

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОГНЕВОГО ЛИСТА

С.М. Стёпин, В.А. Мунц

ОАО «Уралэнергоцветмет» разработана конструкция котла-утилизатора для утилизации теплоты отходящих газов за печами с плавкой в жидкой ванне. Одним из основных элементов данной конструкции является «огневой» лист (рис 1), представляющий собой стальную пластину с приваренными к нему охлаждающими испарительными трубами. Отходящие газы имеют температуру 1200 – 1450 °С и высокую запыленность, кроме того, в них содержится значительное количество оксидов серы. Газы имеют примерно следующий состав: $N_2=81\%$, $SO_2=11\%$, $H_2O=5\%$, $CO_2=2\%$, $O_2=0,5\%$. Данная конструкция облегчает очистку теплообменных поверхностей от загрязнений, надёжно защищает поверхности теплообмена от сернокислотной коррозии в период пуска и останова котла.

Обычно толщина листа и стенки труб, шаги между трубами и другие конструктивные характеристики определяются экспериментально на основе опыта эксплуатации, что приводит, как правило, к перерасходу металла на изготовление конструкции, реже к авариям из-за перегрева и коробления огневого листа.

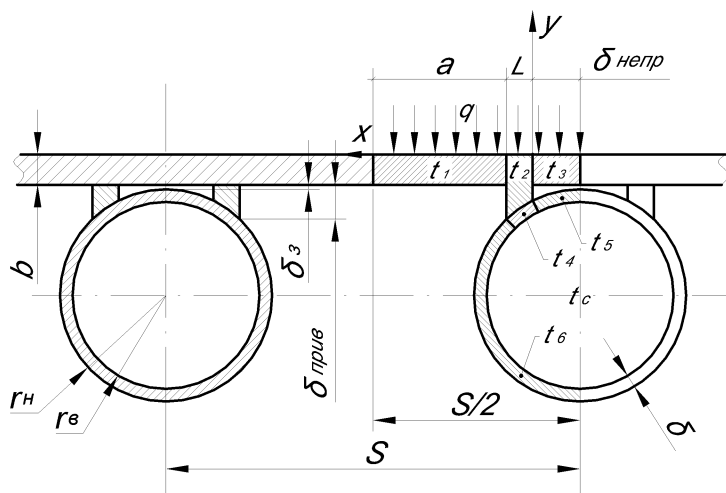


Рис 1. Профиль огневого листа и приваренных к нему труб. Расчетная схема приварки трубы к огневому листу

Целью настоящей работы является разработка надежной методики расчета распределения температур по сечению огневого листа

Будем считать, что трубы приварены к листу по всей их длине швом постоянной толщины L (рис 1). Температура кипящей воды в трубах постоянна по их длине, следовательно, температура металла меняется только в плоскости чертежа. Коэффициенты теплопроводности λ металла труб, огневого листа и сварного шва

считаем одинаковыми и не зависящими от температуры.

Рассмотрим участок шириной $s/2$ и длиной $1m$. При этом разделим всю конструкцию на шесть отдельных элементов (рис. 1).

Участок огневого листа длиной a , рассматриваем как стержень, температура которого меняется только по его длине и постоянна по толщине в каждом сечении. Температура огневого листа на этом участке $t_1=t_1(x)$. От газов к металлу подводится постоянный тепловой поток q . С внутренней стороны на этом участке стержень можно считать теплоизолированным ввиду значительных термических сопротивлений слоев воздуха и изоляции в межтрубном пространстве за огневым листом.

Участок огневого листа длиной $\delta_{непр}$, также рассматриваемый как стержень, температура которого меняется только по его длине и постоянна по толщине в каждом сечении. Температура огневого листа на этом участке $t_3=t_3(x)$. С внутренней

стороны на этом участке стержень также можно считать теплоизолированным ввиду значительного термического сопротивления слоев воздуха

Участок (длиной L) огневого листа и сварного шва рассматриваем как участок с постоянной температурой, т.к. ширина участка вдоль листа меньше его высоты. Температура огневого листа на этом участке $t_2 = const$. С наружной стороны продолжается подвод теплоты от газов с прежней интенсивностью q . С внутренней отвод теплоты происходит к трубе.

Стенку трубы можно рассматривать как стержень с осью z теплоизолированный с внешней стороны. С внутренней стороны трубы тепло отводится к воде с температурой t_c имеющей коэффициент теплоотдачи α .

Участок стенки трубы от сварного шва до оси симметрии длиной $m_1 = r_g \cdot \arcsin\left(\frac{\delta_{непр}}{r_g + \delta}\right)$ рассматривается как стержень, температура которого $t_5 = t_5(z, t)$ меняется только по его длине и постоянна по толщине в каждом сечении.

Участок стенки трубы находящийся в непосредственном контакте со сварным швом длиной $m_2 = r_g \cdot \arcsin\left(\frac{\delta_{непр} + L}{r_g + \delta}\right) - m_1$ рассматривается как участок с постоянной температурой $t_4 = const$.

Участок стенки трубы от сварного шва до оси симметрии длиной $m_3 = r_g \cdot \left[\pi - \arcsin\left(\frac{\delta_{непр} + L}{r_g + \delta}\right) \right]$ также рассматривается как стержень, температура которого $t_6 = t_6(z)$ меняется только по его длине и постоянна по толщине в каждом сечении.

Дифференциальные уравнения, описывающие изменение температуры по длине шести зон огневого листа при граничных условиях второго рода (постоянный тепловой поток) будут иметь следующий вид:

$$\frac{d^2 t_1}{dx^2} + \frac{q}{\lambda \cdot b} = 0 \quad (1)$$

$$t_2 = t_4 \quad (2)$$

$$\frac{d^2 t_3}{dx^2} + \frac{q}{\lambda \cdot b} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 t_5}{dz^2} - \frac{\alpha \cdot (t_5 - t_c)}{\lambda \cdot \delta} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2 t_6}{dz^2} - \frac{\alpha \cdot (t_6 - t_c)}{\lambda \cdot \delta} = 0 \quad (5)$$

Граничные условия для решения системы: считаем, что торцевые поверхности стержня и трубы теплоизолированы (следствие симметрии): $x = -\delta_n, \frac{dt_1}{dx} = 0$; $x = L + a,$

$$\frac{dt_3}{dx} = 0; \quad z = -m_1, \frac{dt_5}{dz} = 0; \quad z = m_2 + m_3, \frac{dt_6}{dz} = 0.$$

На границе контакта участков и постулируется непрерывность полей температур: $x = 0, t_1 = t_2$; $x = L, t_2 = t_3$; $z = 0, t_5 = t_4$; $z = m_2, t_6 = t_4$

Решение представляет собой следующую систему уравнений:

$$t_2 = t_4 = t_c + \frac{q \cdot s \cdot \left(1 + e^{2 \cdot m_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}}} \right)}{2 \cdot \left[\sqrt{\alpha \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \left(e^{2 \cdot m_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}}} \cdot \cos \left(m_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \right) + \sin \left(m_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \right) - e^{-2 \cdot m_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}}} \right) + \alpha \cdot (m_2 + m_3) \cdot \left(1 + e^{2 \cdot m_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}}} \right) \right]}$$

$$t_3 = t_2 - \frac{q \cdot x^2}{2 \cdot \lambda \cdot b} - \frac{q \cdot \delta_{\text{непр}}}{\lambda \cdot b} \cdot x, \quad t_1 = t_2 - \frac{q}{\lambda \cdot b} \left[\frac{x^2}{2} - x \cdot (a + L) + L \cdot \left(\frac{L}{2} + a \right) \right]$$

$$t_6 = \frac{\sin \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot z \right) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot (m_2 + m_3)} \cdot (t_2 - t_c) + \cos \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot z \right) \cdot e^{\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot (m_2 + m_3)} \cdot (t_2 - t_c)}{e^{\left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot m_3 \right)} + e^{\left(-\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot m_3 \right)}} + t_c$$

$$t_5 = \frac{\sin \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot z \right) \cdot e^{\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot m_1} \cdot (t_2 - t_c) + \cos \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot z \right) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot m_1} \cdot (t_2 - t_c)}{e^{\left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot m_3 \right)} + e^{\left(-\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}} \cdot m_3 \right)}} + t_c$$

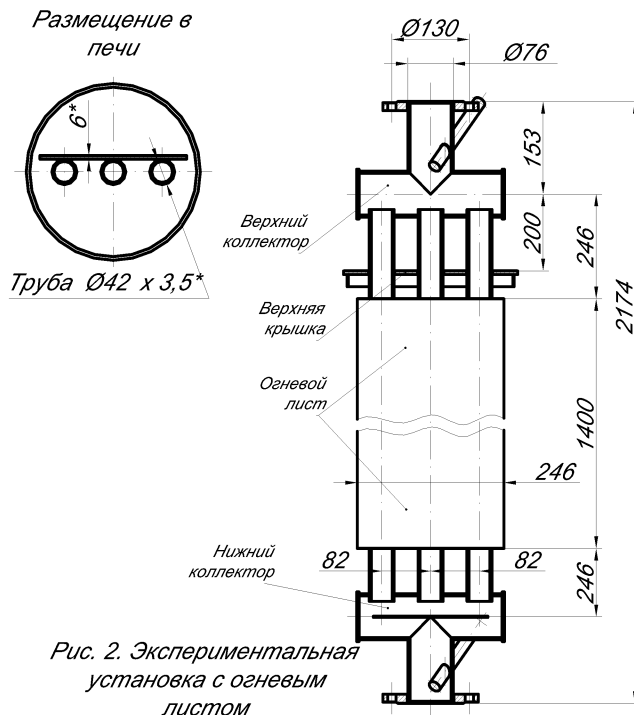


Рис. 2. Экспериментальная установка с огневым листом

Эксперимент проводился в проблемной лаборатории кафедры Промышленной теплоэнергетики Уральского государственного технического университета – УПИ. Целью эксперимента являлось определение температур характерных точек поверхности огневого листа. Огневой лист представлял собой, лист стали с приваренными к нему трубами (рис.2.). В процессе эксперимента установка помещалась в нагревательную печь круглого сечения диаметром 280 мм. Эксперимент проводился при подаче воды снизу вверх. Для охлаждения панели в печи снизу подавалась прямая вода из

тепловой сети. Задняя часть панели была изолирована каолиновой ватой. Для исключения неравномерности прогрева листа по высоте была изолирована верхняя и нижняя часть установки.

Температура охлаждающей воды на входе и на выходе из установки измерялась термометром ртутным стеклянным лабораторным ТЛ-4. Температура внутренней поверхности печи измерялась пирометром МИКРОН М 101 НТ, а внешней на высоте термопарой КТХА 02.01-Т600-И-1,5-2500/500 (хромель-алюмель). Температуры поверхности огневого листа также измерялись термопарами КТХА 02.01-Т600-И-1,5-2500/500 (хромель-алюмель). Все термопары КТХА были подключены к устройству контроля температуры УКТ38 и при помощи адаптера интерфейса АС-2 и программы Owen Process Manager температуры с этих термопар

непрерывно фиксировались в ПК.

Расход охлаждающей воды определялся при помощи счетчика воды СГВ-15 и секундомера. Определение теплового потока осуществлялось двумя способами: измерением расхода охлаждающей воды и перепада температур и измерением температуры стенки печи и средней температуры огневого листа.

Эксперимент проводился в три этапа. Каждый этап включал в себя стадию разогрева печи до 850°C и стационарный режим. Погрешность измерения составила

На рис. 3. представлены три характерных эксперимента, которые покрывают весь диапазон температур огневого листа, полученных в процессе эксперимента. Из рис. 3. следует, что предложенная методика основанная на граничных условиях II рода наиболее точно позволила рассчитать температурное поле.

Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными

