

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОГНЕВОГО ЛИСТА КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

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.

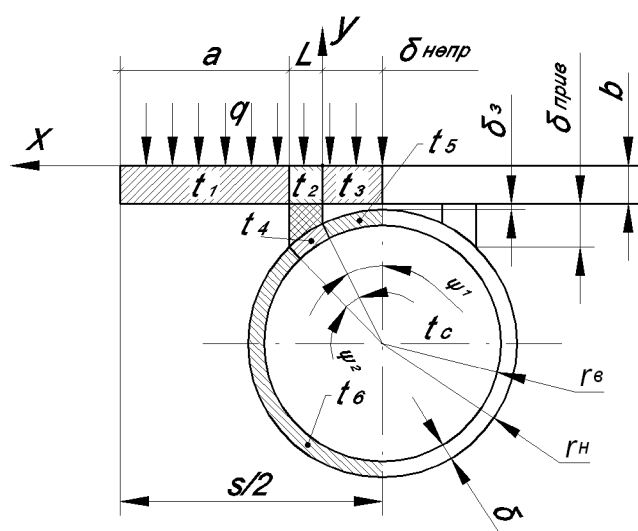


Рис. 1. Профиль огневого листа и приваренных к нему труб. Расчетная схема приварки трубы к огневому листу.

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

Рассмотрим аналитическую методику расчета.

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  $\lambda$  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  $\alpha$  (граничные условия III рода).

Температуры участков трубы определяются следующим образом:

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

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

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

где:

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

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

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

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

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

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

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

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):

$$t_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2}, \quad \text{где:}$$

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

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

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:

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

$$C_9 = -\frac{q \cdot \delta_{непр}}{\lambda \cdot b}; \quad C_{10} = t_2$$

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 сравнения методик расчета температурного поля с экспериментом использовались аналитическая методика представленная в работе, численный метод, а также методики описанные в [1] и [2]

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.

Наименьшее расхождение наблюдается у аналитического метода, основанного на граничных условиях II рода.

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.

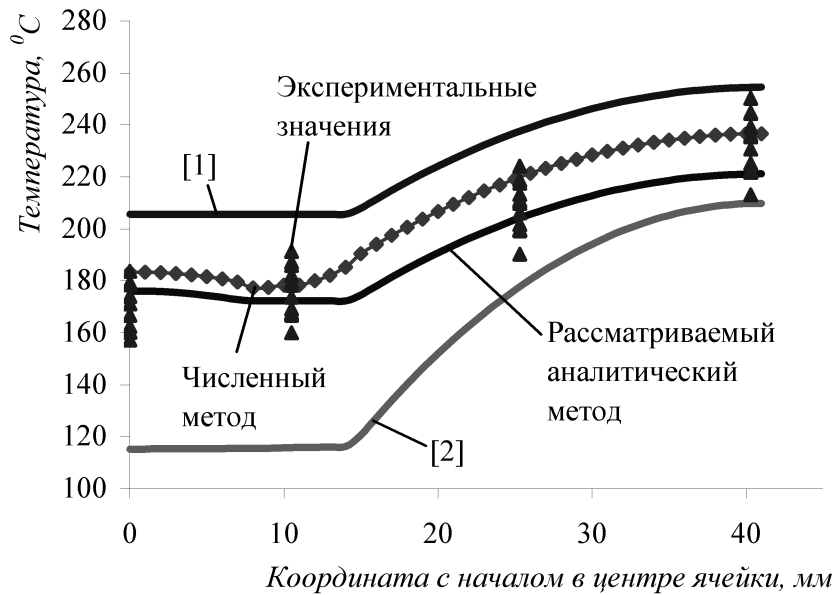


Рис. 2. Сравнение методик расчета температур поверхности огневого листа с экспериментом

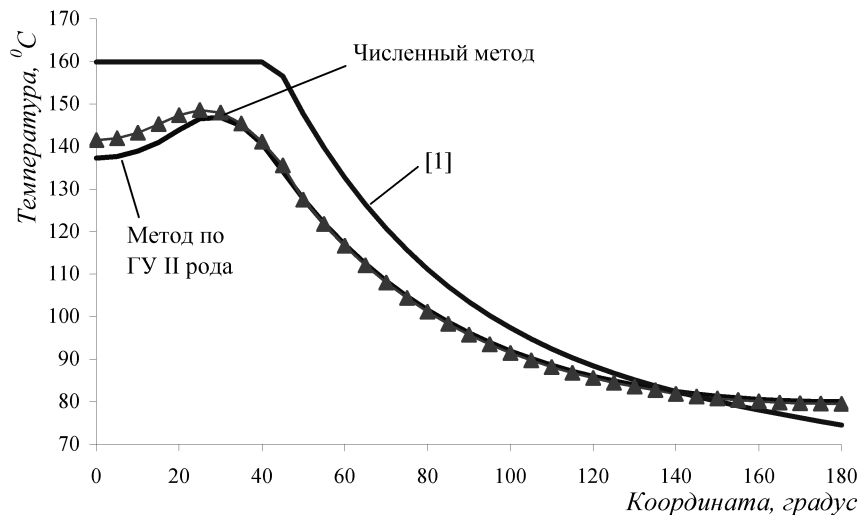


Рис. 3. Сравнение методик расчета температурного поля трубы

### Список обозначений

$a = \frac{s}{2} - L - \delta_{непр}$  - 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/м<sup>2</sup>

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

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

$s$  – шаг экрана, м (рис 1)

$t_c$  – температура охлаждающей воды в трубах, °С

$t_2$  – температура газов с внешней стороны огневого листа.

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи к воде, Вт/м<sup>2</sup>К

$\delta$  – толщина стенки трубы, м (рис 1)

$\delta_3$  – величина зазора между листом и трубой, мм (рис 1)

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

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

### ***Список литературы***

1. Баскаков А.П., Ильина Е.В. Распределение температур по ширине огневого листа (экрана) с приваренными снаружи трубами // Промышленная энергетика, 2002, №3, с.41-45.
2. Гальперин Л.Г., Мунц В.А., Стёпин С.М., Гладышев А.Н., Добрынин В.В., Плишнин Д.Ю., Владимиров В.В. Расчет температурных полей в мембранных экранных поверхностях нагрева котлов-утилизаторов // Вестник УГТУ-УПИ №3 (33). Теплоэнергетика. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. С. 40-46