

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ.

С.М. Стёпин, В.А. Мунц

На сегодняшний день в металлургической промышленности имеется огромный потенциал для проведения энергосберегающих мероприятий. Различные энергоёмкие производства осуществляют огромный выброс тепловой энергии, которую необходимо использовать.

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. Данная конструкция облегчает очистку теплообменных поверхностей от загрязнений, надёжно защищает поверхности теплообмена от сернокислотной коррозии в период пуска и останова котла.

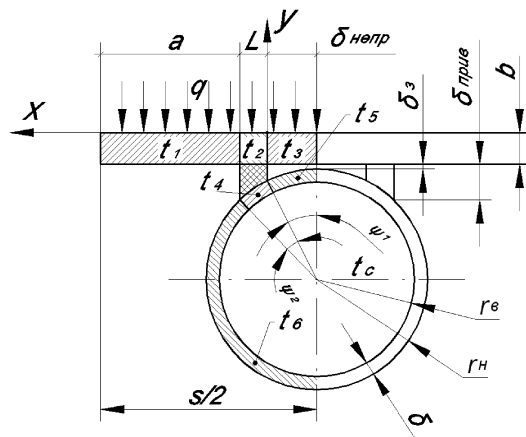


Рис. 1. Профиль огневого листа и приваренных к нему труб. Расчетная схема приварки трубы к огневому листу.

Целью настоящей работы является разработка надежной методики расчета распределения температур по сечению огневого листа, позволяющий проводить анализ влияния различных факторов на перегрев листа.

Оптимальным для заданного режима работы можно назвать такой профиль конструкции, который обеспечивает выполнение некоторых условий, которые по сути являются этапами проектирования:

1. Максимальная температура не превышает допустимую для данного материала по условиям окалинообразования.
2. Максимальные температурные напряжения меньше допустимых.
3. Расход металла на единицу поверхности нагрева минимален.

Первым шагом для создания оптимальной энергосберегающей конструкции является определение температурного режима (этап №1).

Рассмотрим аналитическую методику расчета температурного поля.

Считаем, что трубы приварены к листу по всей их длине швом постоянной толщины L (рис 1). Температура кипящей воды в трубах практически 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 координаты. На поверхность огневого листа падает тепловой поток не изменяющийся во времени и не зависящий от координаты листа (граничные условия II рода).

Расчет температуры внутренней поверхности трубы (участки t_4 , t_5 , t_6 на рис 1) проводится при условии, что весь воспринятый тепловой поток на участках t_1 , t_2 , t_3 передавался через сварной шов L трубе на участке t_4 .

Стенку трубы можно рассматривать как стержень теплоизолированный с внешней стороны. С внутренней стороны трубы тепло отводится к воде с температурой t_c имеющей коэффициент теплоотдачи α (граничные условия III рода).

Температуры участков трубы определяются следующим образом:

$$t_4 = e^{m(\psi-\psi_1)} \cdot C_6 + e^{-m(\psi-\psi_1)} \cdot C_5 + \frac{q \cdot s}{2 \cdot L \cdot \alpha} + t_c$$

$$t_5 = e^{m(\psi-\psi_1)} \cdot C_4 + e^{-m(\psi-\psi_1)} \cdot C_3 + t_c$$

$$t_6 = e^{m(\psi-\psi_1)} \cdot C_2 + e^{-m(\psi-\psi_1)} \cdot C_1 + t_c$$

где:

$$C_1 = \frac{q \cdot s \cdot e^{m(\pi-\psi_1)} [\sinh(m \cdot (\psi_1 + \psi_2)) - \sinh(m \cdot \psi_1)]}{4 \cdot \alpha \cdot r_6 \cdot \psi_2 \cdot \sinh(m \cdot \pi)}$$

$$C_2 = \frac{q \cdot s \cdot e^{-m(\pi-\psi_1)} [\sinh(m \cdot (\psi_1 + \psi_2)) - \sinh(m \cdot \psi_1)]}{4 \cdot \alpha \cdot r_6 \cdot \psi_2 \cdot \sinh(m \cdot \pi)}$$

$$C_3 = \frac{q \cdot s \cdot e^{-m \cdot \psi_1} [\sinh(m \cdot (\pi - \psi_1)) - \sinh(m \cdot (\pi - \psi_1 - \psi_2))]}{4 \cdot \alpha \cdot r_6 \cdot \psi_2 \cdot \sinh(m \cdot \pi)}$$

$$C_4 = \frac{q \cdot s \cdot e^{m \cdot \psi_1} [\sinh(m \cdot (\pi - \psi_1)) - \sinh(m \cdot (\pi - \psi_1 - \psi_2))]}{4 \cdot \alpha \cdot r_6 \cdot \psi_2 \cdot \sinh(m \cdot \pi)}$$

$$C_5 = - \frac{q \cdot s \cdot [e^{m(\pi-2\psi_1-\psi_2)} - e^{m(\pi-2\psi_1)} + e^{m \cdot \pi} - e^{m(\psi_2-\pi)}]}{8 \cdot \alpha \cdot r_6 \cdot \psi_2 \cdot \sinh(m \cdot \pi)}$$

$$C_6 = \frac{q \cdot s \cdot [e^{-m(\pi-2\psi_1-\psi_2)} - e^{-m(\pi-2\psi_1)} + e^{-m \cdot \pi} - e^{-m(\psi_2-\pi)}]}{8 \cdot \alpha \cdot r_6 \cdot \psi_2 \cdot \sinh(m \cdot \pi)}$$

$$m = r_6 \sqrt{\frac{\alpha_2}{\lambda \cdot \delta}}; \quad \psi_1 = \arcsin \frac{\delta_{непр}}{r_H}; \quad \psi_2 = \arcsin \frac{\delta_{непр} + L}{r_H} - \psi_1$$

Предполагалось, что температура листа на участке t_2 не изменяется ни по длине, ни по высоте и рассчитывается как средняя величина t'_2 и t''_2 .

Температура t'_2 это такая температура, которая установилась на поверхности огневого листа с координатой $x = \delta_{непр}$ при изменении температуры только вдоль оси Oy (рис 1):

$$t_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2},$$

где:

$$t'_2 = t_4(\psi_1) + \frac{q \cdot s}{2 \cdot L \cdot \lambda} \left[b + \delta_3 + r_6 + \delta - \sqrt{(r_6 + \delta)^2 - \delta_{непр}^2} \right]$$

$$t''_2 = t_4(\psi_1 + \psi_2) + \frac{q \cdot s}{2 \cdot L \cdot \lambda} \cdot \left(b + \delta_3 + r_6 + \delta - \sqrt{(r_6 + \delta)^2 - (\delta_{непр} + L)^2} \right)$$

Участки t_1 и t_3 (рис 1), рассматриваются как стержень, температура которого меняется только по его длине и постоянна по толщине в каждом сечении.

Распределение температуры по длине огневого листа описывается следующими уравнениями:

$$t_1 = -\frac{q \cdot x^2}{2 \cdot \lambda \cdot b} + C_7 \cdot x + C_8; \quad t_3 = -\frac{q \cdot x^2}{2 \cdot \lambda \cdot b} + C_9 \cdot x + C_{10}$$

где:

$$C_7 = \frac{q \cdot (s/2 - \delta_{непр})}{\lambda \cdot b}; \quad C_8 = t_2 + \frac{q \cdot L}{\lambda \cdot b} \cdot \left[\frac{L}{2} - \frac{s}{2} + \delta_{непр} \right]; \quad C_9 = -\frac{q \cdot \delta_{непр}}{\lambda \cdot b}; \quad C_{10} = t_2$$

Для решения задачи определения температурного поля огневого листа численным методом использовался метод конечных элементов реализованный с помощью программы Ansys 8.0. Размер элемента составлял 0,5 x 0,5 мм. Определялось распределение температуры в направлении перпендикулярном оси трубы. Считалось, что толщина шва, листа и трубы неизменна по длине.

Для сравнения методик с экспериментом были осуществлены замеры температур в нескольких точках огневого листа, а также измерен тепловой поток и температура среды.

Для удобства сравнения расчет был произведен при одних и тех же данных. Результаты для наглядности представлены на рис. 2 и рис. 3. где значения для численного метода определялись как средняя величина по толщине элемента.

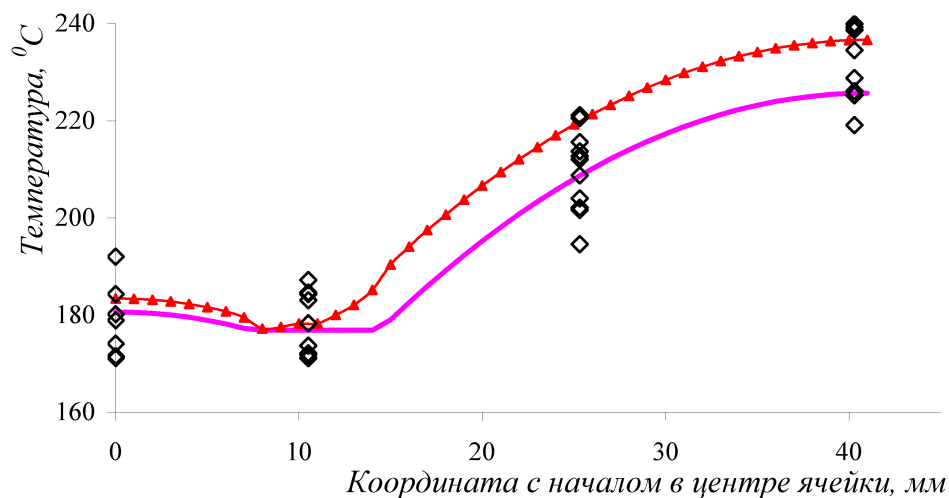


Рис. 2. Сравнение методик расчета температур поверхности огневого листа с экспериментом

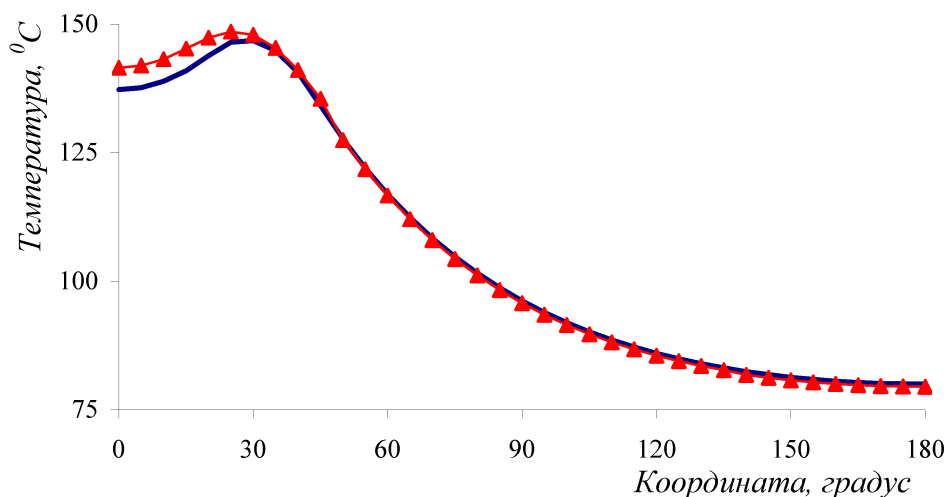


Рис. 3. Сравнение методик расчета температурного поля трубы

Таким образом, представленная в работе методика определения температурного поля для огневого листа имеет удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными и численным методом. Это дает возможность использовать ее для расчета температурных полей и термических напряжений, возникающих в конструкции при ее эксплуатации для исключения перегрева и коробления; рассчитывать оптимальные геометрические характеристики экрана для снижения металлоемкости котлов-утилизаторов.

Используемые обозначения

$a = s/2 - L - \delta_{непр}$ - участок огневого листа, на котором осуществляется только подвод тепловой энергии

b – толщина листа, м (рис 1)

L – длина сварного шва, м (рис 1)

q – тепловой поток, падающий на огневой лист, Вт/м²

$r_в$ – внутренний радиус трубы, м (рис 1)

$r_н$ – наружный радиус трубы, м (рис 1)

s – шаг экрана, м (рис 1)

t_c – температура охлаждающей воды в трубах, °C

t_2 – температура газов с внешней стороны огневого листа.

α – коэффициент теплоотдачи к воде, Вт/м²К

δ – толщина стенки трубы, м (рис 1)

$\delta_з$ – величина зазора между листом и трубой, мм (рис 1)

$\delta_{непр}$ – длина неповаренного участка, м (рис 1)

λ – коэффициент теплопроводности металла трубы и листа, Вт/м К (рис 1)