняя поперечная пластина; 6 — нижняя продольная пластина; 7 — нижняя поперечная пластина

В верхней части тепловой камеры от ввода основного потока следует установить наклонную пластину 5, соединяющую верх рабочего пространства с ее нижней частью. Место установки пластины выбирается, исходя из удобства. Кроме того, в продольном сечении камеры в направлении движения ковра следует установить также наклонную пластину 4, соединяющую верхнюю внутреннюю поверхность камеры от ввода теплоносителя с нижней образующей противоположной стороны камеры. В нижней части камеры следует выполнить зеркальное изменение сечения рабочего пространства, установив наклонную пластину 7 от начала выходного патрубка к началу камеры по ее поперечному сечению, а также в продольном направлении от нижней внутренней поверхности камеры со стороны выходного патрубка к верхней образующей нижней части камеры на противоположной стороне.

Предлагаемые изменения конструкции газовых нижних и верхних частей тепловой камеры были выполнены на одной из технологических линий по производству плит ППЖ 200. Результаты исследований усредненных температурных кривых нагрева минераловатных изделий по горизонтам после реконструкции печи полимеризации показаны на рис. 4.

Сравнительный анализ полученных данных с результатами экспериментальных исследований (см. рис. 1) показал, что минимальный перепад температур по ширине минераловатного ковра после реконструкции нижней и верхней частей тепловой камеры составил в среднем 5–7 град/м. При этом максимальный перепад температур по ширине ковра до реконструкции достигал максимального значения 55–60 град/м на 11 м (2-я камера). После установки выравнивающих пластин в нижней и верхней частях

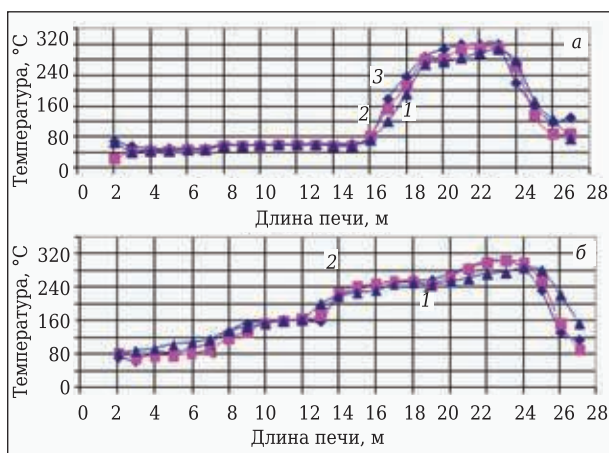


Рис. 4. Изменение температурного поля верха (а) и низа (б) минераловатного ковра после реконструкции тепловой камеры печи полимеризации: 1 — слева по ходу движения конвейера; 2 — по центру; 3 — справа по ходу движения конвейера

тепловой камеры этот показатель сократился до 1–2 град/м. Согласно полученным результатам, средняя степень неравномерности температурного поля минераловатного слоя, оцененная по относительному изменению средней температуры по всему сечению слоя, после реконструкции снизилась от 122 до 5–7 %.

Проведенные технические мероприятия по выравниванию тепловых условий нагрева минераловатного слоя позволили повысить производительность всей технологической линии на 5–6 % и снизить брак производимых теплоизоляционных изделий на 3–4 %.

Библиографический список

1. **Сперантов, Н. А.** Шлаковая вата / Н. А. Сперантов, А. В. Тыцкий ; под ред. К. Э. Горайнова. — М. : Металлургия, 1953. — 191 с.

2. **Китайцев, В. А.** Технология теплоизоляционных материалов : уч. для вузов / В. А. Китайцев ; 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1970. — 384 с.

3. **Матюхин, В. И.** Выбор и обоснование конструкции печи для тепловой обработки формованных волокнистых изделий / В. И. Матюхин, А. В. Матюхина, И. Д. Кащеев // Новые огнеупоры. — 2009. — № 3. — С. 48–55.

4. **Ярошенко, Ю. Г.** Теплофизические основы тепловой работы металлургических печей и агрегатов : уч. пособие / Ю. Г. Ярошенко, В. С. Швыдкий, Н. А. Спирин [и др.]. — Екатеринбург : АМК «День РА», 2019. — 464 с.

5. **Матюхин, В. И.** Обоснование изменений конструкции тепловой камеры печи полимеризации для тепловой обработки формованных волокнистых изделий / В. И. Матюхин, И. Д. Кащеев, А. В. Матюхина // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2011. — № 2. — С. 42–46. ■

Получено 17.04.21

© В. И. Матюхин, А. В. Матюхина, 2021 г.

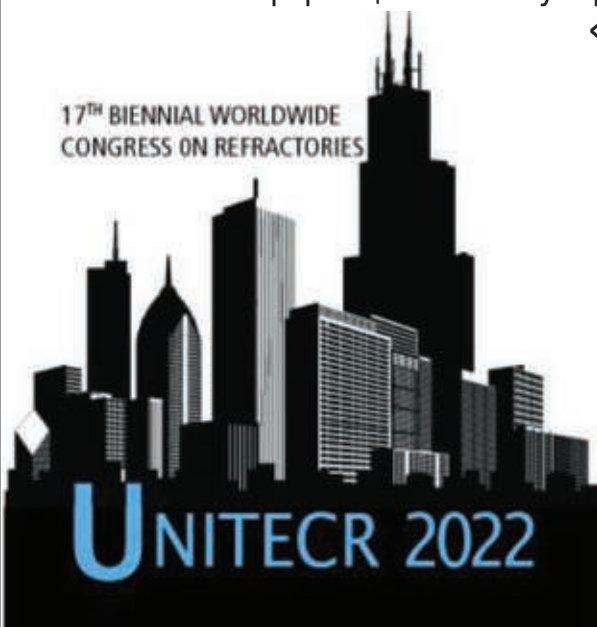
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

UNITECR 2022 — 17-й всемирный конгресс и объединенная международная техническая конференция по огнеупорам

«Огнеупоры как глобальная отрасль»

17TH BIENNIAL WORLDWIDE
CONGRESS ON REFRACTORIES

15–18 марта 2022 г.
Чикаго, США



Тезисы докладов принимаются по основным темам:

- Огнеупоры:
 - для черной металлургии
 - для стекольной промышленности
 - для цветной металлургии
 - для цементной промышленности
 - для нефтехимических процессов
 - для сжигания отходов
- Сырье
- Экологическая устойчивость и переработка
- Достижения в области производства, установок и оборудования
- Огнеупорные инженерные системы и дизайн
- Новые разработки
- Базовая наука
- Энергосбережение и изоляция
- Тестирование огнеупоров
- Образование
- Применение промышленных огнеупоров
- Кооперация среди клиентов, производителей и исследователей

ceramics.org