

# ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ГАЗОПЛОТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА (ОГНЕВОГО ЛИСТА) КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ.

С.М. Стёпин, В.А. Мунц

## Аннотация

В работе представлена методика расчета температурного поля огневого листа используемого в котлах-утилизаторах производства ОАО «Уралэнергоцветмет». Методика основана на граничных условиях II рода со стороны газового потока, что позволяет применять ее для расчета температуры экранов топки. Методика позволяет с точностью менее 10% определить температуру в любой точке рассматриваемой конструкции. Проведено ее сравнение с методиками, имеющимися в литературе, с численным методом и с экспериментальными данными.

## 1. Введение

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 огневого 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.

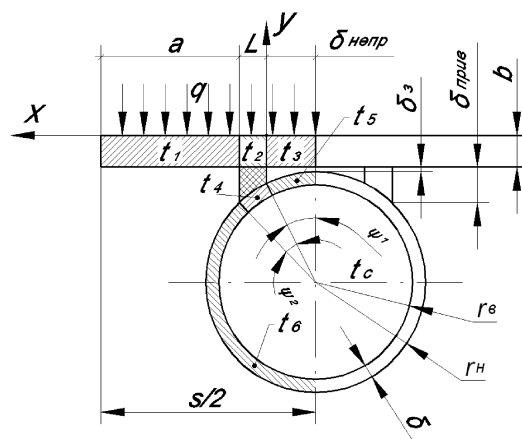


Рис. 1. Профиль огневого листа и приваренных к нему труб. Расчетная схема приварки трубы к огневому листу.

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

## 2. Аналитическая методика расчета температурного поля огневого листа

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).

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

$$\begin{cases} \frac{1}{r_6^2} \cdot \frac{d^2 t_4(\psi)}{d\psi^2} - \frac{\alpha \cdot [t_4(\psi) - t_c]}{\lambda \cdot \delta} + \frac{q_2}{\lambda \cdot \delta} = 0 \\ \frac{1}{r_6^2} \cdot \frac{d^2 t_5(\psi)}{d\psi^2} - \frac{\alpha \cdot [t_5(\psi) - t_c]}{\lambda \cdot \delta} = 0 \\ \frac{1}{r_6^2} \cdot \frac{d^2 t_6(\psi)}{d\psi^2} - \frac{\alpha \cdot [t_6(\psi) - t_c]}{\lambda \cdot \delta} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Решением системы (1) являются следующие уравнения:

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

$$t_5 = e^{m \cdot (\psi - \psi_1)} \cdot C_4 + e^{-m \cdot (\psi - \psi_1)} \cdot C_3 + t_c \quad (3),$$

$$t_6 = e^{m \cdot (\psi - \psi_1)} \cdot C_2 + e^{-m \cdot (\psi - \psi_1)} \cdot C_1 + t_c \quad (4),$$

Исходя из граничных условий

$$\psi = -\psi_1, dt_5(\psi) = 0; \quad \psi = \pi - \psi_1, dt_6(\psi) = 0;$$

$$\psi = 0, t_4 = t_5, dt_4 = dt_5; \quad \psi = \psi_2, t_4 = t_6, dt_4 = dt_6;$$

определяем постоянные интегрирования

$$C_1 = \frac{q s e^{m(\pi - \psi_1)} [\sinh\langle m(\psi_1 + \psi_2) \rangle] - \sinh\langle m\psi_1 \rangle]}{4 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sinh(m \cdot \pi)} \quad (5);$$

$$C_2 = \frac{q s e^{-m(\pi - \psi_1)} [\sinh\langle m(\psi_1 + \psi_2) \rangle] - \sinh\langle m\psi_1 \rangle]}{4 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sinh(m \cdot \pi)} \quad (6);$$

$$C_3 = \frac{q s e^{-m\psi_1} [\sinh\langle m(\pi - \psi_1) \rangle] - \sinh\langle m(\pi - \psi_1 - \psi_2) \rangle]}{4 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sinh(m \cdot \pi)} \quad (7);$$

$$C_4 = \frac{qse^{m \cdot \psi_1} [\sinh\langle m(\pi - \psi_1) \rangle - \sinh\langle m(\pi - \psi_1 - \psi_2) \rangle]}{4 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sinh(m \cdot \pi)} \quad (8);$$

$$C_5 = -\frac{qs \left[ e^{m(\pi - 2\psi_1 - \psi_2)} - e^{m(\pi - 2\psi_1)} + e^{m\pi} - e^{m(\psi_2 - \pi)} \right]}{8 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sinh(m \cdot \pi)} \quad (9);$$

$$C_6 = \frac{qs \left[ e^{m(2\psi_1 + \psi_2 - \pi)} - e^{m(2\psi_1 - \pi)} + e^{-m\pi} - e^{m(\pi - \psi_2)} \right]}{8 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sinh(m \cdot \pi)} \quad (10);$$

где:  $m = r_6 \sqrt{\frac{\alpha_2}{\lambda \cdot \delta}}$

Таким образом, температурное поле трубы в конструкции огневого листа (рис 1) определяется из уравнений (2) – (4) с подстановкой в них постоянных интегрирования (5) – (10).

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). Распределение вдоль оси  $Ox$  отсутствует. При уже известном значении  $t_4(\psi_1)$ ,  $t'_2$  определяется из следующей формулы выведенной на основании закона Фурье  $\frac{q \cdot s}{2 \cdot L} = \frac{\lambda}{\delta'} \cdot [t'_2 - t_4(\psi_1)]$ :

$$t'_2 = t_4(\psi_1) + \frac{q \cdot s \cdot \delta'}{2 \cdot L \cdot \lambda} \quad (11).$$

где  $\delta' = b + \delta_3 + r_6 + \delta - \sqrt{(r_6 + \delta)^2 - \delta_{непр}^2}$

Температура  $t''_2$  определяется аналогично  $t'_2$ , только при координате  $x = L + \delta_{непр}$ . Формула для расчета  $t''_2$ :

$$t''_2 = t_4(\psi_1 + \psi_2) + \frac{q \cdot s}{2 \cdot L \cdot \lambda} \times \left\langle b + \delta_3 + r_6 + \delta - \sqrt{(r_6 + \delta)^2 - (\delta_{непр} + L)^2} \right\rangle \quad (12).$$

Таким образом, температура  $t_2$  определяется как среднее величин, рассчитанных по формулам (11) и (12):

$$t_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2} \quad (13)$$

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 дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d^2 t_1}{dx^2} + \frac{q}{\lambda \cdot b} = 0 \quad \text{для участка } t_1 \quad (14),$$

$$\frac{d^2 t_3}{dx^2} + \frac{q}{\lambda \cdot b} = 0 \text{ для участка } t_2 \quad (15).$$

Решение уравнений (14) и (15):

$$t_1 = -\frac{q \cdot x^2}{2 \cdot \lambda \cdot b} + C_7 \cdot x + C_8 \quad (16)$$

$$t_3 = -\frac{q \cdot x^2}{2 \cdot \lambda \cdot b} + C_9 \cdot x + C_{10} \quad (17)$$

Постоянные интегрирования рассчитываем исходя из граничных условий.

$$x = \frac{s}{2} - \delta_{непр}, dt_1(x) = 0; x = -\delta_{непр}, dt_3(x) = 0; t_1(L) = t_2 \text{ и } t_3(0) = t_2.$$

При подстановке граничных условий в уравнения (16) и (17) определяются постоянные интегрирования

$$C_7 = \frac{q \cdot \left(\frac{s}{2} - \delta_{непр}\right)}{\lambda \cdot b} \quad (18);$$

$$C_8 = t_2 + \frac{q \cdot L}{\lambda \cdot b} \cdot \left[ \frac{L}{2} - \frac{s}{2} + \delta_{непр} \right] \quad (19);$$

$$C_9 = -\frac{q \cdot \delta_{непр}}{\lambda \cdot b} \quad (20);$$

$$C_{10} = t_2 \quad (21);$$

Таким образом, температурное поле непосредственно самого листа в конструкции (рис 1) определяется из уравнений (13), (16) и (17) с подстановкой в них постоянных интегрирования (18) – (21).

### 3. Численный метод

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.

### 4. Сравнение методик расчета температурного поля

Для сравнения 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.

Расхождение рассматриваемых аналитических методов относительно численного представлены в табл. 1.

Таблица 1. Средние расхождения аналитических методов с численным

Метод	для листа, %	для трубы, %
Метод, описанный в работе	4,37	0,13
Метод [1]	10,05	7,53
Метод [2]	25,22	-

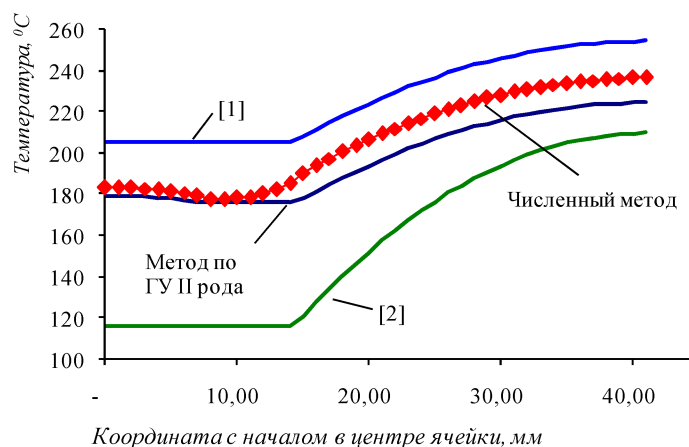


Рис. 2. Сравнение методик расчета температур поверхности огневого листа

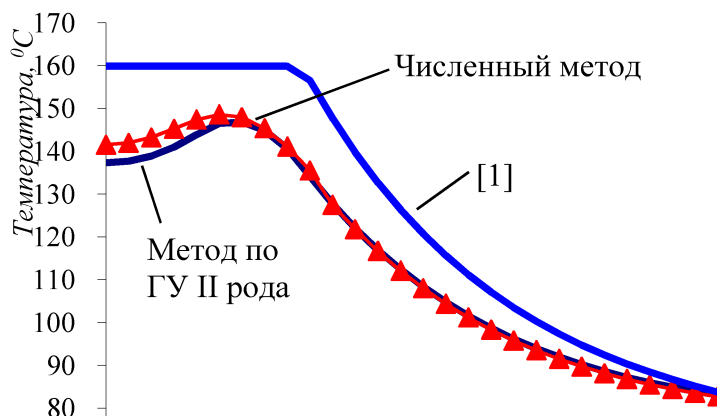


Рис. 3. Сравнение методик расчета температурного поля трубы

Наименьшее расхождение на основании табл. 1. у аналитического метода, основанного на граничных условиях II рода.

Причины расхождения:

Для аналитического метода, описанного в работе (по граничным условиям II рода) причины две. Первая заключается в одномерности задачи (распределение температуры только по длине). Решение задачи численным методом показало, что распределение температуры по ширине листа в некоторых точках достигает  $10^{\circ}\text{C}$ , а для большей части трубы перепад составляет не более  $1^{\circ}\text{C}$ . Вторая причина заключается в усреднении температуры участка  $t_2$  (рис.1.). Но не смотря на это наблюдается качественное совпадение предлагаемой методики с численным методом (рис. 2, и 3).

### 5. Эксперимент. Описание и результаты.

Для сравнения методик с экспериментом было необходимо произвести замеры температур в нескольких точках огневого листа, а также измерить тепловой поток и



Таблица 2. Результаты эксперимента, погрешность эксперимента. Расчетные значения температур. Отклонения расчетных значений от экспериментальных.

Координата точки замера (рис. 1)	40,3	25,3	10,5	0	40,3	25,3	10,5	0	40,3	25,3	10,5	0
	<i>1</i>				<i>2</i>				<i>3</i>			
Экспериментальные данные, °С	183,5	164,1	150,0	143,9	193,8	173,3	155,5	148,5	202,5	180,5	160,5	153,5
Погрешность измерения, %	1,4	1,6	1,8	1,8	1,4	1,5	1,7	1,8	1,3	1,5	1,6	1,7
Аналитический метод по ГУ II рода, °С	166,8	153,9	143,1	139,2	182,5	167,5	154,9	150,3	195,4	178,6	164,5	159,4
Отклонение от эксперимента, %	9,1	6,2	4,6	3,3	5,8	3,4	0,4	1,2	3,5	1,1	2,5	3,9
Численный метод, °С	172,0	161,3	151,2	144,2	188,6	176,0	164,1	155,9	202,2	188,0	174,7	165,5
Отклонение численного метода от эксперимента, %	6,3	1,8	0,8	0,2	2,7	1,5	5,5	5,0	0,2	4,2	8,8	7,8
	<i>4</i>				<i>5</i>				<i>6</i>			
Экспериментальные данные, °С	216,1	191	170,5	162,5	220,44	194,5	173,5	165	221,5	195,5	173,5	165,5
Погрешность измерения, %	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,5	1,6
Аналитический метод по ГУ II рода, °С	201,5	183,1	166,9	160,9	209,0	189,5	172,4	166,1	209,5	189,9	172,7	166,4
Отклонение от эксперимента, %	6,8	4,2	2,1	1,0	5,2	2,6	0,7	0,7	5,4	2,9	0,5	0,5
Численный метод, °С	208,7	192,7	178,0	167,6	214,5	197,5	181,9	170,9	217,1	200,1	184,4	173,3
Отклонение численного метода от эксперимента, %	3,4	0,9	4,4	3,1	2,7	1,6	4,9	3,6	2,0	2,3	6,3	4,7

## б. заключение

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.

## Список обозначений

$\psi_1 = \arcsin \frac{\delta_{непр}}{r_в + \delta}$  - угол отклонения начала сварного шва от оси симметрии трубы (рис 1)

$\psi_2 = \arcsin \frac{\delta_{непр} + L}{r_в + \delta} - \psi_1$  - угол создаваемый сварным швом (рис 1)

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

$r_в$  – 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, °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)

$TE$  – первичный измерительный преобразователь (термопара КТХА)

$TI$  – прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту (ртутный термометр, прибор «Овен» УКТ38-Щ4 ТП)

$TCSA^H$  – реле для отключения печи по превышению температуры

$TU^{E/E}$  – преобразователь сигнала для передачи на ПК

$TU^{Bi}$  – преобразование сигнала в ПК и вывод результатов на экран

$FI$  – счетчик горячей воды (совместно с секундомером – расходомер)

### **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., Плишин 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
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник . Под общ. ред. чл. – корр РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ. 2001 – 564 с