

ТЕПЛОКОРРОЗИОННЫЙ РЕЖИМ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ КОТЛОВ НА МАЗУТЕ И СМЕСИ ЕГО С ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

Докт. техн. наук СТРИХА И. И.

Научно-исследовательское государственное предприятие «БелТЭИ»

При работе котлов на мазуте или смеси его с природным газом с температурой поверхности набивки регенеративных воздухоподогревателей (РВП), ниже температуры кислотной точки росы, в них протекают процессы низкотемпературной коррозии и загрязнений. На поверхности набивки даже после ее обдувки перегретым паром сохраняется некоторое количество отложений, содержащих в своем составе серную кислоту. При переводе котла с мазута на природный газ отложения в воздухоподогревателях длительное время остаются липкими, и всегда существует задача полного удаления кислоты из отложений и их самих. В обычных эксплуатационных условиях без повышения температуры поверхности набивки процесс испарения серной кислоты из отложений затягивается до нескольких суток. Предварительный подогрев воздуха при переходе на природный газ до температуры, отвечающей режиму работы котла на мазуте, не ускоряет существенно этот процесс. Испарение кислоты из отложений в дымовые газы начинается при температуре набивки выше $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, не превышает $2\text{ г/м}^2\cdot\text{ч}$ и на порядок ниже, чем при конденсации [1]. При одинаковой температуре стенки набивки с переходом на газ парциальное давление водяных паров в дымовых газах увеличивается с 0,1 до $0,2\text{ кгс/см}^2$. Упругость паров кислоты снижается почти в 2,5 раза, что влечет уменьшение скорости испарения кислоты. При испарении кислоты в воздух из-за значительно меньшего парциального давления паров воды в нем процесс идет более интенсивно. Рост температуры стенки набивки на каждые $15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопровождается десятикратным увеличением парциального давления равновесных с ней паров серной кислоты при сохранении ее парциального давления в потоке дымовых газов.

В [2] рассмотрены условия поддержания высокой экономичности котлов при переводе с мазута на газ при занесении поверхностей нагрева трубчатых воздухоподогревателей золовыми и сажевыми отложениями. В результате выполненных исследований установлено, что определяющими факторами процесса испарения кислоты из слоя отложений являются: нагрузка котла, температура предварительного подогрева воздуха за калориферами и избытки воздуха в уходящих газах. При этом около 80 % свободной серной кислоты в отложениях испаряется из них менее чем за 50 % полного времени испарения. Интенсивность процесса испарения серной кислоты определяется в основном температурой поверхности. В интервале температур $120\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость испарения кислоты минимальная, а при $180\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$ — резко возрастает. Наиболее эффективным мероприятием по удалению кислоты из отложений и самих отложений является их «термосушка» дымовыми газами с кратковременным прекращением подачи воздуха. После непродолжительной работы котла на мазуте ($200\text{--}300\text{ ч}$) при переводе на газ и подогреве воздуха в калориферах время полного удаления кислоты из отложений

составляет от 100 до 200 ч, в то же время этот показатель при термо-сушке – менее 1 ч.

Полученные в [2] результаты для трубчатых воздухоподогревателей не могут быть однозначно перенесены на РВП из-за различий в них процессов теплообмена, коррозии и загрязнений. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Для поддержания температуры стенки набивки РВП, обеспечивающей его коррозионный режим на приемлемом уровне, повышают температуру воздуха на входе в РВП. Уровень температуры предварительно подогретого воздуха зависит от температуры кислотной точки росы продуктов сгорания топлива, конструкции воздухоподогревателя и других задаваемых режимных параметров. Несмотря на снижение КПД котла при предварительном подогреве воздуха в калориферах отборным паром или водой с низкой энергоценностью, КПД цикла электростанции может быть повышен [3].

При предварительном подогреве воздуха в энергетических котлах сокращается тепловосприятие воздухоподогревателем из-за снижения температурного напора в нем. При этом температура уходящих газов повышается, что влечет рост потерь q_2 . С другой стороны, при предварительном подогреве воздуха снижается загрязнение воздухоподогревателя мазутными отложениями, что должно способствовать повышению его тепловой эффективности, сокращению затрат электроэнергии на тягодутьевые установки и т. п. [4]. Эксплуатационный уровень предварительного подогрева воздуха должен устанавливаться по результатам технико-экономических расчетов с учетом этих предпосылок и изменения тепловой эффективности воздухоподогревателя.

Применение предварительного подогрева воздуха с повышением его температуры экономически будет оправдано до тех пор, пока выигрыш в затратах на ремонт и замену поверхности нагрева воздухоподогревателей и газоходов будет компенсировать перерасход топлива. Очевидно, существует предельное значение температуры подогрева воздуха при условии равенства расчетных затрат для обоих рассматриваемых вариантов. Согласно [5], это условие можно записать в виде

$$\text{Ц}_T \sum_{i=1}^n \tau_i \Delta B_i \pm \Delta K = 0, \quad (1)$$

где ΔB_i – изменение расхода топлива, т/ч;

ΔK – изменение суммарных годовых затрат на эксплуатацию воздухоподогревателей, руб/год;

τ_i – число часов работы котла при соответствующей нагрузке;

Ц_T – цена топлива, руб/т.

На основании приведенного выше соотношения можно считать целесообразным повышение температуры предварительного подогрева воздуха до уровня, при котором будет выдерживаться условие:

$$\Delta B_{i, \text{пр}} \leq \frac{\Delta K}{\text{Ц}_T \tau_i}; \quad \Delta K - \text{Ц}_T \Delta B \rightarrow \text{max}. \quad (2)$$

Анализ составляющих выражений (2) показывает, что, с одной стороны, уровень предварительного подогрева воздуха должен обеспечить

требуемую по условиям коррозии надежность работы воздухоподогревателей, т. е. удлинить их рабочую кампанию между заменами холодных пакетов набивки или выносных кубов, с другой — задаваемая температура воздуха влечет за собой перерасход топлива, который может быть не компенсирован преимуществами работы воздухоподогревателя от увеличения его рабочей кампании. В связи с этим ставится задача определения оптимального значения температуры предварительного подогрева воздуха, при которой обеспечивается требуемый срок службы воздухоподогревателей с максимально возможной экономией всех затрат.

Расчет длительности эксплуатации низкотемпературной поверхности нагрева РВП между двумя последовательными обдувками осуществляется из условий, что его аэродинамическое сопротивление за межочисточный период повышается от первоначального до предельно допустимого значения. Однако в эксплуатационных условиях ТЭС периодичность обдувок РВП, как правило, устанавливается без учета роста их аэродинамического сопротивления и, на наш взгляд, производится чаще, чем это требуется по условиям загрязнения поверхностей нагрева.

Получившая широкое распространение обдувка поверхностей нагрева РВП перегретым паром с двух сторон (холодной и горячей) обеспечивает достаточно высокую его очистку при температуре подогрева воздуха на входе в РВП порядка 100 °С и более, при сжигании мазутов с серосодержанием 2 % и выше. При сжигании мазута с $S^p < 1$ % предварительный подогрев воздуха можно осуществлять до температуры 55–60 °С. При расширении пара в соплах обдувочных аппаратов должна исключаться область влажного пара.

Для мазутных котлов, кроме паровой обдувки РВП (крайне редко), дополнительно применяют их водную обмывку (вода с рН = 12). Удаление отложений с поверхности нагрева происходит в основном за счет их растворения в воде. Водные обмывки РВП достаточно эффективны в части удаления отложений, однако приводят к дополнительным потерям за счет коррозии не только поверхностей нагрева, а и других конструктивных элементов (каркаса, газоходов и т. п.).

Загрязнение поверхностей нагрева воздухоподогревателя вызывает снижение его тепловой эффективности и экономичности котла в целом. Влияние загрязнения поверхностей нагрева РВП на экономичность работы котла пока изучено недостаточно. Более обстоятельно эти вопросы рассмотрены для трубчатых воздухоподогревателей.

Для оценки эффективности работы воздухоподогревателя при разных перетоках воздуха в нем часто используют величину m — отношение водяных эквивалентов воздуха и дымовых газов, равную

$$m = \frac{\omega_B}{\omega_G} = \frac{\beta I_{B,t}^0 \vartheta}{[I_G^0 + (\alpha - 1) I_{B,\vartheta}^0] t}, \quad (3)$$

где $\omega_B = c_B V_B$; $\omega_G = c_G V_G$ — водяные эквиваленты воздуха и газа;

c_B , c_G и V_B , V_G — соответственно удельная теплоемкость, объемы воздуха и дымовых газов;

α , β — средние коэффициенты избытков воздуха по газовой и воздушной сторонам воздухоподогревателя;

$I_{B,t}^0$, $I_{B,\vartheta}^0$ — энтальпия воздуха при $\alpha = 1$ и средних температурах соответственно воздуха t и продуктов сгорания ϑ .

Величина m показывает, насколько охлаждение газов в РВП меньше, чем нагрев воздуха. Она всегда < 1 , что обусловлено более высокой теплоемкостью продуктов сгорания, содержащих трехатомные газы, и более высоким коэффициентом избытка воздуха по газовой стороне, чем по воздушной. Чем m ближе к единице, тем эффективнее работа воздухоподогревателя. В зависимости от присосов и перетоков воздуха и приведенной влажности топлива m находится в пределах 0,6...0,9.

Для решения практических задач m более удобно определять по упрощенной формуле, полученной с учетом приведенных характеристик топлива [6]:

$$m \approx \frac{\beta m_0}{1 + (\alpha - 1)m_0}; \quad (4)$$

$$m_0 = \frac{(A_B + 0,005)(1 + 0,006W_{\text{п}})}{(A_T + 0,022)(1 + 0,0175W_{\text{п}})},$$

где m_0 — отношение водяных эквивалентов воздуха и продуктов сгорания при $\alpha = 1$;

A_B и A_T — коэффициенты, зависящие от сорта топлива;

$W_{\text{п}}$ — приведенная влажность топлива.

Оценка эффективности РВП по значениям m не позволяет установить ее изменение за счет загрязнения поверхности набивки. Для рассмотрения этого вопроса следует применять другие зависимости.

Количество теплоты, переданной от дымовых газов к воздуху, в РВП может быть выражено через показатели состояния набивки

$$Q = c\delta\rho F(t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) \frac{1}{\tau}, \text{ ккал/ч}, \quad (5)$$

где c , ρ — соответственно удельная теплоемкость и плотность материала набивки с учетом ее загрязнений, ккал/кг·град., кг/м³;

δ — толщина листов набивки с отложениями, м;

F — поверхность нагрева, м²;

t_{max} , t_{min} — максимальная и минимальная температура поверхности нагрева при переходе через газовый и воздушный секторы;

τ — длительность цикла.

Анализ выражения (5) показывает, что по мере загрязнения набивки РВП количество переданной теплоты в нем снижается. Это связано, в первую очередь, с тем, что плотность отложений существенно ниже плотности материала набивки, прогрев металла набивки, а соответственно и разность $(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})$, сокращается.

Количество теплоты, израсходованной на подогрев воздуха в РВП, может быть найдено также по результатам решения уравнений теплопередачи и теплового баланса

$$Q = k\Delta t F = G_T c_T (\vartheta' - \vartheta'') = G_B c_B (t_B'' - t_B'), \text{ ккал/ч}, \quad (6)$$

где k — коэффициент теплопередачи, ккал/м²·ч·град.;

Δt — температурный перепад, °С;

G_T , G_B — массовый расход газов и воздуха, кг/ч.

Согласно [7], тепловая эффективность воздухоподогревателя характеризует соотношение между переданным количеством теплоты в нем и максимально возможным, которое может быть передано в противоточном идеальном теплообменнике. Тепловая эффективность воздухоподогревателя может быть выражена как:

$$m_3 = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{\omega_{\Gamma}(\vartheta' - \vartheta'')}{\omega_{\min}(\vartheta' - t'_B)} = \frac{\omega_B(t''_B - t'_B)}{\omega_{\min}(\vartheta' - t'_B)} \quad (7)$$

или

$$m_3 = \frac{\omega_{\Gamma}(\vartheta' - \vartheta'')}{\omega_B(t''_B - t'_B)}, \quad (8)$$

где ϑ' и ϑ'' — температура газов на входе и выходе из воздухоподогревателя;

t'_B и t''_B — то же, воздуха на входе и выходе из воздухоподогревателя;

ω_{\min} — наименьшая из величин ω_B и ω_{Γ} .

Как видно из выражений (7) и (8), определение показателя m в эксплуатационных условиях не вызывает особых затруднений. В то же время прогноз его значений связан с проведением экспериментов и соответствующих тепловых расчетов.

В соответствии с [8] степень регенерации или тепловая эффективность РВП может определяться по выражению

$$\eta_p = m_3 = \frac{kF_0}{kF_0 + c_{\Gamma}}, \quad (9)$$

где $F_0 = \frac{F}{3600G_{\Gamma}}$ — удельная поверхность регенератора на 1 кг/ч газов;

F — поверхность нагрева, м²;

G_{Γ} — расход дымовых газов, кг/ч.

Показатели F_0 и k зависят от конструктивных размеров РВП и нагрузки котла. Определение η_p по (9) предполагает выполнение расчета значений коэффициента теплопередачи, который изменяется в зависимости от режимных параметров работы котла. В то же время эта зависимость является достаточно удобной для оценки изменения тепловой эффективности воздухоподогревателя в разных условиях его эксплуатации.

Как следует из изложенного выше, тепловая эффективность воздухоподогревателя, а соответственно и изменение за счет нее КПД котла пока определяется преимущественно на основе результатов экспериментальных исследований, что затрудняет выполнение соответствующих расчетов по прогнозированию рабочей кампании воздухоподогревателей.

Для упрощения выполнения расчетов приведены полученные выражения, предполагающие использование режимных параметров РВП в эксплуатационных условиях.

Отношение тепловосприятий РВП можно представить как

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\alpha_2 \Delta t_2 F_2}{\alpha_1 \Delta t_1 F_1}. \quad (10)$$

При разных скоростях дымовых газов W , т. е. $W_2 > W_1$ и $Q_2 \neq Q_1$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{0,8} \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}. \quad (11)$$

Так как $Q_2 < Q_1$, то $\Delta t_2 < \Delta t_1$ и $t_{yx2} > t_{yx1}$, а соответственно $q_{2,2} > q_{2,1}$ и $\eta_{к,2} < \eta_{к,1}$.

Для условий $Q_2 = Q_1$ и $W_2 > W_1$ выражение (10) преобразуется к виду

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,8}. \quad (12)$$

При $W_2 = W_1$ и $Q_2 \neq Q_1$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,8} \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}. \quad (13)$$

Как следует из соотношений (12) и (13), загрязнение и коррозия набивки РВП приводят к снижению Δt_2 , а соответственно к повышению температуры уходящих газов и уменьшению КПД котла. Для наиболее распространенных условий эксплуатации РВП ($W_2 > W_1$), используя выражение (11) и представив d_2 через скорость загрязнения поверхности

РВП c как $d_2 = d_1 - 2 \int_0^{\tau} cd\tau$, коэффициент тепловой эффективности мож-

но определить по соотношению:

$$k_{m,2} = k_{m,1} \frac{Q_2}{Q_1} = k_{m,1} \left(\frac{d_1}{d_1 - 2 \int_0^{\tau} cd\tau} \right)^{0,8} \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}; \quad k_{m,2} = k_{m,1} \frac{Q_2}{Q_1} = k_{m,1}. \quad (14)$$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что изменение коэффициента тепловой эффективности РВП по мере загрязнения поверхности нагрева может быть определено по измеряемым режимным параметрам состояния газового тракта с учетом скорости загрязнения набивки за межочистный период.

Определение оптимальной температуры предварительного подогрева воздуха перед РВП осуществлялось на примере котла ТГМЕ-206 ($D_k = 670$ т/ч) вариантными расчетами с применением способов итерации. В качестве исходного варианта принято существующее положение по уровню подогрева воздуха с известной длительностью рабочей кампании котлов между заменами холодных секций воздухоподогревателей. При

выполнении вариантных расчетов принималось условие, что предельно возможная температура предварительно подогреваемого воздуха должна обеспечить наименьшую температуру «холодной» части воздухоподогревателя с превышением на 5...10 °С температуры кислотной точки росы.

По эксплуатационным данным установлены основные среднегодовые показатели работы котла: паропроизводительность, температура уходящих газов, температура воздуха перед воздухоподогревателем, избытки воздуха и присосы по газовому тракту. По серосодержанию топлива во всех вариантах $S^p = 2,8 \%$ и параметрам работы котла при заданных нагрузках (360, 460, 670 т/ч) расчетным путем установлено значение температуры кислотной точки росы дымовых газов. По известной температуре предварительно подогретого воздуха на входе в воздухоподогреватель и температуре уходящих газов при заданных нагрузках котла рассчитывалась наименьшая температура стенки «холодной» ступени воздухоподогревателя. Она оказалась равной соответственно $t_{ст} = 104; 105; 107 \text{ } ^\circ\text{C}$. Значения температуры воздуха на входе в воздухоподогреватель для условий $t_{ст} = t_p + (5 \pm 10) \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для каждого из рассмотренных вариантов определен предельно допустимый перерасход топлива котлом при расчетном сокращении эксплуатационных затрат. В интервале температур воздуха (исходной и предельной) определялось то ее значение, при котором выполнялось условие по выражению (2). Эта температура воздуха и соответствующий срок службы поверхности нагрева воздухоподогревателя приняты за оптимальные. Согласно результатам расчетов оптимальная температура предварительного подогрева воздуха t_{opt} для первых двух вариантов составила 110 и 90 °С. При нагрузке котла, близкой к номинальной, уровень оптимальной температуры подогрева воздуха перед калориферами составил порядка 70–80 °С.

Аналогичные расчеты были выполнены для смеси топлив при тех же нагрузках котла с долей мазута по теплоте соответственно 0,9; 0,5; 0,2.

По эксплуатационным данным (табл. 1) приняты режимные показатели работы котла. Серосодержание смеси топлива S^p при заданных нагрузках и доли мазута по теплоте $q_m = 0,9/0,5/0,2$ для каждой нагрузки составило 2,6; 1,5; 0,7 %.

Таблица 1

**Исходные режимные параметры котлов (при $q_m = 0,2$ и $0,9$ – к/а № 1;
 $q_m = 0,5$ – № 2) при работе на смеси топлив**

Наименование показателя	Производительность, т/ч, при $q_m = 0,9/0,2/0,5$		
	360	460	670
Температура холодного воздуха $t_{кв}$, °С	30	30	30
Температура воздуха после калорифера $t_{кф}$, °С	85	80	70
Температура уходящих газов $u_{ух}$, °С	145/142/148	155/148/156	165/157/166
Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении $\alpha_{реж}$	1,05	1,05	1,05
Присосы воздуха в топку $\Delta\alpha_T$	0,01–0,02	0,01–0,02	0,01–0,02
Присосы воздуха в РВП $\Delta\alpha_{вп}$	0,34/0,34/0,32	0,32/0,29/0,29	0,25/0,23/0,24
Избыток воздуха перед РВП $\alpha_{вп}$	1,07/1,07/1,09	1,06/1,06/1,09	1,07/1,07/1,08
Избыток воздуха в уходящих газах $\alpha_{ух}$	1,41/1,41/1,41	1,38/1,35/1,38	1,32/1,3/1,32
Потери теплоты с уходящими газами q_2 , %	8,0/6,5/8,1	8,0/6,5/8,6	8,1/6,5/8,7
Потери теплоты в окружающую среду q_5 , %	0,6	0,4	0,3
КПД брутто котлов $\eta_{бр}$, %	91,4/92,9/91,3	91,6/93,1/91,0	91,6/93,2/91,0

Последовательность выполнения расчетов при работе на смеси топлив была такой же, как и при работе на мазуте. Согласно результатам выполненных расчетов оптимальная температура предварительного подогрева воздуха, при которой достигается наибольший экономический эффект, составляет при нагрузке котла $D_k = 360$ т/ч и доли мазута по теплоте $q_m = 0,5 - 106$ °С, при $D_k = 460$ т/ч и $q_m = 0,5 - 70$ °С, а при $D_k = 670$ т/ч и $q_m = 0,9 - 75$ °С. Расчетная скорость коррозии набивки не превышала $0,08 - 0,12$ г/м²·ч. На основании полученных результатов следует отметить, что с учетом коррозии и загрязнений при сжигании смеси топлив эффективно использовать смесь топлив с равной долей по теплоте, т. е. $q_m = q_r = 0,5$ в интервале нагрузок котла $D_k = 360 \dots 460$ т/ч. При нагрузке $D_k = 670$ т/ч целесообразно сжигать смесь топлив с долей мазута по теплоте $q_m = 0,9$. Как следует из приведенных результатов расчета, для энергетических котлов требуется корректировка эксплуатационного уровня температуры предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателями.

Для обоснования оптимальной длительности работы котла при переводе на природный газ с предварительным подогревом воздуха по режиму работы на мазуте проводились экспериментальные исследования коррозии образцов набивки РВП в лабораторных и промышленных условиях.

При выполнении лабораторных исследований опыты проводились в условиях, имитирующих поведение металла набивки в соответствующих режимах работы РВП (температура поверхности образцов – $70 - 140$ °С, слой мазутных отложений).

Согласно данным [9] и других источников, в мазутных отложениях РВП содержится серная кислота с концентрацией $60 - 70$ %. Поэтому в качестве коррозионной среды применялись мазутные отложения, отобранные на действующем котле с добавлением серной кислоты концентрацией 70 %. Длительность опытов для всех режимов устанавливалась из условия прекращения потерь массы образцами.

В эксплуатационных условиях РВП при наличии на поверхности набивки слоя отложений скорость коррозии этой набивки замедляется из-за снижения диффузии серной кислоты через слой отложений и ингибирующих их свойств. Согласно программе испытаний в лабораторных условиях проверялось влияние толщины слоя отложений на скорость коррозии контрольных образцов при разных температурах и длительности опытов.

Для выявления влияния толщины слоя отложений на убыль массы и скорость коррозии образца были проведены опыты при комнатной температуре ~ 20 °С и температуре 110 °С. Навески отложений разной массы, перемешанные с 70 -процентной H_2SO_4 , размещались равномерным слоем на поверхности образцов и выдерживались от 2 до 15 ч при указанной выше температуре. Убыль массы образцов и скорости их коррозии в каждом из сопоставимых опытов были практически одинаковыми. При температуре образцов 110 °С скорость коррозии была выше, чем при температуре 20 °С. В результате проведения этих опытов установлено, что коррозия образцов практически не зависит от толщины слоя отложений.

Получены результаты коррозионных испытаний образцов в лабораторных условиях в двух сериях опытов по описанной выше методике под слоем мазутных отложений с добавлением к ним 70 -процентной серной кислоты в различном соотношении при разной температуре и длительности опытов.

В первой серии опытов использовались мазутные отложения с добавлением к ним 70-процентной серной кислоты, которая составляла 56,6 % (по массе), во второй серии ~ 30 %. Основная задача проведенных опытов состояла в определении их продолжительности, при которой потеря массы образцов отсутствовала, т. е. коррозия их прекращалась. В обеих сериях опытов температура образцов поддерживалась в каждом из опытов в интервале от 70 до 140 °С.

Такой температурный режим образцов был принят с учетом условий работы набивки РВП в эксплуатационных условиях. В результате проведенных опытов установлено, что по истечении 4–6 ч убыль массы образцов под воздействием отложений, содержащих серную кислоту, практически прекращалась.

Продолжительность проявления коррозионной активности смеси отложений с серной кислотой однозначно зависит от температуры образцов: чем выше температура, тем быстрее прекращался процесс коррозии образцов. Это связано с более высокой скоростью коррозии и частичным удалением серной кислоты с поверхности отложений. В результате проведения первой серии опытов установлено, что при температуре образцов 70–120 °С время прекращения убыли их массы наступает через 3 ч, при 130 °С – через 2 ч; 140 °С – через 1 ч. Те же показатели во второй серии опытов были соответственно равны: при $t = 70\text{--}90$ °С – 5–6 ч; 100–130 °С – 3 ч; 140 °С – 2 ч.

В эксплуатационных условиях отложения на набивке РВП попеременно находятся в среде дымовых газов или воздуха. При переводе котлов с мазута на природный газ возможна конденсация паров воды и увлажнение ею отложений, что должно способствовать повышению их коррозионной активности. В результате прекратившийся процесс коррозии набивки под слоем сухих отложений может проявиться под воздействием увлажненных. Следует отметить, что конденсация водяных паров из дымовых газов может происходить при температуре поверхности набивки и отложений ниже температуры точки росы водяных паров (55–60 °С). Такая температура набивки в условиях эксплуатации мало вероятна и может иметь место при недостаточном предварительном подогреве воздуха.

Сопоставлялись потери массы образцов при температуре 70–130 °С под воздействием увлажненных и неувлажненных отложений и резком изменении их температур. Установлено, что увлажнение смеси отложений приводит к повышению их коррозионной активности. При одинаковой температуре убыль массы образцов под воздействием увлажненных отложений в 1,5–2 раза была выше, чем под слоем неувлажненных отложений. Это свидетельствует о том, что в «сухих» отложениях остается свободная серная кислота. Кроме того, при увлажнении отложений происходит образование дополнительной серной кислоты в процессе гидратации серноокислых солей железа.

При резком снижении температуры образцов с отложениями со 160 и 140 до 70 °С коррозия повысилась: при 140 °С на 23,7 % от первоначального уровня; при 160 °С на 18,7 %. При добавлении к отложениям воды при 140 °С потеря массы образца увеличивалась в 2,3 раза, при 160 °С – в 2,4 раза по сравнению с установившейся постоянной убылью массы образцов под воздействием неувлажненных отложений.

В результате проведения лабораторных опытов установлено, что убыль массы образцов при сопоставимой продолжительности испытаний под воздействием отложений, обогащенных серной кислотой, в разных условиях стабилизируется в течение 4–6 часов.

Для рассмотрения в промышленных условиях коррозии и загрязнения набивки РВП в условиях перехода котла с мазута на природный газ, предложена конструкция зонда. Он представляет собой трубу с головкой, вставленную в газоход. Головка имеет с двух сторон лыски, плоскость которых совпадает с направлением движения дымовых газов. На каждой из лысок закреплялось по восемь контрольных образцов размером 50×80 мм, которые плотно прижимались к их поверхности. В головку зонда были вмонтированы термодпары, выведенные на самопишущий прибор. Охлаждение поверхности контрольных образцов осуществлялось воздухом, просасываемым через внутреннюю полость зонда за счет перепада давлений сред внутри и снаружи газохода. Требуемый температурный режим контрольных образцов поддерживался за счет регулирования количества пропускаемого воздуха через трубу с помощью установленной на входе в нее регулирующей заслонки.

В период выполнения испытаний в котле сжигался высокосернистый мазут марки М100 с теплотой сгорания 9177–9250 ккал/кг, содержанием серы на рабочую массу 1,87–2,0 %, влажностью 5,4–6,5 %.

Проведены три серии опытов. Первая серия опытов ($\tau = 260$ ч) состоялась при работе котла на мазуте. Вторая и третья серии опытов были проведены при работе котлов с нагрузками 50–100 % от номинальной на мазуте и при переходе котлов с мазута на природный газ. Отличались эти серии опытов продолжительностью и температурой образцов, установленных на коррозионном зонде. Продолжительность второй серии опытов была 284 ч, третьей – 412 ч.

По результатам промышленных испытаний определены средние значения потерь массы образцами за счет коррозии в каждом из опытов и роста отложений на поверхности этих образцов. При определении средних значений они группировались по условиям проведения экспериментов. Анализ результатов выполненной систематизации полученных сведений показывает, что с переходом с мазута на природный газ и работе котла в течение 1 и 2 суток не происходит существенного изменения потерь металла образцов от коррозии. Во второй серии опытов по сравнению с условиями работы котла на мазуте отмечен рост потерь массы образцов в среднем ~ на 1,5 %, что вызвано некоторым снижением температуры образцов, а также объяснено погрешностью выполнения самих опытов. Аналогичные результаты получены и в третьей серии опытов. После трех суток работы котла на природном газе потери массы образцов практически не отличались от таковых после одних суток. Приведенные результаты коррозионных испытаний на зонде позволяют дать оценку интенсивности процессов коррозии и загрязнений только при температурах 122–160 °С. Наибольший интерес из полученных сведений представляют результаты по коррозии и загрязнению образцов при температуре 122–124 °С. В этих условиях роста коррозионных потерь металла не отмечено. Таким образом, промышленными испытаниями, в известной мере, подтверждены результаты лабораторных исследований, которыми установлено, что по истечении непродолжительного времени при переходе котла с мазута на газ коррозия и загрязнение поверхности набивки РВП прекращается или снижается до приемлемого, относительно низкого уровня.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что эксплуатация РВП осуществляется при температуре предварительного подогрева воздуха, отличающейся от оптимальных

значений. Предложено пересмотреть уровни нормативных значений температуры предварительного подогрева воздуха в калориферах перед воздухоподогревателями при работе котлов на мазуте или смеси топлив и устанавливать их по результатам расчетов по приведенной методике в зависимости от нагрузки котла и доли сжигаемого мазута. Это позволит обеспечить увеличение рабочей кампании РВП без очистки и существенно снизить скорость коррозии набивки.

2. Лабораторными исследованиями коррозионной активности отложений, отобранных в низкотемпературной зоне газоходов котла, сжигавшего длительное время сернистый мазут и природный газ, при воздействии таких отложений на стальные образцы установлено, что:

коррозия образцов практически не зависит от толщины слоя отложений на них и определяется их составом и температурным состоянием;

в рассмотренном интервале температур образцов (70–140 °С) получена общая закономерность прекращения потерь их массы за счет коррозии по истечении не более 4–6 ч;

после прекращения коррозии образцов под воздействием отложений, содержащих серную кислоту, при последующем увлажнении поверхности этих отложений водой процесс коррозии возобновляется.

3. На основании результатов лабораторных и промышленных испытаний при переводе котла с мазута на природный газ в порядке опытной эксплуатации (до 6 мес.) можно сократить продолжительность предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателями по режиму работы котла на мазуте с 3 до 0,5 суток с последующим доведением до 4–5 ч. При этом с учетом применения предложенного температурного режима набивки РВП следует осуществить переход на удлинение периода между обдувками и организовать систематический контроль изменения аэродинамического сопротивления по газовому тракту котла с выделением РВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. В н у к о в А. К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Б ы к о в е ц И. К., К р у к М. Т. Изучение процессов накопления испарения серной кислоты в отложениях труб воздухоподогревателей при переводе котлов с мазута на газ // Теплоэнергетика. – 1990. – № 5. – С. 50–53.
3. Л о к ш и н В. А., К о к а я В. Н. Тепловая эффективность многоступенчатой энергетической калориферной установки // Электрические станции. – 1981. – № 1. – С. 31–33.
4. Р е к о м е н д а ц и и по совершенствованию РВП газомазутных котлов энергоблоков 300 МВт и режимов их работы в условиях чрезвычайного графика нагрузок ТЭС / И. С. Мысак, И. А. Кусков, М. Т. Крук, И. М. Дуда. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1989. – 62 с.
5. А н д р ю ш е н к о А. И., А м и н о в Р. З. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. – М.: Высшая школа, 1983. – 255 с.
6. П е к к е р Я. Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
7. К е й с В. М., Л о н д о н А. Л. Компактные теплообменники. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
8. Г е л ь ф е н б е й н Л. Г. Регенераторы газотурбинных установок. – М.: Машгиз, 1963. – 180 с.
9. В о з д у х о п о д о г р е в а т е л и котельных установок / Т. С. Добряков, В. К. Мигай, В. С. Назаренко и др. – Л.: Энергия, 1977. – 184 с.

Представлена научным семинаром
лаборатории топлива и
топочных процессов

Поступила 6.06.2000