

УДК 621.184.24

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ В ТОПКЕ КОТЛА

Попова Е.С., студент гр. 5ВМ5Б, II курс
Научный руководитель: Долгих А.Ю., б/с.
Томский политехнический университет
г. Томск

Значительную часть энергетики России составляют электростанции, работающие на твердом энергетическом топливе [1]. Надежность и экономичность работы котлов в значительной степени зависит от состояния поверхностей нагрева. Основной проблемой при сжигании твердого топлива на работу котельной установки наносят окислы серы и минеральная часть топлива, вызывающие коррозию и загрязнение поверхностей нагрева. Зола в расплавленном состоянии создает пленку на трубах, ухудшая при этом тепловосприятие и теплопроводность металла, что сказывается на режиме работы котла. Со временем эта пленка становится все толще, металл не выдерживает теплового напряжения, вследствие чего, происходят не допускаемые физические преобразования, вплоть до нарушения целостности труб [2].

Актуальность исследования состоит в том, что обладая информацией о процессе шлакования и его влиянии на поверхности нагрева в процессе эксплуатации котла, можно минимизировать негативные последствия процесса шлакования, что может быть достигнуто регулированием температурного режима в топочной камере, а также своевременной очисткой топки.

Наибольший интерес вызывает распределение температуры в толще стенки экранных труб. Так как данные трубы находятся вокруг зоны горения и впитывают большую часть тепла, необходимо следить за чистотой поверхностей нагрева.

Температурный режим в топочной камере непостоянен, а значит, задача является нестационарной. В качестве примера рассматривается слой натрубных отложений в топке. При малой толщине стенки трубы, по сравнению с диаметром, влиянием кривизны стенки можно пренебречь [3]. Как правило, первоначальный слой загрязнения на много меньше стенки трубы. Тогда в качестве модели можно принять плоскую однородную стенку.

Для описания нестационарного переноса тепла теплопроводностью необходимо воспользоваться дифференциальным уравнением Фурье-Кирхгофа [4]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности.

Это уравнение, устанавливает связь между временным и пространственным изменением в любой точке тела. Так как рассматриваемая модель двумерная, то движение тепла будет происходить в одном направлении, можно ограничиться одномерным уравнением нестационарного переноса тепла теплопроводностью:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right).$$

Для решения нестационарной задачи теплопроводности применим численный метод конечных разностей. Твердое тело представляется в виде совокупности узлов, каждый из которых описывается алгебраическим уравнением температуры. Для узлов, расположенных на границе твердого тела записываются отдельные уравнения, которые выступают в качестве граничных условий. В результате для n узлов получают n алгебраических уравнений, которые решают с помощью вычислительной техники [4].

В случае загрязненной поверхности экранной трубы можно написать программу, которая методом итерационных приближений, одновременно рассчитывает температурное распределение внутри отложения и стенки металла.

Так как на границе загрязнения и металла существует контактное сопротивление, то записывается два граничных условия третьего рода при известных температурах окружающей среды T_{B1} , T_{B2} , контактного сопротивления r_k и коэффициента теплоотдачи к пароводяной смеси α_2 :

Первый слой:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= q_{C1}, \quad t > 0; \\ x = \delta, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{1}{r_k} \cdot (T_{B2}^k - T), \quad t > 0, \end{aligned}$$

где $q_{C1} = \varepsilon \sigma \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{B1}}{100} \right)^4 \right)$ – плотность теплового потока при тепловом излучении.

Второй слой:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{1}{r_k} \cdot (T_{B1}^k - T), \quad t > 0; \\ x = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha_2 \cdot (T_{B2} - T), \quad t > 0. \end{aligned}$$

Температуры на границе T_{B1}^k и T_{B2}^k определяются в процессе итераций.

Искомые температуры в граничных узлах:

Первый слой:

$$T_1^{j+1} = T_2^{j+1} + q_{C1} \frac{h}{\lambda_1}, \quad j = 0, 1, 2, \dots,$$
$$T_N^{j+1} = \frac{T_{N-1}^{j+1} + Bi_1 \cdot T_{B2}^k}{1 + Bi_1}, \quad j = 0, 1, 2, \dots,$$

Второй:

$$T_1^{j+1} = \frac{T_2^{j+1} + Bi_1 \cdot T_{B1}^k}{1 + Bi_1}, \quad j = 0, 1, 2, \dots,$$
$$T_N^{j+1} = \frac{T_{N-1}^{j+1} + Bi_2 \cdot T_{B2}^k}{1 + Bi_2}, \quad j = 0, 1, 2, \dots,$$

где $Bi_1 = \frac{h}{r_k \cdot \lambda_1}$, $Bi_2 = \alpha_2 \cdot \frac{h}{\lambda_2}$ – сеточный аналог Био, h – шаг.

Внутри слоя для определения температуры в каждой точке вычисляется как при граничных условиях первого рода:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{\lambda \cdot \tau}{\rho \cdot c \cdot h^2} (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j).$$

Граничные условия третьего рода требует выполнение жестких условий для устойчивости алгоритма:

$$\frac{\lambda \cdot \tau}{h^2} (1 + Bi) < 0,5.$$

В качестве исходных данных используются результаты работы [5], в которой исследуются теплопроводность шлаковых отложений, образующихся при сжигании канско-ачинских углей. Коэффициент теплопроводности для всех образцов различный, который зависит от температуры, состава шлака. Так, например, сульфатносвязанные отложения, отобранные в котле БКЗ-420-140-9, имеют λ чуть менее 0,1 Вт/м·К, для железистых – в пределах от 1,4 до 1,5 Вт/м·К.

Температура ядра горения 2000 К, воды в трубе – 200°C. Объект исследования – сульфатносвязанные (А) и железистые отложения (В) толщиной до 5 мм (расчеты проводятся дискретно) со значением коэффициента теплопроводности $\lambda=0,9$ и $\lambda=1,5$ Вт/(м·К) [6], соответственно. Экранная труба изготовлена из углеродистой стали марки 20, толщина стенки 6 мм с постоянным коэффициентом теплопроводности 50 Вт/(м·К). Контактное сопротивление сапроксимировано по данным из работы [5], а коэффициент теплоотдачи на

внешней стороне $\alpha_2=4000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Расчетное время 600 секунд, которое позволяет прийти к стационарному режиму.

Данная расчетная модель не учитывает теплоотвод пароводяной смесью, поэтому температуры отличаются от действительности, а также ограничена температурой плавления шлака. Когда шлак переходит в текучее состояние, начинают действовать другие законы теплообмена.

С помощью вычислительной техники разработанный алгоритм перепиывается на язык программирования Pascal. Результаты вычислений представлены на рисунке 1.

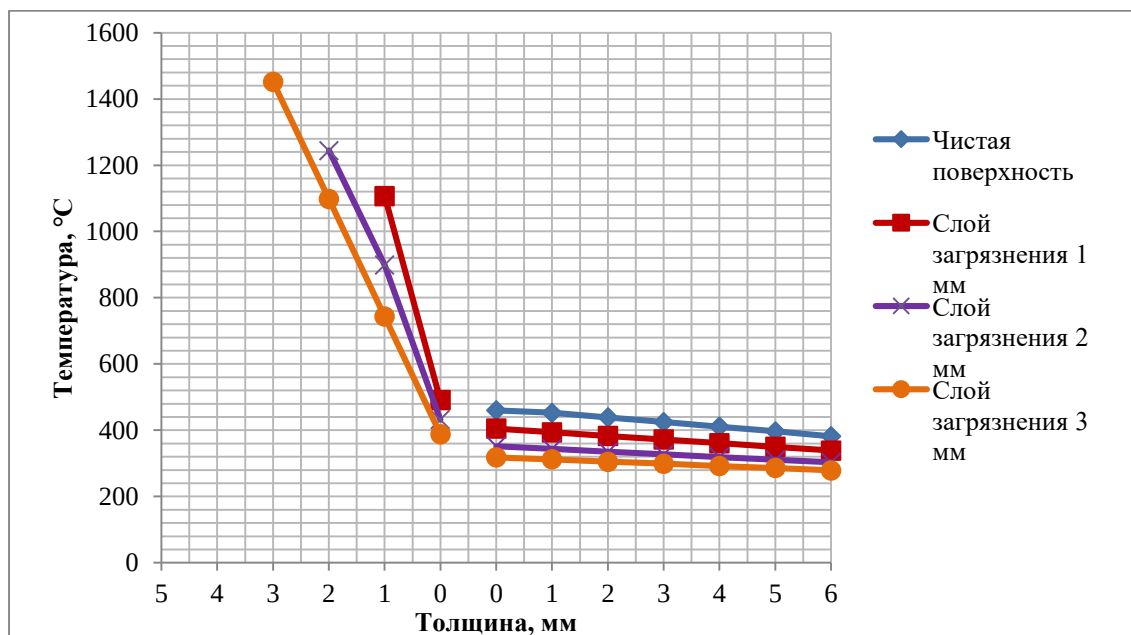


Рисунок 1. Распределение температуры в слое отложения (А).

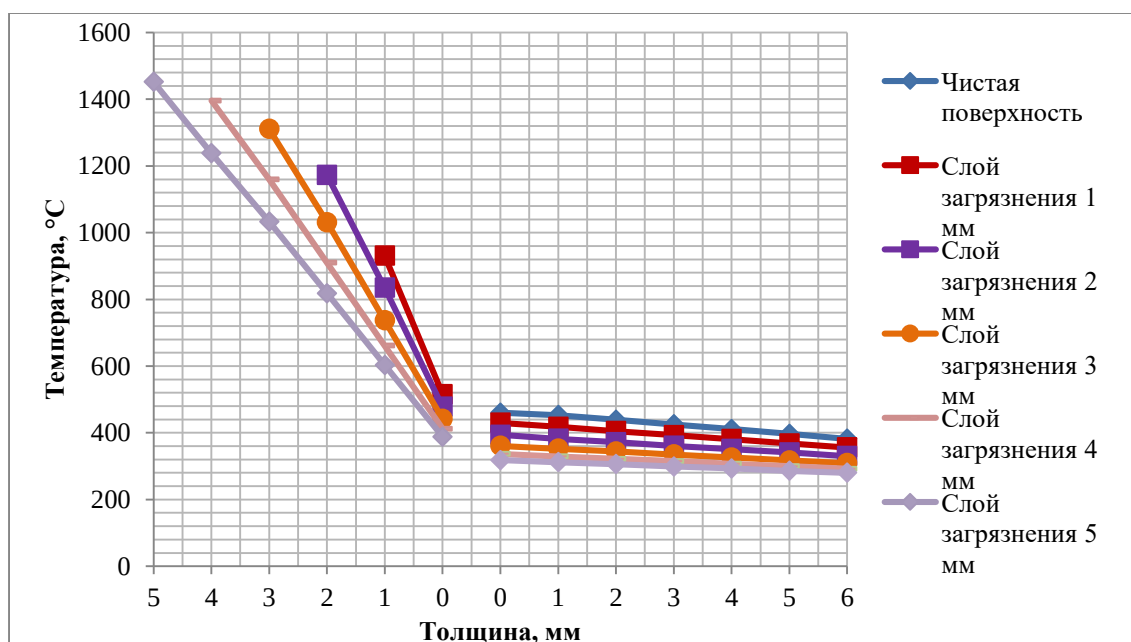


Рисунок 2. Распределение температуры в слое отложения (В).

В точке ноль графики имеют разрыв из-за контактного сопротивления. Для удобства восприятия точка ноль дублируется.

Из рис. 1 и 2 видно, чем больше коэффициент теплопроводности, тем меньше тепловое напряжение в слое загрязнения. Железистые отложения (В) могут иметь большую толщину при равном температурном распределении с сульфатносвязанными (А). Однако, с увеличением толщины загрязнения тепловые потери возрастают. Происходит недогрев рабочего тела. Это отрицательно сказывается на работе поверхностей нагрева и котельного агрегата в целом. Своевременная чистка позволит минимизировать негативное влияние загрязнений.

Список литературы:

1. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация: учебник для нач. проф. образования/ Б.А. Соколов. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 432 с.
2. Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 112 с.: [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 8 (176)]
3. Михеев М.А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – Е.: Издательство АТП, 2015. – 320 с., ил.
4. Кузнецов Г.В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет – Томск, Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
5. Раков Ю.Я. Экспериментальное исследование теплопроводности натрубных отложений поверхностей нагрева пылеугольных котлов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец.05.14.14: спец. 01.14.14 / Ю.Я. Раков, Томский политехнический университет, науч. рук. А.В. Кузьмин – Защита сост. 25.05.2007 г. – Томск: Б.и., 2007. – 205 л.: ил. – Библиогр.: с. 136-144 (76 назв.).
6. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Теплопроводность натрубных отложений котлов при сжигании канско-ачинских углей// Теплоэнергетика. – 2000. № 12. С. 45-47.