

УДК 536.24

## ОСОБЕННОСТИ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ВИНТОВОЙ ЗМЕЕВИКОВОЙ ТОПКЕ ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОВОГО КОТЛА

*А.И. Щелоков, И.В. Макаров, Ю.И. Рахимова*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** Рассматриваются особенности сложного теплообмена в винтовых змеевиковых поверхностях нагрева промышленного прямоточного парового котла. Для уточнения конструктивных характеристик, обеспечивающих интенсификацию, проведен анализ факторов, существенно влияющих на технические характеристики котла. Отмечено, что значительный вклад в интенсификацию сложного теплообмена вносят такие факторы, как сплошная шероховатость поверхностей нагрева, турбулизация потока продуктов сгорания за счет аэродинамического диафрагмирования течения плотно сжатыми витками змеевика, кривизны поверхности нагрева, что ведет к повышению промышленной безопасности устройства. Эти факторы приводят к снижению габаритов и массы котла по сравнению с трехходовыми паровыми котлами классической конфигурации.

**Ключевые слова:** прямоточный паровой котел, интенсификация, теплообмен, сплошная шероховатость поверхности нагрева, плотно сжатые витки змеевика.

В последнее время для технологического теплоснабжения производственных объектов, работающих с переменной или прерывистой нагрузкой, когда невыгодно иметь паровые котлы в горячем резерве или требуются частые технологические остановы и пуски, все большее применение находят прямоточные паровые котлы малой мощности. Прямоточные паровые котлы устанавливаются в непосредственной близости от потребителя, что позволяет свести к минимуму тепловые потери при транспорте пара. В качестве топлива используется природный газ или жидкое топливо. Разновидностью таких устройств являются трехходовые прямоточные паровые котлы водотрубного типа, в которых поверхности нагрева выполнены в виде плотно сжатых винтовых змеевиков (топка, конвективные поверхности) [1]. Такое выполнение котла вносит существенные коррективы в организацию теплообмена и выбор способа сжигания газового топлива, а также появляется возможность расширения функционального назначения отдельных элементов парового котла и обеспечения повышенной безопасности.

Прямоточные паровые котлы относятся к группе котлов, работающих с принудительной циркуляцией, поэтому для обеспечения нормального функционирования необходимо уточнение влияния режимных и конструктивных характеристик, а именно, по пароводяному тракту соответствие в единицу времени подвода тепла к поверхности нагрева тому количеству, которое необходимо за тот же

---

*Щелоков Анатолий Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика».*

*Макаров Иван Владимирович, ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика».*

*Рахимова Юлия Игоревна (к.п.н.), доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика».*

промежуток времени для подогрева питательной воды до температуры на несколько градусов ниже температуры кипения, с последующим ее кипением и испарением в испарительной поверхности.

Для уточнения конструктивных характеристик парового котла необходимо установить роль и эффективность вкладов каждого механизма передачи тепла в процесс парообразования в топке, предварительного подогрева воды в конвективных газоходах [2].

В общем случае для описания процессов горения и теплообмена в топочных устройствах используется громоздкая система уравнений, описывающих комплекс взаимозависимых явлений.

Для упрощения задачи воспользуемся уравнениями теплового баланса топки и суммарного теплообмена:

$$Q = \varphi \cdot (Q_{HP} - I''_{HC}) ; \quad (1)$$

$$Q = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{red} \cdot \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{AT}}{100} \right)^4 \right] \cdot H_{sen} + \alpha_{con} \cdot (T_g - T_g'') \cdot F, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сохранения тепла;

$Q_{HP}$  – полезное тепловыделение в топке, кДж/м<sup>3</sup>;

$I''_{HC}$  – теплосодержание продуктов сгорания на выходе из топки при температуре  $\mathcal{G}''$ , кДж/м<sup>3</sup>;

$Q$  – суммарное количество переданного в топке тепла, кДж/м<sup>3</sup>;

$\alpha_{con}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м·К;

$T_g$  – средняя температура газов в топке, К;

$T_g''$  – средняя температура газов на выходе из топки, К;

$F$  – полная поверхность нагрева, м<sup>2</sup>;

$\sigma_0$  – постоянная излучения абсолютно черного тела;

$H_{sen}$  – эффективная лучевоспринимающая поверхность нагрева, м<sup>2</sup>;

$T_{AT}$  – средняя температура тепловоспринимающей поверхности, К;

$\varepsilon_{red}$  – приведенная степень черноты системы.

Если первое выражение показывает суммарное количество тепла от всех проявляемых механизмов внешнего теплообмена, то второе показывает вклад каждого из них, т. е. излучения и конвекции.

В трехходовых жаротрубных котлах в высокотемпературной зоне дымового тракта (топка, поворотная камера) воспринимается нагреваемой средой почти половина всего тепла, получаемого от сжигаемого топлива. Для котла тепловой мощностью 1,163 МВт примерное распределение поверхностей нагрева между топкой и конвективными газоходами находится в соотношении 1 : 3,7 (см. таблицу).

В этом случае возрастание конвективной поверхности вызвано главным образом двумя факторами:

- уменьшением температурного напора продуктов сгорания ( $\Delta T$ );
- сменой механизма передачи тепла (тепловое излучение сменяется конвекцией) [3].

Особенность конструкции топки промышленного парового прямоточного

котла с поверхностями нагрева из плотно сжатых винтовых змеевиков, представляющей замкнутый объем, приводит к увеличению коэффициента сохранения тепла ( $\varphi \approx 1,0$ ), возрастанию лучевоспринимающей поверхности  $H_{sen}$  (за счет кривизны трубы витков), степени черноты впадин между витками.

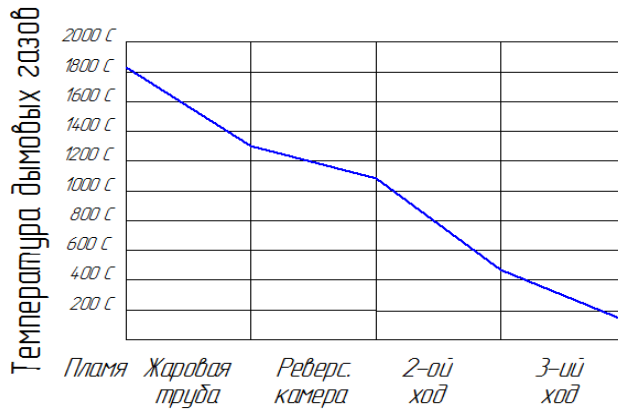


Рис. 1. Типовое распределение тепловой нагрузки по дымовому тракту парового жаротрубного котла

#### Распределение тепловой нагрузки по дымовому тракту парового жаротрубного котла

Компонент	Выходная температура, °C	Теплообмен, кВт	Нагреваемая поверхность	
			м <sup>2</sup>	%
Пламя	1836			
Жаровая труба	1278	405	5,0	34,9
Реверсивная камера	1121	134	1,5	11,6
2-й ход	475	444	11,0	38,3
3-й ход	192	177	13,0	15,25
Сумма		1160	30,5	100,06

Таким образом, количество тепла, переданное топке излучением, определится по формуле

$$Q_{rad} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{red} \cdot \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \cdot H_{sen}. \quad (3)$$

Из трех отмеченных факторов, вызывающих увеличение доли тепловой энергии, переданной излучением в винтовой топке, наибольшую роль играют конструктивные, такие как коэффициент сохранения тепла, увеличение лучевоспринимающей поверхности за счет ее кривизны при плотном сжатии витков змеевиковой трубы, сплошного экранирования топочного пространства, когда степень экранирования  $\psi = 1$  [4].

Следовательно, из трех факторов, приведенных выше, наиболее существенны для топки из плотно сжатых витков винтового змеевика два – увеличение коэффициента сохранения тепла и возрастание лучевоспринимающей поверхности топки за счет кривизны, создаваемой сжатыми витками, – на той же длине гладкой жаровой трубы нагреваемая поверхность возрастает в 1,57 раза. Повышение

степени черноты межвитковых впадин оказывает меньшее влияние, и им можно пренебречь.

Работа топки из плотно сжатых витков винтового змеевика под наддувом позволяет интенсифицировать конвективный теплообмен в несколько раз по сравнению с гладкой трубой. Это обеспечивается турбулизацией потока продуктов сгорания путем пульсирующего вдува газа в воздушный поток в случае применения газовых горелок типа ГСАУ.

Такое увеличение суммарного теплосъема с одного квадратного метра поверхности теплообмена позволяет в среднем снизить температуру уходящих дымовых газов на выходе из топки до 950–960 °С.

Таким образом, с учетом поправки тепловой поток излучением согласно (3) составит

$$q_{rad} = \sigma_0 \cdot \varepsilon'_{red} \left[ \left( \frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{AT}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где

$$\varepsilon'_{red} = \frac{\varepsilon_g \cdot \varepsilon_p}{\varepsilon_g + \varepsilon_p - \varepsilon_g \cdot \varepsilon_p}. \quad (5)$$

С другой стороны, количество тепла, переданного от факела лучевоспринимающей поверхности, пропорционально величине этой поверхности, которая представляет собой цилиндрический канал из плотно сжатых витков змеевика.

Для гладкой жаровой трубы длина топки определяется по принятой величине теплового напряжения топочного объема. При той же длине топки выполнение ее из витков плотно сжатого змеевика дает возможность увеличить поверхность нагрева в  $\frac{\pi}{2}$  раза.

Так как топка прямоточного котла представляет собой замкнутый объем, охлаждаемой водой, то степень экранирования топки  $\psi$  будет иметь максимальное значение  $-\psi \approx 1,0$ , т. е.  $N_{sen} \approx F_{at}$ .

Для сравнения, конвективные поверхности промышленных котлов дымогарного типа выполняются из труб, в которых движутся продукты сгорания. Продольное обтекание поверхности нагрева не дает высоких коэффициентов теплоотдачи, но, с другой стороны, имеет место меньшее гидравлическое сопротивление. Конструктивное исполнение такого котла позволяет разместить пучки труб в рабочем водяном объеме котла. Современные жаротрубные котлы, работающие под наддувом, обеспечивают необходимый теплосъем за счет развития поверхности нагрева, главным образом за счет увеличения длины дымогарных труб и их числа, а также турбулентного режима движения дымовых газов.

Для наиболее характерных стационарных случаев конвективного теплообмена уравнение подобия для коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении имеет вид [4]

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (6)$$

Комбинация критериев  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$  может быть представлена в виде числа Стентона [2]:

$$St = Nu/(Re.Pr) = f( Re, k_s/D, Pr). \quad (7)$$

Таким образом, для оценки эффективности конвективного теплообмена в шероховатом канале необходимо экспериментально определить коэффициент аэродинамического сопротивления трению.

В переходной области критерий Рейнольдса  $Re_{num} < Re < 5 \cdot 10^4$ , течение является неустойчивым и любое, даже малое возмущение приводит к возникновению турбулентного режима.

При конвективном теплообмене газообразных теплоносителей со стенкой критерий Прандтля менее единицы – в продуктах сгорания природного газа в зависимости от их температуры критерий Прандтля  $Pr$  с ростом температуры газов падает от 0,72 при  $t = 0$  °С до 0,534 при  $t = 1600$  °С. Такое значительное изменение критерия Прандтля  $Pr$  может иметь место в топках котлов, огневых подогревателях жидкостей, работающих на газовом или жидком топливе.

Проанализируем влияние комплекса факторов на теплообмен в шероховатой трубе при турбулентном движении продуктов сгорания.

Для гладких труб критериальное уравнение теплообмена имеет вид [4]

$$Nu = 0,021 \cdot Re_w^{0,8} \cdot Pr_w^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{rf}}{Pr_{rw}} \right)^{0,25} \cdot \lambda_{rough} \quad (8)$$

(подстрочные индексы  $f$  и  $w$  относятся соответственно к потоку и поверхности трубы), где  $\lambda_{rough}$  – поправка на шероховатость шероховатой трубы.

На интенсивность конвективного теплообмена влияет размер вихрей, зависящий от высоты выступа.

Цилиндрический канал, образованный плотно сжатыми змеевиками из стальной трубы, представляет собой канал со сплошной шероховатостью, при которой увеличение теплообмена происходит за счет развития поверхности. При сплошной шероховатости сохраняется безотрывное движение потока, а развитие вихреобразование отсутствует.

При турбулентном режиме движения газов в гладких трубах коэффициент сопротивления трению определяется по закону Блазиуса [4]:

$$\xi_{st} = 0,3164 / Re^{0,25}, \quad (9)$$

где величина  $\xi_{st}$  зависит от критерия Рейнольдса ( $Re > 10^5$ ), при сплошной шероховатости гидравлическое сопротивление снижается.

Метод приближенного расчета теплоотдачи на основе гидравлической теории не связан с решением дифференциальных уравнений, что значительно упрощает решение прикладных технических задач с достаточной точностью.

Теплоотдача в прямых гладких трубах описывается выражением

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (10)$$

Формула (10) применима в диапазоне области критериев  $Re = (4 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^6)$ ,  $Pr = (0,5 \div 5 \cdot 10^3)$  при постоянных свойствах теплоносителя.

Предположим, что при переходе от гладких труб к шероховатым при прочих равных условиях изменение числа Нуссельта зависит только от состояния поверхности нагрева.

Запишем выражения для определения критерия Нуссельта для гладких

и шероховатых труб:

$$Nu_{st} = \frac{\xi_{st}}{8} \cdot \frac{Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12.7 \cdot (Pr^{2/3} - 1) \sqrt{\frac{\xi_{st}}{8}}}; \quad (11)$$

$$Nu_r = \frac{\xi_r}{8} \cdot \frac{Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12.7 \cdot (Pr^{2/3} - 1) \sqrt{\frac{\xi_r}{8}}}. \quad (12)$$

Согласно основным теоретическим положениям  $Nu_r > Nu_{st}$ . Поделим второе выражение на первое и, произведя некоторую перегруппировку членов, получим выражение вида

$$\frac{Nu_r}{Nu_{st}} = \frac{\xi_r}{\xi_{st}} \cdot \frac{A + B \sqrt{\xi_r}}{A + B \sqrt{\xi_{st}}}, \quad (13)$$

где  $A = (1 + 900/Re)$ ,  $B = 12.7(Pr^* - 1)$ .

Для турбулентного потока  $A > 1,0$ , а для продуктов сгорания природного газа  $B < 0$ , таким образом, комплекс  $\frac{A + B \sqrt{\xi_{st}}}{A + B \sqrt{\xi_r}}$  всегда больше единицы, т. е. число

Нуссельта  $Nu$  для шероховатого канала больше, чем для гладкого.

Комплекс  $A$  определяется режимом движения потока и физическими свойствами теплоносителя, комплекс  $B$  зависит от теплофизических свойств теплоносителя (теплоемкости, плотности, теплопроводности), т. е. свойств, определяющихся температурой потока.

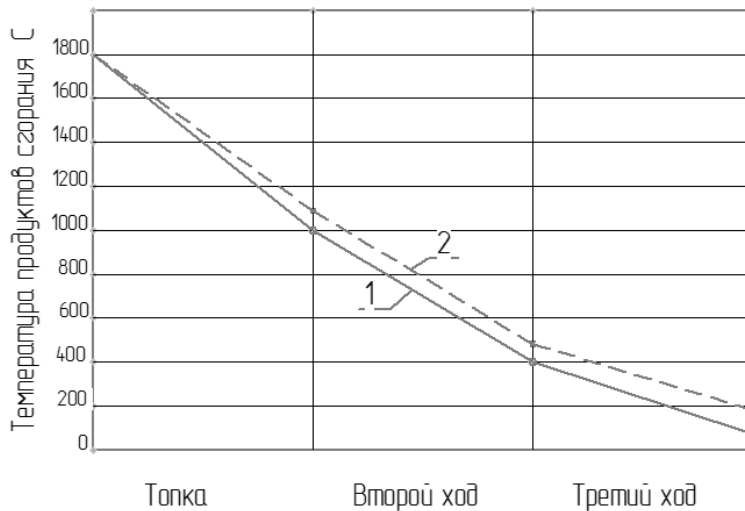


Рис. 2. Изменение температуры продуктов сгорания вдоль дымового тракта:  
1 — прямоточный котел; 2 — жаротрубный котел

Таким образом, выявлено влияние шероховатости канала на конвективный теплообмен, численное значение которого определяется коэффициентом гидрав-

лического трения, полученным опытным путем.

Для измерения температуры продуктов сгорания на выходе из топок, а также на входе и выходе из второго и третьего ходов использовалась водоохлаждаемая хромель-алюмелевая термопара. Измеренные в процессе тепловых испытаний температуры газов сравнивались с результатами теплового расчета трехходового жаротрубного парового котла, выполненного по рекомендованным методикам [5].

Как показали сравнительные испытания, имеются существенные различия в распределении температуры продуктов сгорания в сходственных сечениях котлов. Температура продуктов сгорания на выходе из топки прямоточного котла на 35–50 °С ниже, чем у жаротрубного, после второго хода на 30–40 °С, что обеспечило снижение температуры уходящих газов до величин, близких к рекомендованным для котлов, работающих на природном газе (120 °С) (рис. 2).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2515877 РФ Промышленный прямоточный парогенератор / Щелоков А.И., Шульц Л.Г., Жирнов А.Л.; заявитель и патентообладатель Самар. гос. техн. ун-т. – 20.05.2014.
2. *Бадагуев Б.Т.* Паровые и водогрейные котлы. Безопасность при эксплуатации. Приказы, инструкции, журналы, положения. – М.: Альфа-пресс, 2010. – 200 с.
3. *Гуляев В.* Теплотехника. – М.: Профессия, 2009. – 352 с.
4. Теплотехнический справочник: Учеб. пособие для вузов: в 2 т. Т. 1 // Под общ. ред. С.Г. Герасимова и др. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 728 с.
5. Патент 2059928 РФ Газогорелочная система / Щелоков А.И., Богомолов В.А.; заявитель и патентообладатель Самарский политехнический институт им. В.В. Куйбышева. – 10.05.1996.

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2018 г.*

## COMPLEX HEAT EXCHANGE FEATURES IN ONCE-THROUGH STEAM GENERATOR'S SCREW-SHAPED FIREBOX

*A.I. Shchelokov, I.V. Makarov, Y.I. Rakhimova*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper deals with features of a complex heat exchange in screwshaped coil heating surfaces of once-through steam generator. To clarify design characteristics that provide mg augmentation, investigation of factors that affect boiler's technical characteristics is carried out. It should be pointed out, that a great contribution to mg augmentation of complex heat exchange is caused by imperforated heating surface roughnesses, heating surface curvature, creating flow turbulence of the combustion gases based on aerodynamic flow orificing by impacted laps of coil. That leads to increasing of industrial safety and reduction of boiler's gabarit and weight in comparison with triple-pass boilers.*

**Keywords:** *once-through steam generator, mg augmentation, heat exchange, imperforated. heating surface roughnesses, impacted laps of coil.*

---

*Annatoly I. Shchelokov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

*Ivan V. Makarov, Assistant.*

*Yuliya I. Rakhimova (Ph.D. (Pedag.)), Associate Professor.*