

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ГАЗОМАЗУТНЫХ КОТЛАХ

Докт. техн. наук, проф. ЖИХАР Г. И., инж. ЖИХАР И. Г.

*Белорусский национальный технический университет,
ОАО «Мотовело»*

В зависимости от свойств топлива и условий его сжигания дымовые газы котлов могут содержать пыль, оксиды серы, азота, продукты недожога (сажа, СО, канцерогенные вещества). Поэтому одной из важнейших задач эксплуатации энергетического оборудования является разработка и широкое использование эффективных методов снижения образования вредных веществ и определение оптимальных режимов сжигания топлива, обеспечивающих минимальный уровень выброса токсичных продуктов сгорания.

Двухступенчатое сжигание топлива – эффективный метод снижения выбросов оксидов азота. При двухступенчатом сжигании одна зона выгорания топлива заменяется несколькими зонами – по возможности, обособленными. В котельной технике чаще всего применяется двух- и реже трехступенчатое сжигание топлива. Первый вариант двухступенчатого сжигания реализуется путем перераспределения дутьевого воздуха по ярусам горелок. В нижний ярус горелок подается богатая топливная смесь, а в верхний ярус – смесь с избытком дутьевого воздуха или дополнительного воздуха. Такой способ организации двухступенчатого сжигания топлива получил название поярусного регулирования. Он не требует реконструкции котла, однако область его применения ограничена котлами, которые имеют расположение горелок в несколько ярусов и достаточно большие размеры топки, позволяющие сжигать топливо без недожога. Другой вариант двухступенчатого сжигания может быть реализован в специальных горелочных устройствах, в которых осуществляется перераспределение потоков топлива и воздуха с образованием на первой стадии либо бедной топливно-воздушной смеси с последующим добавлением необходимого количества топлива, либо богатой топливно-воздушной смеси и подводом на второй стадии воздуха для дожигания продуктов неполного сгорания первичной зоны горения.

Для практической реализации двухступенчатого сжигания топлива в газомазутных котлах в БНТУ была разработана новая газомазутная горелка (а. с. № 964350). На рис. 1 представлена схема горелки для двухступенчатого сжигания газа и мазута.

Газомазутная горелка работает следующим образом. Топливо подают в газомазутную горелку через мазутную форсунку либо через газовый коллектор. Часть воздуха, недостаточная для полного сжигания топлива, направляется в короб первичного воздуха и, закручиваясь завихрителем, подается в газификационную камеру. В кольцевом зазоре вокруг амбразуры образуются обратные токи, эжектирующие к корню факела продукты сгорания, что вследствие интенсификации процесса горения улучшает выгорание вредных веществ (СО, бенз(а)перена, сажистых частиц), а вследст-

вие выравнивания температурных полей в факеле и уменьшения максимальной температуры снижается концентрация оксидов азота в продуктах сгорания. На выходе из горелочной амбразуры в поток подается дополнительное количество воздуха из каналов, необходимое для полного сжигания топлива.

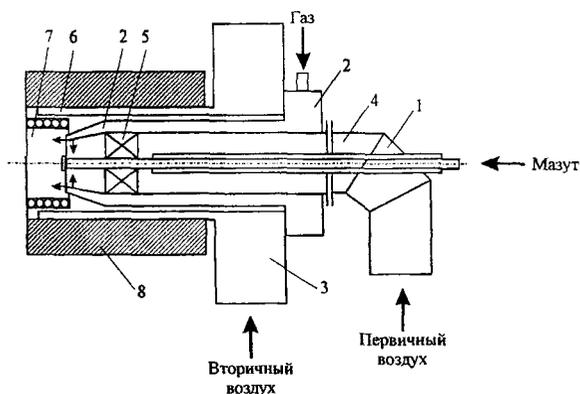


Рис. 1. Схема газомазутной горелки для двухступенчатого сжигания топлива котла ДКВР-10-13: 1 – мазутная форсунка; 2 – газовый коллектор; 3 – улитка вторичного воздуха; 4 – короб первичного воздуха; 5 – аксиальный лопаточный завихритель; 6 – канал вторичного воздуха; 7 – газификационная камера; 8 – обмуровка котла

Исследование образования оксидов азота при двухступенчатом сжигании мазута в новых горелках производилось на котле ДКВР-10-13.

Во время испытаний котла сжигался мазут со следующими характеристиками:

$$S^P = 2,0 \%; \quad W^P = 3,6 \%; \quad Q_H^P = 40,94 \text{ МДж/кг.}$$

Нагрузка котла изменялась с 1,67 до 3,42 кг/с. Влияние нагрузки котла на концентрацию оксидов азота в уходящих газах показано на рис. 2. Как видно, с увеличением нагрузки котла выход оксидов азота возрастает. Это объясняется тем, что с повышением нагрузки температура в зоне горения возрастает, что приводит к росту концентрации оксидов азота в продуктах сгорания. Из приведенных данных на рис. 2 видно, что концентрация оксидов азота в уходящих газах при работе котла с

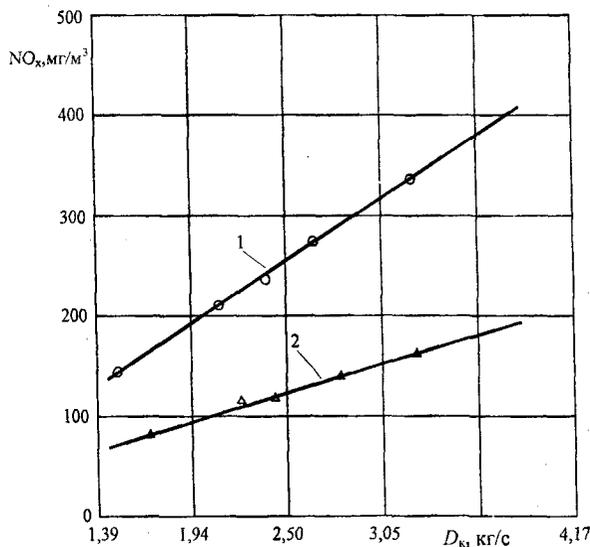


Рис. 2. Влияние нагрузки котла ДКВР-10-13 на концентрацию оксидов азота в уходящих газах: 1 – котел с заводскими горелками; 2 – котел с горелками для двухступенчатого сжигания топлива

горелками для двухступенчатого сжигания топлива при нагрузке 3,42 кг/с в 2 раза ниже, чем при работе котла с заводскими горелками. Аналогичная зависимость концентрации оксидов азота от нагрузки котла наблюдалась и при сжигании природного газа.

Исследование двухступенчатого сжигания топлива также проводилось на газомазутном котле ГМ-50-14, где были установлены новые горелки для двухступенчатого сжигания газа и мазута. Во время испытаний котла сжигался мазут со следующими характеристиками:

$$S^P = 1,8 \%; W^P = 5,8 \%; Q_n^P = 38,33 \text{ МДж/кг.}$$

Испытания показали, что котел работает устойчиво при отсутствии химнедожога в диапазоне нагрузок 8,3...14,5 кг/с. Регулирование нагрузки производилось изменением давления мазута перед горелками. КПД котла с горелками для двухступенчатого сжигания топлива повысился на 1,7 % за счет снижения коэффициента избытка воздуха и температуры уходящих газов.

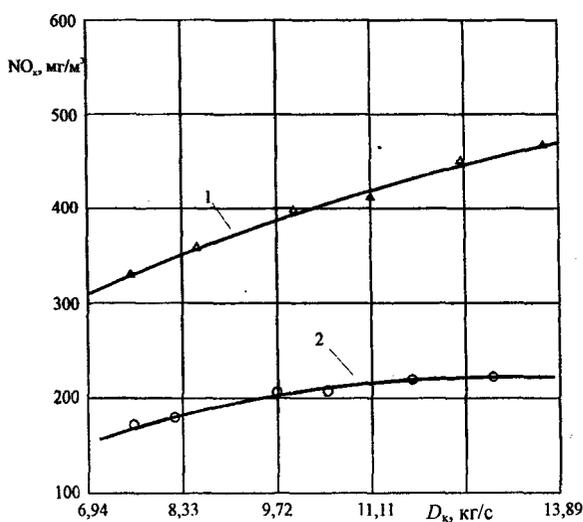


Рис. 3. Влияние нагрузки котла ГМ-50-14 на содержание оксидов азота в газах за пароперегревателем: 1 – котел с заводскими горелками; 2 – котел с горелками для двухступенчатого сжигания топлива

Изменение концентрации оксидов азота в газах за пароперегревателем котла ГМ-50-14 в зависимости от нагрузки представлено на рис. 3. Из рисунка видно, что с увеличением нагрузки выход оксидов азота возрастает, но при максимальной нагрузке котла концентрация оксидов азота в газах за пароперегревателем в два раза ниже при работе котла с горелками для двухступенчатого сжигания топлива, чем при работе котла с заводскими горелками.

Также была исследована динамика образования оксидов азота вдоль факела котла. Полученные данные показывают, что интенсивное образование оксидов азота происходит не после завершения реакций горения, а сразу после окончания первой стадии горения, характеризующейся почти полным расходом исходных углеводородов и образованием максимальных концентраций промежуточных продуктов горения.

Зависимость концентрации серного ангидрида в газах за пароперегревателем котла ГМ-50-14 от нагрузки с горелками для двухступенчатого сжигания топлива показано на рис. 4. Из рисунка следует, что с увеличением нагрузки котла концентрация серного ангидрида в газах за пароперегревателем котла ГМ-50-14 возрастает и еще зависит от коэффициента избытка воздуха за пароперегревателем.

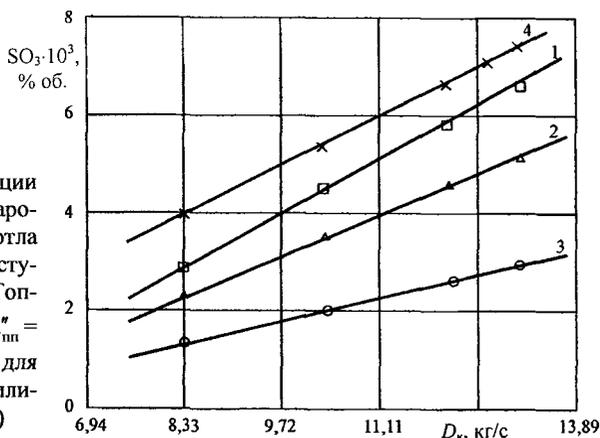


Рис. 4. Изменение концентрации серного ангидрида в газах за пароперегревателем от нагрузки котла ГМ-50-14 с горелками для двухступенчатого сжигания топлива. Топливо – мазут, $S^p = 18\%$: 1 – $\alpha''_{\text{ин}} = 1,20$; 2 – 1,32; 3 – 1,50 (горелки для двухступенчатого сжигания топлива); 4 – 1,20 (заводские горелки)

Например, при избытке воздуха за пароперегревателем, равном 1,2, при увеличении нагрузки котла с 8,3 до 12 кг/с концентрация серного ангидрида в продуктах сгорания увеличилась с $2,9 \cdot 10^{-3}$ до $5,7 \cdot 10^{-3}$ % об. Увеличение коэффициента избытка воздуха за пароперегревателем приводит к снижению содержания серного ангидрида в продуктах сгорания. Такое влияние нагрузки и коэффициента избытка воздуха на образование серного ангидрида можно объяснить следующим образом. При изменении нагрузки котла происходит изменение температурного режима как в ядре факела, так и в концевых зонах, что влияет на генерацию серного ангидрида.

Изменение коэффициента избытка воздуха оказывает двойное влияние. С одной стороны, повышение содержания избыточного воздуха приводит к росту концентрации свободного кислорода в активной зоне, а это способствует увеличению интенсивности образования серного ангидрида. С другой стороны, проявляется эффект разбавления, что ведет к снижению концентрации серного ангидрида в газах.

Из рис. 4 видно, что при нагрузке котла 13 кг/с и коэффициенте избытка воздуха за пароперегревателем, равном 1,2, при работе котла с горелками для двухступенчатого сжигания топлива концентрация серного ангидрида в газах при одинаковых условиях в 1,2 раза меньше, чем при работе котла с заводскими горелками.

Кроме того, был исследован процесс образования серного ангидрида вдоль факела котла ГМ-50-14 с горелками для двухступенчатого сжигания топлива. Так как в области высоких температур серный ангидрид образуется при участии атомарного кислорода, экспериментальные данные указывают на наличие в начальной зоне значительных концентраций атомарного кислорода, образовавшегося как в результате термической диссоциации молекулярного кислорода, так и в результате промежуточных реакций горения. Следовательно, количество атомарного кислорода, находящегося в зоне горения, определяет концентрацию серного ангидрида. Поэтому при одних и тех же законах изменения концентрации реагентов во времени и температуре большему количеству атомарного кислорода будет соответствовать большая концентрация серного ангидрида.

Это подтверждает теоретическое предположение возможности одновременного снижения SO_3 и NO_x при двухступенчатом сжигании топлива. Исследования показали, что максимальная концентрация серного ангидрида

да в факеле наблюдается на относительной длине факела $\frac{L}{D_a} \approx 7...8$ и зависит от коэффициента избытка воздуха. Например, при коэффициенте избытка воздуха на первой ступени горения $\alpha_1 = 0,86$ и общем коэффициенте избытка воздуха $\alpha_0 = 1,06$ максимальная концентрация серного ангидрида в факеле составляет $12 \cdot 10^{-3} \% \text{ об.}$ $\left(\frac{L}{D_a} \approx 7,5\right)$, а при $\alpha_1 = 0,97$ и $\alpha_0 = 1,17$ соответственно $17 \cdot 10^{-3} \% \text{ об.}$ $\left(\frac{L}{D_a} \approx 8,0\right)$. В процессе дальнейшего увеличения $\frac{L}{D_a}$ во всех случаях концентрация серного ангидрида в факеле резко снижается.

Было исследовано изменение концентрации сажистых частиц вдоль факела котла ГМ-50-14 с горелками для двухступенчатого сжигания топлива. Анализ полученных данных показывает, что максимальная концентрация сажистых частиц тем выше, чем выше относительная концентрация топлива, и имеет место при $\frac{L}{D_a} \approx 3$.

Например, при нагрузке котла $11,94 \text{ кг/с}$ и коэффициенте избытка воздуха на первой ступени горения $\alpha_1 = 0,97$ и общем коэффициенте избытка воздуха $\alpha_0 = 1,17$ максимальная концентрация сажистых частиц в факеле составляет $2,25 \text{ г/м}^3$ при относительной длине факела $\frac{L}{D_a} \approx 3$, а при той же нагрузке котла, но при $\alpha_1 = 0,86$ и $\alpha_0 = 1,06$ максимальная концентрация сажистых частиц в факеле была соответственно $2,58 \text{ г/м}^3$. При дальнейшем увеличении $\frac{L}{D_a}$ концентрация сажистых частиц в факеле резко снижается и определяется скоростью окисления сажи в потоке. Скорость окисления сажи связана с ее удельной поверхностью, на которой происходит окисление, а также зависит от концентрации кислорода и температуры среды.

Поверхности нагрева, размещенные в топочной камере, воспринимают лучистую энергию факела. Точное определение падающей лучистой энергии, поглощенной экранами или отдельными их участками, представляет большой интерес. Наиболее полные характеристики лучистого теплообмена дают исследования, в которых проводится изучение распределения потоков, падающих на экраны, и устанавливается связь этих распределений с родом сжигаемого топлива, выгоранием топлива по ходу газов и конструктивными особенностями топочных устройств. В настоящее время применяются приборы, измеряющие непосредственно тепловые потоки. К ним относятся одно-, двухсторонний и сдвоенный термозонды. Исследования теплообмена в топке с помощью этих термозондов показали высокую надежность их работы и достаточно высокую точность измерения [1, 2].

Исследование падающих тепловых потоков на экранные поверхности топки проводилось при различных нагрузках котла. Распределение падающих тепловых потоков характеризует процесс формирования факела, а

также в значительной мере определяет тепловосприятие экранных поверхностей нагрева. Последнее в большей степени зависит также от распределения загрязнений по экранам, которое, в свою очередь, связано с особенностями ведения топочного процесса.

Изменение падающих тепловых потоков по высоте топки показано на рис. 5. Распределение падающих тепловых потоков по высоте топки стало более равномерным и максимальные тепловые нагрузки после перехода на сжигание мазута в двухступенчатых горелках снизились с 300 до 227 кВт/м², т. е. в 1,32 раза. Исследование зависимости максимальных падающих тепловых потоков на экранные поверхности нагрева топки от нагрузки котла показали, что при изменении нагрузки с 8,3 до 12,8 кг/с максимальные падающие тепловые потоки возрастают с 217 до 342 кВт/м².

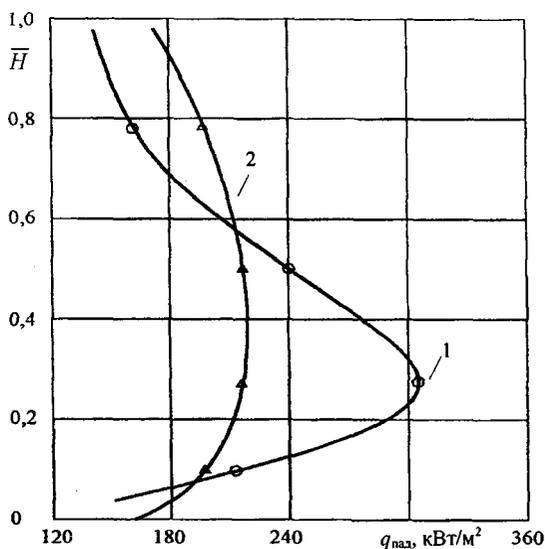


Рис. 5. Распределение падающих тепловых потоков по высоте топки котла ГМ-50-14: 1 – заводские горелки ($D_k = 8,3$ кг/с); 2 – горелки для двухступенчатого сжигания топлива ($D_k = 8,3$ кг/с)

Известно, что прочность отложений определяется сопротивлением как на разрыв, так и на сдвиг. В [3] отмечается, что в качестве основного показателя, характеризующего аутогезию сыпучих материалов, рекомендуется применять прочность на разрыв пробы, предварительно уплотненной стандартной нагрузкой 50 кПа. Поэтому исследования по изучению прочности на разрыв отложений с водяного экономайзера показали, что их можно отнести к слабослипающимся [4]. Это позволяет применить сухие способы очистки поверхностей нагрева.

ВЫВОДЫ

1. Установка на газомазутных котлах горелочных устройств для двухступенчатого сжигания газа и мазута привела к снижению выхода оксидов азота в 2 раза, а сернистого ангидрида – в 1,2 раза.

2. При двухступенчатом сжигании мазута в газомазутных котлах повысилась надежность экранных поверхностей нагрева в результате снижения максимальных падающих тепловых потоков на экранные поверхности нагрева котла в среднем в 1,3 раза.

3. Промышленная эксплуатация газомазутных котлов, оборудованных горелочными устройствами для двухступенчатого сжигания топлива, показала, что котлы работают надежно в широком диапазоне изменения нагрузки. Опыт промышленной эксплуатации также подтвердил высокую эффективность сжигания топлива в котлах с новыми горелками, что привело к повышению КПД котельных агрегатов в среднем на 1,6...2,0 % в результате снижения коэффициента избытка воздуха и температуры уходящих газов.

4. Отложения на конвективных поверхностях нагрева котла относятся к слабослипающимся, что позволяет применить сухие способы очистки поверхностей нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митор В. В. Теплообмен в топках паровых котлѳв. – М.: Машгиз, 1973. – 180 с.
2. Усманоѳ Б. Ш. Локальные тепловые потоки в топке газомазутного котла ТГМ-94 // Теплоэнергетика. – 1974. – № 10. – С. 8–13.
3. Зимоѳ А. Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1967. – 431 с.
4. Жихар Г. И. Физико-химические процессы в газомазутных котлах. – Мн.: Тэхналогія, 2002. – 325 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 16.02.2004

УДК 542.47:621.6

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОМ ТЕЛЕ В НАЧАЛЬНОМ И ПЕРВОМ ПЕРИОДАХ СУШКИ

Докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н., асп. БИЛЫК В. А.

*Белорусский национальный технический университет,
ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова» НАН Беларуси*

Теоретическое изучение процессов массообмена при сушке капиллярно-пористых тел началось еще в начале прошлого века [1, 2]. Однако первые решения, которые зачастую соответствовали экспериментальным результатам при большой скорости обдува образцов глин сушильным воздухом ($v = 10...15$ м/с), были получены при решении уравнений второго закона Фика с граничными условиями первого рода, согласно которому концентрация влаги на поверхности с самого начала сушки принималась нулевой.

Дальнейшее развитие теория массообмена при сушке получила позже [3...6]. За последние 20 лет появились интересные работы [7...11], в которых ставится под сомнение основное влияние на массоперенос внутри капиллярно-пористых тел процессов обычной диффузии под действием перепада влагосодержания. Но во всех этих работах не уделялось должного