

УДК 536.24:697.32

ДЕМЧЕНКО В.Г., СЕРЕБРЯНСКИЙ Д.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТОПОЧНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАБОТЕ КОТЛОВ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ

У роботі проведено аналіз ефективності вживання вторинних випромінювачів різної конструкції для інтенсифікації топочною теплообміну в котлах малої потужності з тупиковою топкою, працюючих на дизельному паливі. Експериментальна перевірка ефективності роботи котла з вторинним випромінювачем виявила збільшення його ККД, зниження емісії, що обґрунтовує перспективність його використання.

В работе проведен анализ эффективности применения вторичных излучателей различной конструкции для интенсификации топочною теплообмена в котлах малой мощности с тупиковою топкой, работающих на дизельном топливе. Экспериментальная проверка эффективности работы котла с вторичным излучателем выявила увеличение его КПД, снижение эмиссии NO_x , что обуславливает перспективность его применения.

The analysis of efficiency of application of the second emitters of a different construction for intensification of fair heat exchange in the caldrons of small power with the blind-alley heating of working on a diesel fuel is conducted in work. Experimental verification of efficiency of work of caldrone with the second emitter exposed the increase of his, decline of emission, that perspective of his application.

a_{ij} – неизвестные коэффициенты;

D – диаметр;

L – длина;

q_0 – расход газового потока на выходе из котла;

r – радиус;

v – скорость;

α – коэффициент избытка воздуха.

Индексы:

жар – жаровая труба;

изл – излучатель.

Известно, что одним из наиболее доступных методов повышения эффективности котлов большой мощности и снижения вредных выбросов в атмосферу является метод снижения температуры процесса горения путём баластирования окислителя продуктами сгорания за счет рециркуляции дымовых газов, при этом рециркуляцию подразделяют на внешнюю и внутреннюю [1].

Внутренняя рециркуляция, как более простая, хорошо протекает в котлах с тупиковою топкой, где продукты реакции окисления возвращаются в корень факела горелки. Однако реализовать этот способ в котлах малой мощности проблематично в связи с “низкими” температурами внутри топочною пространства.

Известные европейские производители горелок реализуют данный способ за счет инъекции продуктов сгорания в огневую трубу горелки.

Этого также можно добиться путём установки вторичных излучателей в топку и рециркуляции дымовых газов в корень факела.

Нормативный метод расчёта котельных агрегатов даёт возможность обоснованно подобрать наиболее оптимальные характеристики топочною пространства и условия сжигания различных видов топлив, в том числе и с учётом использования топочных ширм как вторичных излучателей.

Большой вклад в развитие применения вторичных излучателей в котлы НИИСТУ, ПТВМ-30, КВГМ-20 внесли сотрудники институтов газа и технической теплофизики НАН Украины. Так, например, на котле ПТВМ-30 были установлены излучатели в виде 150 стержней, внешним диаметром 28 мм, длиной 750 мм. Площадь излучающей поверхности, в данном случае, составила 7% от площади радиационной поверхности котла. В результате было получено повышение КПД котла на 0,33...0,56%, а снижение оксидов азота NO_x составило 14...19% [2].

Однако вопрос влияния конструкции вторичных излучателей на аэродинамику дымовых газов в топочною пространстве, повышение КПД и

снижение вредных выбросов остаётся актуальной задачей и требует дальнейшего изучения.

Это обусловлено необходимостью поиска мало-затратных быстрокупаемых мероприятий, позволяющих производить модернизацию котлов, находящихся длительное время в эксплуатации, и создания принципов конструирования современных котлоагрегатов, в частности, дымогарных водогрейных котлов малой мощности, оборудованных атмосферными и вентиляторными горелками.

Указанные принципы заключаются в поддержании значения коэффициента избытка воздуха в горелке близком к стехиометрическому, равному 1, поддержании температуры факела свыше 1300 °С, максимальной интенсивности топочно-го тепломассопереноса, в частности, за счёт увеличения времени пребывания дымовых газов в топочном пространстве, активного тепломассообмена в конвективной части котла и пр.

Эти требования часто расходятся с техническими возможностями и тепло-экологическими результатами испытаний котлов малой мощности и поэтому требуют дополнительных исследований.

В частности, работа с низкими коэффициентами избытка воздуха приводит к образованию сажи и, как следствие, к ослаблению тепломассообмена за счёт золотых отложений. Поддержание высоких температур внутри топочного пространства часто приводит к необоснованному перерасходу топлива и снижению КПД, а увеличение времени пребывания дымовых газов в топке к образованию оксидов азота.

По нашему мнению, не достаточно исследовано влияние вторичных излучателей на работу котлов на дизельном топливе, что приводит к снижению вредных выбросов, в первую очередь NO_x . Оксиды азота, которые присутствуют в продуктах сгорания органического топлива, относятся к наиболее агрессивным окислам, которые образуют кислотные дожди, вредные фотохимические окислители и провоцируют природные явления с пагубными последствиями. Требования и нормы, предъявляемые к котельному оборудованию по уровню эмиссии NO_x , изложены в европейском стандарте EN 676:2000, в межгосударственном стандарте стран СНГ ГОСТ 30753-2001.

Экспериментальные исследования показали, что в процессе горения одновременно присутст-

вуют два основных механизма образования NO_x : “топливный”, являющийся результатом окисления азота, находящегося в топливе и протекающий при температуре свыше 1000 °С, и “термический”, протекающий при температуре свыше 1300 °С и являющийся результатом окисления азота, находящегося в воздухе [3-4].

Концентрация NO_x возрастает при увеличении температуры и времени пребывания продуктов сгорания в горячей зоне. При сжигании природного газа данный тип окислов по некоторым оценкам составляет 70...80% от общего количества NO_x , образованного в процессе горения.

Для исследования влияния вторичных излучателей, авторами был выбран отечественный котел Броварского завода коммунального оборудования Виктор -100 и проведены экспериментальные стендовые и промышленные испытания на дизельном топливе с вентиляторной горелкой RG 20 мощностью 120 кВт, производства фирмы Golling, Германия.

Котёл водогрейный, дымогарный, двухходовой, номинальной мощностью 100 кВт имеет тупиковую топку в виде жаровой трубы, омываемой котловой водой, поворотную камеру, образуемую фронтальной трубной доской и дверкой, футерованной легковесным огнеупором, и конвективный пучок дымогарных труб с турбулизаторами, омываемыми котловой водой.

В ходе проведения экспериментальных испытаний в топочную камеру ($L_{\text{жар}}/D_{\text{жар}}=2,5$; $S_{\text{жар}} = 1,33 \text{ м}^2$) поочередно устанавливались вторичные излучатели различных конструкций с различными площадями излучающей поверхности и поперечными сечениями. Излучатели конструктивно представляют собой цилиндрические трубы с направляющими лопастями, изготовленные из нержавеющей стали с $S_{\text{изл}}/S_{\text{жар}} = 0,65; 0,43; 0,21$ и $L_{\text{изл}}/D_{\text{изл}} = 2,75; 1,84; 0,9$ – соответственно.

Исследовалось влияние вторичного излучателя, изготовленного из проволочной сетки (с диаметром проволоки 4 мм) с размерами ячейки 20x40 мм, $L_{\text{сет}}/D_{\text{сет}} = 1,41$ (рис.1).

Следует отметить, что установка вторичных излучателей привела к изменению движения газовых потоков внутри котла, вследствие чего увеличилось его аэродинамическое сопротивление, что требует корректировки напора вентилятора при подборе горелочных устройств.



а



б

Рис. 1. Вторичные излучатели
 а – с различным отношением L/D ; б – сеточный излучатель.

Кроме того, в котле появился третий ход дымовых газов в кольцевом зазоре между наружной стенкой излучателя и внутренней стенкой топки котла.

Рассмотрим динамику потоков в этой области более подробно (рис.2).

На выходе из кольцевого канала продукты сгорания разделяются на два потока: один поступает в конвективный пучок, а второй возвращается в топку.

Поле скоростей в этой области можно принять осесимметричным, а форму средних траекторий частиц продуктов сгорания достаточно ограничить кривыми второго порядка. При допущении об эквидистантности траекторий каждый из двух разделенных потоков может быть описан однопараметрическим семейством линий тока:

$$a_{11}r^2 + 2a_{12}rz + a_{22}z^2 + 2a_{13}r + 2a_{23}z + a_{33} = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1) пять коэффициентов однозначно определяют кривую второго порядка (коническое сечение), а шестой коэффициент является параметром семейства траекторий. Линии тока, описываемые уравнением

$$\frac{dr}{dz} = \frac{vr}{vz}, \quad (2)$$

с учетом (1) имеют вид

$$\frac{dr}{dz} = \frac{a_{12}r + a_{22}z + a_{23}}{a_{11}r + a_{12}z + a_{13}}. \quad (3)$$

Распределение плотности газа представим тремя значениями ρ_1, ρ_2, ρ_3 , усредненными по трем областям:

- 1) на выходе кольцевого канала,
- 2) в пространстве между жаровой трубой и фронтальной трубной доской,
- 3) внутри трубного пучка.

Это позволяет упростить уравнение неразрывности. На выходе кольцевого канала оно запишется в виде:

$$\frac{vr}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия отражают отсутствие радиальной скорости на стенках и на линии раздела потоков:

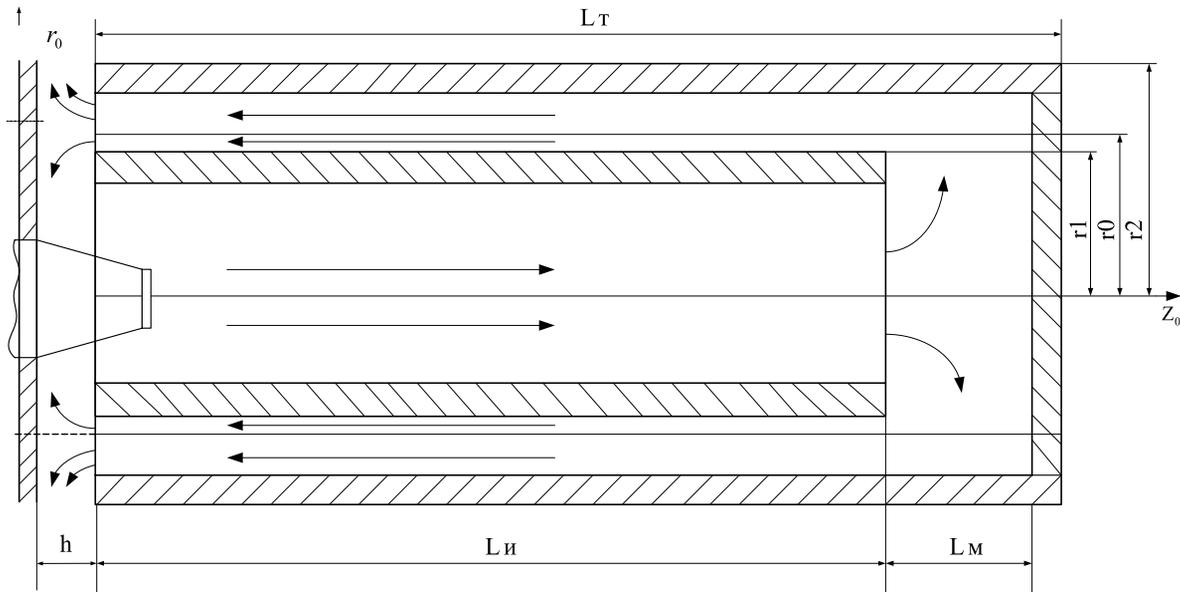


Рис. 2. Схема движения потоков.

$$v_r(r, z) = v_r(r_2, z) = v_r(r_0, z) = v_r(r, 0) = 0.$$

Введем некоторые предположения:

1. Радиальная скорость на оси при $z = z_0$ равна нулю, а осевая отлична от нуля, т.е.

$$v_r(r, z_0) = 0; \quad v_z(r, z_0) \neq 0.$$

2. В точке бифуркации (r, z_0) отношение v_r/v_z представляет собою неопределенность вида

$$\vartheta_r / \vartheta_z = 0/0.$$

Обе гипотезы справедливы в интервалах $r_0 < r < r_2$ и $0 < z < z_0$.

При этом осевую скорость в кольцевом канале можно определить из соотношений:

$$\int_{r_0}^{r_2} v_z(r, z_0) dr = \int_0^{z_0} v_r(r_2, z) dz, \tag{5}$$

$$\int_{r_0}^{r_2} v_z(r, z_0) dr = \frac{q_0}{\pi(r_2^2 - r_0^2)},$$

где q_0 – расход газа на выходе из котла.

Следует отметить, что экспериментальное определение скоростей (5) затруднено вследствие жестких требований к герметичности котла и сложной формы канала, в котором происходит разделение потоков на транзитный (идущий в конвективный пучок дымогарных труб) и циркуляционный (дымовые газы, идущие на повторный

дожог). Скорости можно оценить по косвенным признакам и путем анализа данных, полученных при тепло-экологических испытаниях котла.

Авторами было экспериментально определено аэродинамическое сопротивление котла с различными типами вторичных излучателей и без них при номинальной нагрузке котла. Температура уходящих дымовых газов и температура воздуха, идущего на горение, измерялись термопарами, встроенными в компьютерный газоанализатор. Анализ экологических показателей проводился им же по официально рекомендованной Государственным комитетом энергосбережения Украины методике, согласованной с Министерством охраны окружающей среды и экологической безопасности.

Давление и температура дымовых газов на выходе из котла определялись на расстоянии 2 диаметров дымовой трубы от задней стенки сборной коробки конвективного пучка, при помощи электронного мановакуумметра и термометра.

На базе серийно выпускаемого котла был создан экспериментальный стенд, на газоходах которого на входе и выходе из котла были установлены штуцеры, к которым с помощью силиконовых термостойких шлангов, присоединялись мановакуумметр и трубка Пито. Мощность, потребляемая электродвигателем горелки, определялась расчетом на основании замеров счётчика электроэнергии с классом точности 0,5 и секундомера. Напор

Табл. 1. Гидравлическое сопротивление котла

Тип излучателя		$S_{изл}/S_{жар}$	$L_{изл}/D_{изл}$	α	CO_2 %	ΔT °C	N Вт	ΔP Па
Без излучателя		-	-	1,31	11,9	121,4	300	400
Короткий	0,9 D	0,21	0,9	1,29	12,0	119,4	310	450
Средний	1,84 D	0,43	1,84	1,31	11,9	121,4	320	475
Длинный	2,5 D	0,65	2,5	1,34	11,6	110,9	330	483
Сеточный излучатель		0,003	1,41	1,34	11,6	119,3	310	450

Табл. 2. Эффективность работы котла и выбросы оксидов азота

Тип излучателя		$S_{изл}/S_{жар}$	L/D	α	CO_2 %	ΔT °C	КПД, %	NO_x мг/м ³
Без излучателя		-	-	1,31	11,9	121,4	93,8	98,7
Короткий	0,9D	0,21	0,9	1,29	12,0	119,4	93,7	106,3
Средний	1,84 D	0,43	1,84	1,31	11,9	121,4	93,8	98,7
Длинный	2,5 D	0,65	2,5	1,34	11,6	110,9	94,6	82,67
Сеточный излучатель		0,003	1,41	1,34	11,6	119,3	93,7	71

вентилятора горелки определялся исходя из табличных паспортных данных завода-изготовителя и замеров, проведенных мановакуумметром, через штуцер, установленный в корпусе горелки.

Приведенные результаты свидетельствуют о незначительном увеличении гидравлического сопротивления котла с увеличением отношений L/D и $S_{изл}/S_{жар}$, что существенно расширяет область применения излучателей в котлах с низконапорными вентиляторными горелками, а также возможность применения в котлах с атмосферными горелками. Результаты испытаний представлены в сводной табл. 1.

Экспериментальные исследования эффективности котла и химический состав уходящих газов проводились при помощи газоанализатора Eurotron (Ecoline Plus 784). Точность определения КПД котла составляет 0,1%, диапазон измерения от 0 до 99,9%. Разрешающая способность прибора при опреде-

лении NO_x лежит в диапазоне от 0 до 200 мг/м³, с точностью $\pm 0,5$ мг/м³, температуры с точностью $\pm 0,25\%$. Расход дизельного топлива на горелку в процессе исследований составлял 45 л/ч.

Эффективность работы котла, определяемая КПД, с учётом потерь с теплом уходящих дымовых газов и выбросы оксидов азота приведены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 2 экспериментальных данных видно, что наибольшего КПД, равного 94,6%, удалось достигнуть при применении вторичного излучателя с соотношением $L/D=2,5$.

Наилучшие экологические показатели были достигнуты при применении сеточного излучателя с КПД = 93,7%; $NO_x = 71$ мг/м³.

Выводы

1. В результате проведенных исследований установлена целесообразность применения вто-

ричных излучателей в водогрейных отопительных котлах.

2. Определена наиболее эффективная его конструкция с точки зрения повышения КПД и снижения до 30% выбросов оксида азота.

3. Рассмотрены аспекты создания расчётной математической модели для нахождения скорости потока дымовых газов в точке бифуркации, влияющей на интенсификацию теплопереноса.

4. Определены зависимости влияния конструкции вторичного излучателя на аэродинамическое сопротивление котла с тупиковой топкой и эффективность его работы при одновременном снижении выбросов азота в атмосферу.

5. Полученные данные могут быть положены в основу создания принципов модернизации и конструирования котельных агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА.

1. *Образование* окислов азота в процессах горения и пути снижения выброса их в атмосферу. Сб. научных трудов. Наукова думка. Киев. 1979. С—172.
2. *Сигал И.Я.* Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.— Л.: 1988 г. — 312 с.
3. *Демченко В.Г.* Снижение выбросов NOx путём установки в топку котла экранов-отражателей.//Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики. г. Алушта.: 2004 г. С. 45—47.
4. *Гришкова А.В., Красовский Б.М., Ракитин А.Ю.* Уменьшение выбросов оксидов азота от водогрейных котлов путём внесения в топку промежуточного излучателя с оптимальными параметрами. // Промышленная энергетика. — 2004. — № 5.— С. 50—53.

Получено 27.10.2005 г.