

вить проектирование, строительство, эксплуатацию сооружений, в короткое время выполнить требование ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» по проектированию схем водоснабжения и водоотведения городов и поселков, которое выполняется в настоящее время.

Литература

1. Gao Shun Qiu, Ling Feng Qiu, Jian Zhang, Yi Ming Chen. Research on Intensive Nutrients Removal of the Low C/N Sewage // Advanced Materials Research. 2012, no. 550 – 553, pp 2142 – 2145.
2. Lawrence K. Wang, Nazih K. Shammam. Single-Sludge Biological Systems for Nutrients Removal // Handbook of Environmental Engineering, 2009, no 9, pp. 209-270
3. Баженов В.И., Эпов А.Н., Носкова И.А. Математическое моделирование объекта очистки сточных вод // Экологический вестник России. 2011. №2. С. 46.
4. Баженов В.И., Денисов А.А. Проектирование современных комплексов биологической очистки сточных вод // Экология и промышленность России. 2009. №2. С. 26.
5. Саломеев В.П., Гогина Е.С. Применение одноиловой системы денитрификации для реконструкции биологических очистных сооружений // Вестник МГСУ. 2009. №3. С. 129-135
6. Андреев С.Ю., Гришин Б.М., Камбург В.Г., Алексеева Т.В., Ширшин И.Б. Моделирование процессов флотационной очистки сточных вод // Региональная архитектура и строительство. 2009. №2. С. 91 – 99.

Энерго- и ресурсосбережение в высокотемпературных печах с фальш-кожухом

к.т.н. доцент Большакова Н.В.
Университет машиностроения
8(499)267-12-10, n.bolshakova@pochta.ru

Аннотация. Изложены метод и алгоритм компьютерного анализа тепловых потерь в высокотемпературных печах, позволяющего оптимизировать конструкцию и материалы футеровки с точки зрения энерго- и ресурсосбережения. Приводятся сведения о программном обеспечении предложенного метода и результаты расчёта варианта печи с фальш-кожухом.

Ключевые слова: высокотемпературные печи, футеровка, фальш-кожух, система уравнений теплопереноса, свободная конвекция в зазоре, компьютерный анализ

При проектировании высокотемпературных печей, предназначенных для термообработки различных материалов, встаёт вопрос о сбережении энергии, затрачиваемой на процесс. С целью уменьшения потерь тепла печное пространство изолируют от окружающей среды футеровочными и теплоизоляционными материалами.

По ГОСТ 12.2.007.9-93 температура наружной стенки печи (части, доступные для соприкосновения) не должна превышать 70-80 °С, а по санитарным нормам для безопасности обслуживающего персонала эта температура не должна превышать 45 °С. В связи с этим выбор материалов футеровки и толщины огнеупорных и теплоизолирующих слоёв в печах с высокой температурой становится весьма актуальным.

Расчёты показали: чтобы иметь заданные температуры в печи и наружной поверхности и одновременно минимальные тепловые потери слои огнеупора футеровки и теплоизоляции должны иметь существенную толщину, а материалы наименьшую теплопроводность. Для уменьшения толщины изоляции и сбережения футеровочных материалов с наружной стороны печи устанавливают с зазором от поверхности футеровки металлический кожух 4 (лист),

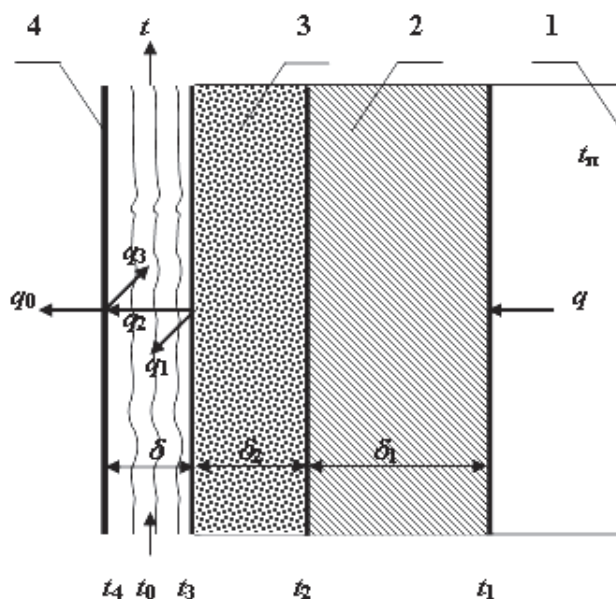


Рисунок 1. Футеровка высокотемпературной печи: 1 – пространство печи; 2 – слой огнеупорной футеровки; 3 – теплоизоляционный слой; 4 – фальш-кожух; t_n – температура печи; t_0 – температура окружающей среды; t_1, t_2, t_3 – температуры границ слоёв футеровки; t_4 – температура фальш-кожуха; t – температура воздуха на выходе из зазора; δ_1, δ_2 – толщины слоёв футеровки; δ – толщина зазора между фальш-кожухом и поверхностью футеровки

Применение фальш-кожуха в печах показало их эффективность. В то же время возникла проблема: как выбрать толщины слоёв футеровки и зазора и рассчитать тепловые потери в печах с фальш-кожухом на стадии проектирования.

Тепловые потоки из внутреннего пространства печи к стенке футеровки и тепловые потоки через слои футеровки можно рассчитать по известным зависимостям.

Тепловой поток из печного пространства передаётся внутренней стенке футеровки конвекцией и излучением согласно уравнению Ньютона:

$$q = \alpha_n \cdot (t_n - t_1),$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвекцию и излучение печной среды и рассчитываемый по известным зависимостям.

Через слой огнеупора и слой теплоизоляции тепловые потоки по уравнению Фурье для одномерной задачи при значительной протяжённости слоёв равны:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (t_1 - t_2), \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (t_2 - t_3).$$

Теплоперенос в зазоре определяется многими факторами: излучением и теплопроводностью между поверхностью теплоизоляции и фальш-кожухом, свободной конвекцией воздуха в зазоре, толщиной зазора, равномерностью температур стенок по высоте, излучательными характеристиками стенок, гидродинамическими характеристиками зазора и т.д.

С целью создания методики расчёта печей с фальш-кожухом и уточнения зависимостей, описывающих теплоперенос в зазоре, был поставлен эксперимент. В электропечах сопротивления снаружи футеровки устанавливался металлический кожух на разных расстояниях от теплоизоляции. Термопарами измерялась температура поверхности теплоизоляции и фальш-кожуха. Изменялась и фиксировалась электрическая мощность печи и тепловые потери через стенку с фальш-кожухом.

Проведённый эксперимент показал преимущества такой системы с точки зрения эко-

номии футеровочных материалов при меньших тепловых потерях. Эксперимент позволил описать теплообмен в зазоре и выбрать методику расчёта тепловых потерь печи через изоляцию с зазором.

Известно, что в зазорах с нагретыми стенками наблюдается свободная конвекция воздуха. Формулы, описывающие теплоперенос свободной конвекцией в замкнутых пространствах и в текучих средах, представлены многими авторами [1]. В данном эксперименте воздух поступал в открытый зазор снизу из окружающей атмосферы и в результате нагрева поднимался вверх из-за уменьшения плотности и созданной силы тяги.

Гидродинамика процесса при естественной тяге в открытой щели навесного вентилируемого фасада описана в [2]. Подъёмная сила в зазоре возможна при определённых толщинах зазора, высоты канала и температурах стенок щели, создающих тепловой поток для нагрева воздуха.

Тепло, переданное воздуху в зазоре печи благодаря свободной конвекции, описывалось традиционной критериальной зависимостью числа Нуссельта Nu от числа Релея Ra . Эта зависимость при обработке полученных экспериментально данных в открытой щели приобретает вид:

$$Nu = \frac{1}{15} \cdot \left(Ra \cdot \frac{h}{D} \right)^{0,4},$$

где h – высота футеровки и зазора,

$D = 2\delta$ – эквивалентный размер, равный удвоенной толщине зазора δ , принятый по гидравлическому размеру щели.

Число Ra принято равным:

$$Ra = \frac{g \cdot (t_c - t_r) \cdot D^3}{\nu^3 \cdot (t_r + 273)} \cdot Pr,$$

где $t_c = \frac{t_3 + t_4}{2}$ – средняя температура стенок зазора,

t_3 – температура внутренней стенки зазора - теплоизоляции,

t_4 – температура наружной стенки зазора – фальш-кожуха,

t_r – средняя температура воздуха в зазоре,

ν – кинематическая вязкость воздуха при средней температуре в зазоре,

Pr – число Прандтля воздуха при средней температуре в зазоре.

По числу Nu можно определить коэффициент теплоотдачи от стенки теплоизоляции к воздуху и от фальш-кожуха к воздуху, условно принятыми равными:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{2D},$$

где λ – теплопроводность воздуха при средней температуре воздуха в зазоре.

Для расчёта суммарных тепловых потерь из печи рассматривают отдельные тепловые потоки.

От наружной стенки теплоизоляции тепло передаётся воздуху в зазоре за счёт свободной конвекции:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (t_3 - t_r).$$

От фальш-кожуха тепло передаётся воздуху в зазоре также за счёт свободной конвекции, если его температура при заданных режимах и зазорах больше температуры воздуха в зазоре, в ином случае тепло передаётся от воздуха фальш-кожуху:

$$q_3 = \alpha_1 \cdot (t_4 - t_r)$$

Суммарное тепло, переданное воздуху за счёт свободной конвекции можно описать уравнением нагрева его от температуры окружающей среды до температуры на выходе из зазора:

$$q_r = \rho \cdot Cp \cdot w \cdot \delta \cdot \frac{t - t_0}{h},$$

где ρ – плотность воздуха при средней температуре t_r ,

Cp – массовая теплоёмкость воздуха при средней температуре t_r ,

t_0 – температура воздуха в окружающей среде и на входе в зазор,

t – температура воздуха на выходе из зазора,

w – скорость воздуха в зазоре, которую можно рассчитать из уравнения, представляющего собой равенство напора за счёт силы тяги силе гидравлического сопротивления течению воздуха в зазоре:

$$\rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{t_r - t_0}{t_0 + 273} = \left(\xi_m + \xi_r \cdot \frac{h}{D} \right) \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2},$$

где ξ_m – коэффициент местного гидравлического сопротивления зазора,

ξ_r – коэффициент гидравлического сопротивления трения.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения зависит от скорости воздуха в зазоре и может быть рассчитан по формуле для плоских щелей [3]:

$$\xi_r = \frac{96}{Re},$$

где $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Входящая в вышеприведённые формулы средняя температура газа t_r по высоте зазора h определяется как

$$t_r = \frac{1}{h} \int_0^h t(x) dx,$$

где $t(x)$ – решение дифференциального уравнения прогрева воздуха, текущего в канале и принимающего тепло от стенок с принятыми одинаковыми коэффициентами теплоотдачи:

$$\frac{dt(x)}{dx} = \frac{2St}{\delta} [t_c - t(x)],$$

где введён критерий подобия Стентона:

$$St = \frac{\alpha l}{\rho \cdot Cp \cdot w}.$$

Решение дифференциального уравнения с начальным условием $t(0) = t_0$ даёт распределение температуры по высоте зазора:

$$t(x) = t_c - (t_c - t_0) \cdot e^{-B \cdot x},$$

где $B = \frac{2St \cdot h}{\delta}$.

Таким образом, для средней температуры газа окончательно имеем:

$$t_r = t_c - (t_c - t_0) \cdot \frac{1}{B} \cdot (1 - e^{-B}).$$

Кроме того, тепло от наружной стенки теплоизоляции передаётся излучением к фальш-кожуху:

$$q_2 = \frac{\sigma \cdot [(t_3 + 273)^4 - (t_4 + 273)^4]}{1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_4 - 1},$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана,

ε_3 и ε_4 – степень черноты теплоизоляции и фальш-кожуха.

Следует учесть также теплоотдачу от фальш-кожуха в окружающую среду:

$$q_0 = \alpha_0 \cdot (t_4 - t_0),$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи от фальш-кожуха в окружающую среду, который рассчитывается по формулам, учитывающим излучение и свободную конвекцию, или по формулам, аппроксимирующим известные экспериментальные данные.

Для сведения баланса тепловых потоков можно написать уравнения:

$$q = q_1 + q_2, \quad q_2 = q_3 + q_0, \quad q_r = q_1 + q_3.$$

Задавшись температурой печи, а также температурой окружающей среды, можно по представленной системе уравнений подобрать для конкретной печи типы огнеупорного и теплоизоляционного материала, их толщину, а также толщину зазора, необходимую для обеспечения заданной температуры фальш-кожуха. С помощью этой же системы можно определить тепловые потери печи и оптимизировать их.

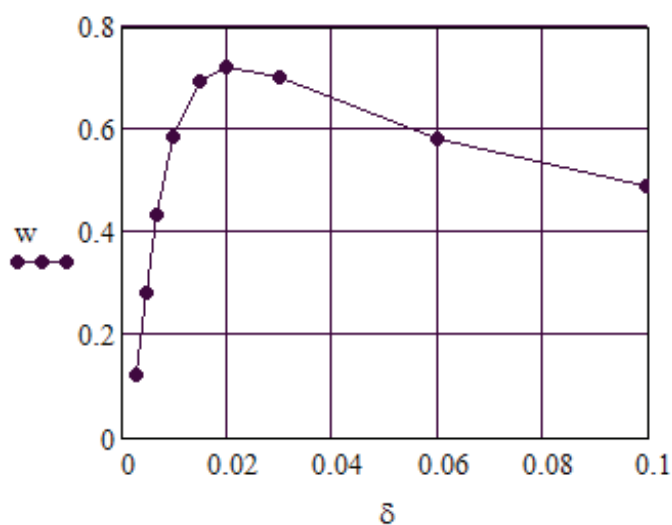


Рисунок 2. Зависимость средней скорости воздуха в зазоре от толщины зазора

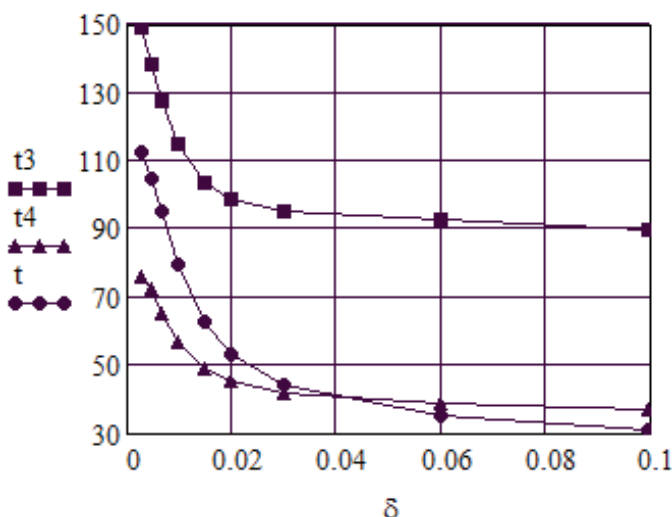


Рисунок 3. Зависимость температуры поверхности изоляции t_3 , фальш-кожуха t_4 , температуры воздуха на выходе t_r от толщины зазора

Программное обеспечение предложенного метода расчёта может быть осуществлено с помощью системы Mathcad. Система Mathcad позволяет предложенную систему уравнений

увеличить за счёт введения дополнительных уравнений, описывающих свойства воздуха, коэффициентов теплоотдачи печи и в окружающую среду и т.д.

Для анализа получаемых решений выполнен расчёт системы из 19 уравнений в программе Mathcad. Расчёт проводился при температуре печи 1000°C и $\alpha_{\text{п}} = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при заданных толщинах слоёв огнеупора ШЛ-1,3, равной 0,13 м, и теплоизоляции из МКРВ-200, равной 0,1 м. Коэффициент теплоотдачи от фальш-кожуха в окружающую среду рассчитывался по формуле:

$$\alpha_0 = 7,3 + 0,6 \cdot (t_4 - t_0)^{0,57}.$$

Характер изменений скорости воздуха в зазоре, температур фальш-кожуха, стенок зазора, температуры воздуха на выходе из зазора, тепловых потоков от толщины зазора, полученные расчётом, представлен на графиках.

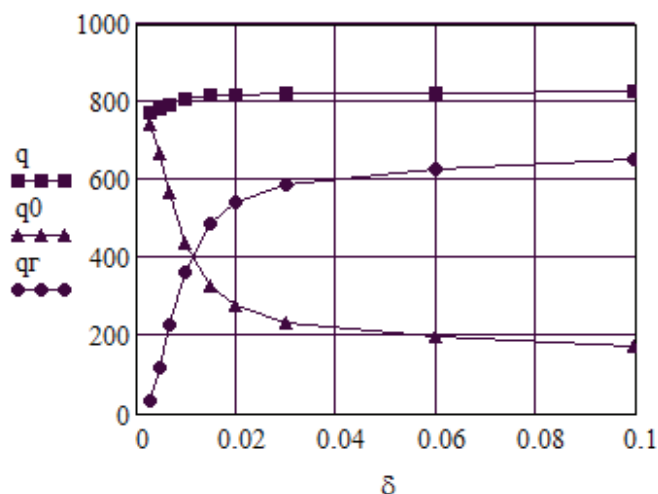


Рисунок 4. Зависимость от толщины зазора теплового потока, переданного воздуху q_g , теплового потока, переданного в окружающую среду от фальш-кожуха q_0 и суммарного теплового потока, теряемого печью q

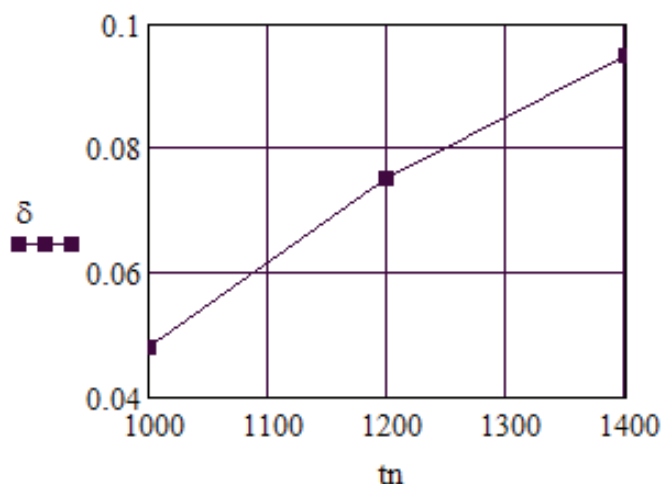


Рисунок 5. Зависимость толщины зазора от температуры печи при температуре на фальш-кожухе 70°C

Как видно из графиков, скорость воздуха растёт с увеличением толщины зазора δ между футеровкой и фальш-кожухом от 3 до 20 мм, поскольку уменьшается гидравлическое сопротивление трения в зазоре, и вместе со скоростью растёт тепло q_g , унесённое воздухом.

Из-за роста теплового потока к воздуху в зазоре температура фальш-кожуха t_4 существенно уменьшается с увеличением зазора и поэтому тепловой поток от фальш-кожуха в окружающую среду q_0 с увеличением зазора уменьшается.

Тепло воздуха, выходящего из фальш-кожуха, можно использовать в утилизационной установке в целях энергосбережения.

Общий тепловой поток (потери) через футеровку с фальш-кожухом q с увеличением толщины зазора от 0 до 50 мм при заданных условиях увеличивается примерно на 3,5%. Следовательно, для уменьшения тепловых потерь более существенно подбирать толщины слоёв футеровки.

Решение системы уравнений позволяет оценить и другие соотношения параметров процесса. Так при увеличении температуры в печи для поддержания температуры на фальш-кожухе 70 °С следует увеличивать величину зазора согласно рисунку 5.

Расчёты показали: чем меньше толщина теплоизоляционного слоя δ_t , тем с большим зазором надо устанавливать фальш-кожух, чтобы поддерживать температуру на кожухе 70 °С (рисунок 6). На рисунке 6 нанесена точка, показывающая, что при отсутствии фальш-кожуха для поддержания температуры на поверхности теплоизоляции 70 °С толщина изоляции должна составлять 0,17 м.

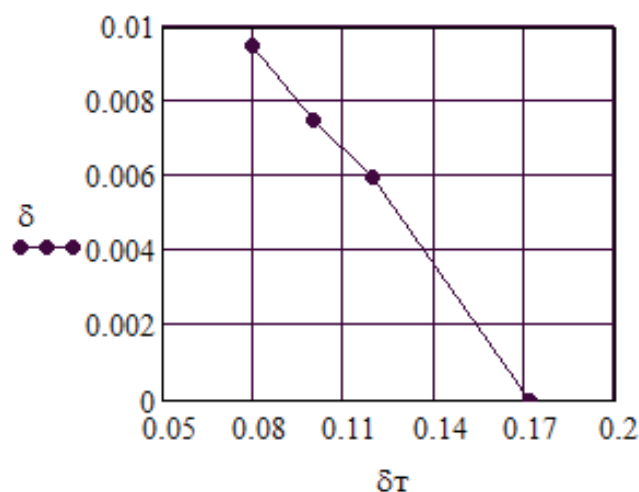


Рисунок 6. Зависимость величины зазора от толщины теплоизоляции печи с температурой 1200 °С, поддерживающей на фальш-кожухе 70 °С

Следует отметить, что при определённых величинах зазора свободная конвекция в открытой щели отсутствует, а превалирует перенос тепла теплопроводностью. Это подтверждает компьютерный анализ значениями чисел Релея Ra .

Настоящая методика расчёта может быть использована при проектировании высокотемпературных печей и реакторов с целью оптимизации тепловых потерь и экономических затрат на материалы футеровки.

Литература

1. Бухмиров В.В. Расчёт коэффициента теплоотдачи (справочник), т.6. – Иваново, 2012 г.
2. Явтушенко Е.Б. Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов. Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений", 2013, №2 (7)
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии ч.1. - М.:Химия, 1995 г.