

УДК 621.18.001.573

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОТЛОАГРЕГАТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ ВОЗДУХА

Тюрина Элина Александровна,

д-р техн. наук, ведущ. науч. сотр. Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130. E-mail: tyurina@isem.sei.irk.ru.

Ижганайтис Максим Иозо,

аспирант кафедры теплоэнергетики Института энергетики ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет», 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83. E-mail: izhganaytis_mi@rambler.ru.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности работы и снижения затрат на ремонт конвективных поверхностей теплообмена котлоагрегата при сжигании сернистых углей.

Цель работы: проведение комплексных технико-экономических исследований и сравнительного анализа методов предварительного подогрева воздуха перед котлоагрегатом с целью определения эффективности их реализации при решении задачи снижения скорости протекания низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева воздухоподогревателя.

Методы исследования: тепловые (поверочные и конструкторские) и оптимизационные расчеты характерных режимов работы котлоагрегата БКЗ-420–140–6 с применением математических моделей как базовой схемы котлоагрегата, так и схем, дополненных системами предварительного подогрева воздуха. Математическая модель котлоагрегата разработана с применением созданной в ИСЭМ СО РАН Системы машинного построения программ (СМПП-ПК) на основании действующей нормативной документации, технических характеристик котлоагрегата, инструкции по его эксплуатации и результатов его испытаний.

Результаты: Разработана математическая модель котлоагрегата, включающая в себя расчет скорости низкотемпературной коррозии, позволяющая с достаточной точностью описывать происходящие в нем процессы, определять характеристики, параметры и технико-экономические показатели работы котлоагрегата в различных режимах; разработаны математические модели схем предварительного подогрева воздуха перед котлоагрегатом, позволяющие определять конструктивные характеристики входящих в них элементов; проведены оптимизационные исследования способов предварительного подогрева воздуха, что позволяет сравнить технико-экономические показатели их эффективности в рамках задачи снижения скорости низкотемпературной коррозии. Сделаны выводы о применимости предварительного подогрева воздуха в качестве метода снижения скорости протекания низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева воздухоподогревателя.

Ключевые слова:

Котельные агрегаты, математическое моделирование, предварительный подогрев воздуха, низкотемпературная коррозия.

Введение

Процесс низкотемпературной сернокислотной коррозии, протекающий на конвективных поверхностях теплообмена котлоагрегата, зачастую приводит к нарушению нормальной работы этих поверхностей и снижению эффективности работы всего котлоагрегата. Особенно сильно наличие низкотемпературной коррозии сказывается на надежности работы последней по ходу газов теплообменной поверхности – воздухоподогревателя (ВЗП), и, как следствие, на надежности работы котлоагрегата в целом (возникают перетечки воздуха в дымовые газы, приводящие к увеличению нагрузки на дутьевой вентилятор и дымосос и к снижению общей экономичности котлоагрегата, увеличиваются потери с механическим недожогом, что связано с возникновением недостатка подаваемого в топку воздуха при номинальной нагрузке на котел и т. д. [1, 2]).

Процесс низкотемпературной коррозии обусловлен конденсацией паров серной кислоты, образующейся в результате взаимодействия серного ангидрида (SO_2) и водяных паров дымовых газов,

на поверхностях, температура которых ниже температуры конденсации серной кислоты – температуры точки росы.

Серный ангидрид образуется как в результате непосредственного окисления серосодержащих соединений, входящих в состав органической и минеральной частей топлива, так и в результате доокисления сернистого ангидрида (SO_2). По современным представлениям [3, 4], окисление SO_2 до SO_3 происходит в результате нескольких процессов: гомогенного окисления молекулярным кислородом (реакция протекает очень медленно даже при высоких температурах), гомогенного окисления атомарным кислородом, образующимся в высокотемпературной зоне факела за счет цепных реакций горения и термической диссоциации, и гетерогенного окисления на поверхностях. Таким образом, глубина окисления SO_2 до SO_3 зависит от многих факторов: коэффициента избытка воздуха в топке, температуры в ядре факела, времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур, времени контакта горячих топочных газов с трубами фестона, ширм и конвективного перегревателя (оксиды же-

леза и высшие оксиды ванадия, которые входят в состав окалины и отложений, служат катализаторами в реакции окисления SO_2 до SO_3 .

Коррозионный процесс условно подразделяется на два этапа [5, 6]. Сначала происходит конденсация паров серной кислоты на внешней поверхности отложений и перенос ее к поверхности металла. Процесс конденсации серной кислоты характеризуется температурой точки росы, которая зависит как от содержания в составе дымовых газов серного ангидрида, так и от парциальных давлений образующейся серной кислоты и водяных паров. Данный этап является совокупностью последовательных элементарных массообменных процессов. Далее раствор серной кислоты начинает взаимодействовать с металлом. Данный этап характеризуется физико-химическими процессами образования сульфатов железа (FeSO_4 и $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Существенное влияние на скорость коррозии растворимость продуктов коррозии в серной кислоте (соответственно, чем выше их растворимость, тем выше скорость коррозии).

Исходя из характера процесса низкотемпературной коррозии, различают несколько ключевых способов снижения скорости ее протекания: уменьшение содержания оксидов серы в дымовых газах (путем связывания их в топке и конвективном газоходе котлоагрегата активными компонентами [7, 8]); замена металлов поверхностей, подверженных коррозии, коррозионностойкими материалами (например, выполнение набивки регенеративного воздухоподогревателя из малощелочного стекла [9]); изменение способа сжигания топлива (организация сжигания при недостатке воздуха, сжигание в кипящем слое [10]); повышение минимальной температуры стенки подверженных коррозии поверхностей.

В представленной работе рассматривается последнее из названных направлений – снижение скорости протекания низкотемпературной коррозии трубчатого воздухоподогревателя путем повышения температуры поступающего в него воздуха.

Способы предварительного подогрева воздуха

В настоящее время разработаны и применяются разнообразные способы предварительного подогрева воздуха [11, 12], различающиеся по типу теплоносителя, по аэродинамической схеме (замкнутая, разомкнутая, одно- и двухступенчатая и т. д.), по конструкции и компоновке устройств, используемых для подогрева воздуха, и т. д. Основным же признаком, определяющим тепловую схему установки, является вид используемого в схеме греющего агента. По этому признаку способы подогрева можно разделить на следующие группы:

- подогрев теплотой продуктов сгорания топлива (непосредственно газами или промежуточными теплоносителями);
- подогрев теплотой отборного пара турбины;
- паровой подогрев в сочетании с изменением соотношения водяных эквивалентов газов и воздуха в воздухоподогревателе (использование низко- и высокопотенциальных экономайзеров [13], использование схем с избыточным воздухом);
- подогрев воздуха от посторонних источников (огневой подогрев [14], подогрев газами от ГТУ и т. д.);
- комбинированные схемы подогрева.

В работе представлены результаты исследований нескольких типовых схем предварительного подогрева воздуха с различными греющими агентами.

Наиболее распространенным способом предварительного подогрева воздуха теплотой продуктов сгорания является рециркуляция горячего воздуха с подачей некоторой его части на всасывающий воздуховод дутьевого вентилятора. Недостатком такой схемы является увеличение объемов воздуха, перекачиваемого дутьевым вентилятором, и соответственно расхода электроэнергии на дутье. Этот недостаток частично устраняется в схеме, приведенной на рис. 1, – с использованием дополнительного рециркуляционного вентилятора, нагнетающего горячий воздух в напорный воздуховод дутьевого вентилятора.

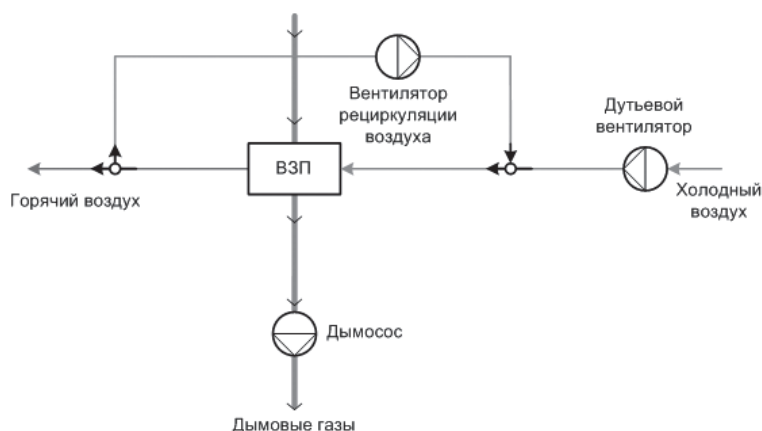


Рис. 1. Рециркуляция горячего воздуха

Fig. 1. Hot air recycling

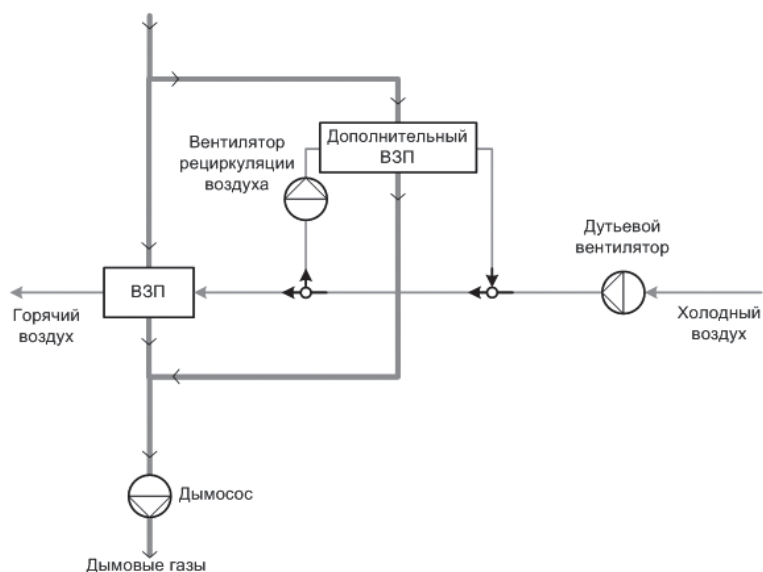


Рис. 2. Рециркуляция слабонагретого воздуха

Fig. 2. Slightly heated air recycling

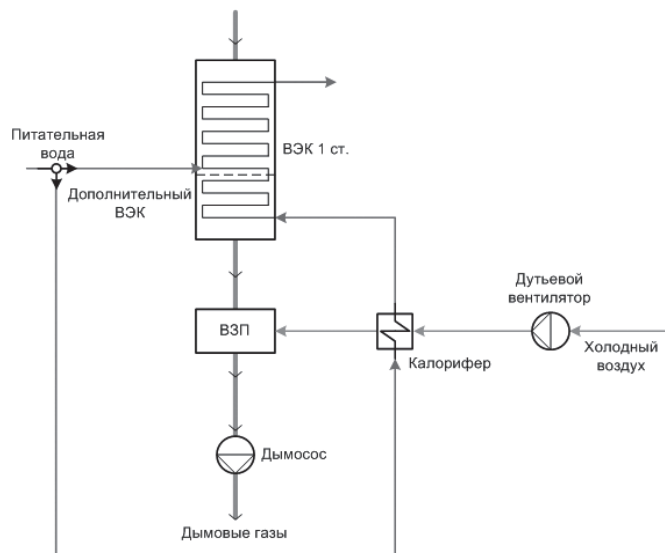


Рис. 3. Подогрев воздуха питательной водой

Fig. 3. Air heating with feed water

На рис. 2 приведена схема рециркуляции воздуха, в которой дутьевой вентилятор работает на холодном воздухе, а рециркуляционный – на слабонагретом, получаемом при смешении холодного воздуха и воздуха, нагретого в отдельной ступени воздухоподогревателя, включенной по газу параллельно основному воздухоподогревателю. Данная схема усложняет компоновку котлоагрегата, однако применима в случае, если котлоагрегат имеет одну ступень воздухоподогревателя.

На рис. 3 приведена схема предварительного подогрева воздуха питательной водой [15]. По схеме часть питательной воды после регенеративного подогрева поступает в калориферы, где нагревает воздух. После калориферов вода подогревается продуктами сгорания в предвключенной ступени экономайзера

либо в объеме первой ступени экономайзера, а затем смешивается с основным потоком питательной воды.

Учет сезонных особенностей подогрева воздуха, а также растопочных режимов работы котлоагрегатов привел к разработке комбинированных схем. Так, к примеру, сочетание предварительного подогрева воздуха в паровом калорифере с подогревом воздуха продуктами сгорания характерно для так называемых каскадных трубчатых воздухоподогревателей (КТВП).

В каскадной схеме, представленной на рис. 4, предварительному подогреву может подвергаться лишь некоторая часть воздуха, поступающая в каскадную ступень. После смешения подогретого воздуха и холодного воздуха смесь поступает в основную ступень воздухоподогревателя.

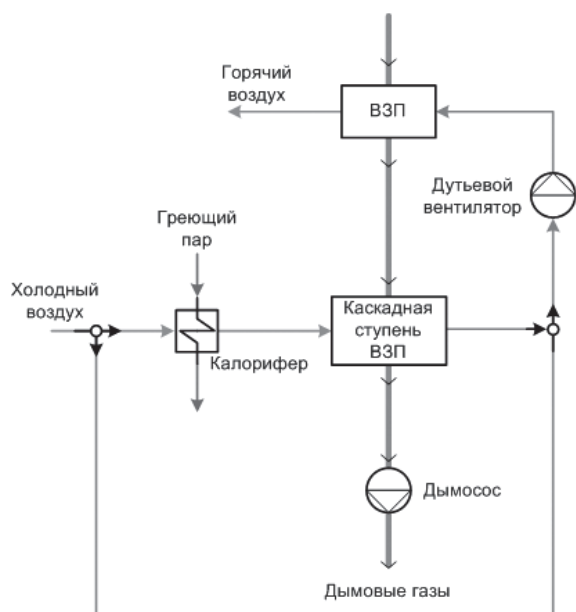


Рис. 4. Подогрев воздуха в КТВП

Fig. 4. Air heating in multistage tubular air heater (MTAH)

Применение каскадных схем позволяет на котлах, сжигающих высокосернистое топливо, обеспечить высокую входную температуру воздуха и существенно снизить скорость протекания низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя, сохранив при этом температуру уходящих газов на приемлемом уровне.

С целью исследования представленных технологических схем подогрева воздуха была разработана математическая модель работы парового котла, позволяющая с достаточной точностью описывать происходящие в нем процессы, определять характеристики и параметры его работы.

Методика оптимизационных расчетов

В качестве объекта моделирования был выбран котлоагрегат типоразмера БКЗ-420-140-6, предназначенный для факельного сжигания угольной пыли (каменных и бурых углей) с твердым шлакоудалением. Номинальная производительность котлоагрегата 420 т/ч, рабочее давление и температура перегретого пара 13,8 МПа и 550 °С соответственно. На рис. 5 представлена базовая расчетная схема котлоагрегата.

Модель котлоагрегата разработана с применением созданной в ИСЭМ СО РАН системы машинного построения программ (СМП-ПК) [16–18], которая на основании информации о математических моделях отдельных элементов, технологических связях между ними и целях расчета автоматически генерирует математическую модель работы установки.

Скорость протекания низкотемпературной коррозии определяется рядом факторов, действующих неоднозначно: скоростью конденсации серной кислоты, ее температурой и концентрацией в пленке росы, температурой и составом дымовых газов, характером отложений, аэродинамическим

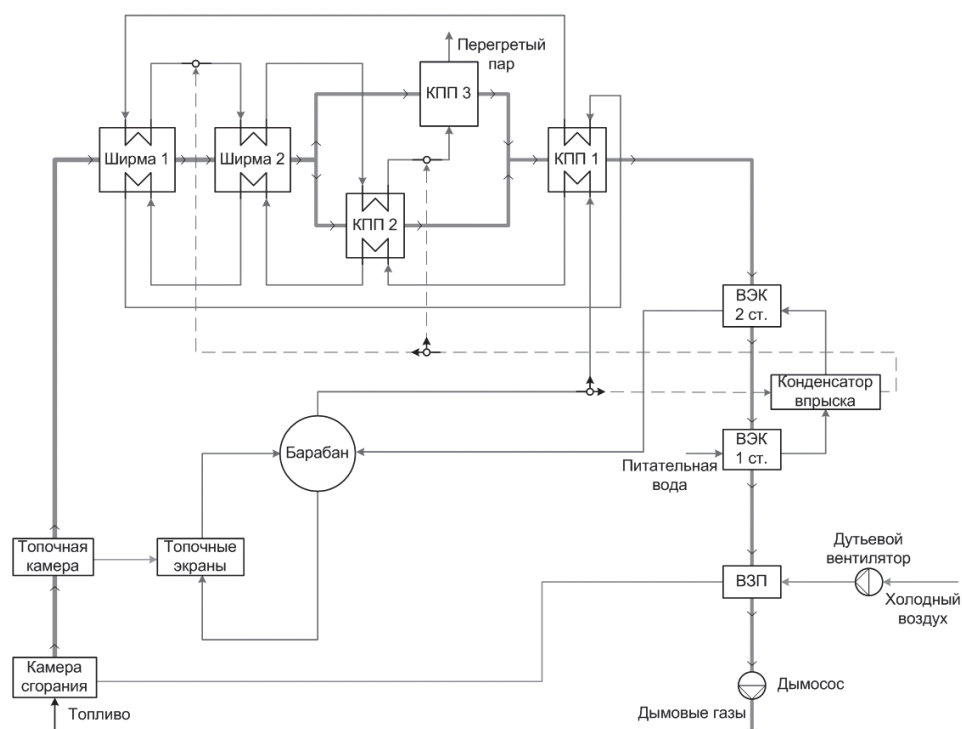


Рис. 5. Расчетная схема котла БКЗ-420-140-6

Fig. 5. Design pattern of a boiler BKZ-420-140-6

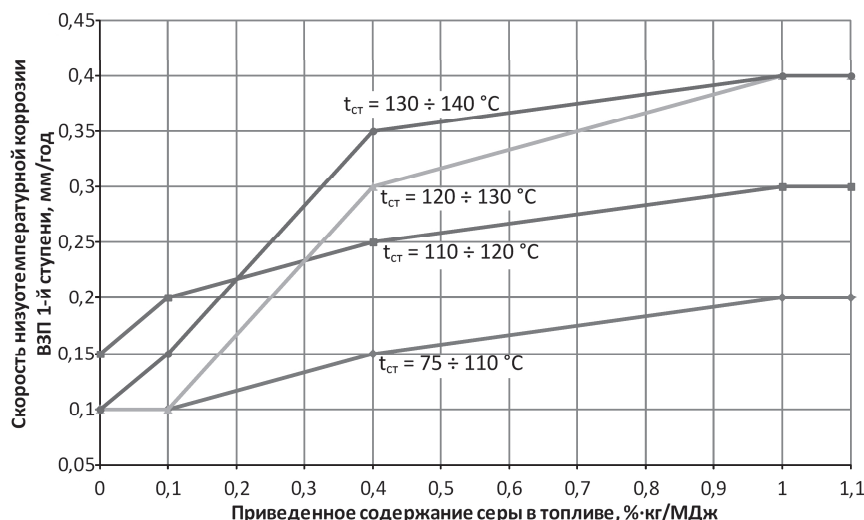


Рис. 6. Зависимость скорости низкотемпературной коррозии от приведенного содержания серы в топливе и температуры стенки труб ВЗП

Fig. 6. Dependence of low-temperature corrosion rate on reduced sulphur content in fuel and temperature of tube wall of air heater (AH)

фактором, составом металла поверхности и т. д. Некоторые из приведенных факторов зависят от качества топлива, режима его сжигания, нагрузки котлоагрегата, конструктивных особенностей его элементов. Поэтому аналитическое определение скорости протекания низкотемпературной коррозии напрямую затруднительно.

Для расчета скорости коррозионного износа металла труб воздухоподогревателя первой ступени котлоагрегата используются эмпирические данные [19]. На основе указанных данных построены аппроксимационные зависимости скорости низкотемпературной коррозии металла от средней температуры стенки труб и приведенной сернистости сжигаемого топлива, изображенные на рис. 6.

Оценка внедрения мероприятий по снижению низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей нагрева котлоагрегата осуществляется через суммарные ежегодные затраты [20]:

$$Z_{nkor} = U_{topl} + U_{bzp} + \Delta U_{vent} + C_{klr} + C_{dop} + C_{ventd},$$

где U_{topl} – затраты на покупку и перевозку топлива; U_{bzp} – затраты на замену теплообменных поверхностей основного и дополнительного воздухоподогревателей; ΔU_{vent} – затраты, связанные с изменением мощности дутьевых вентиляторов и дымососов; C_{klr} – капиталовложения в калориферы подогрева воздуха; C_{dop} – капиталовложения в дополнительные конвективные поверхности; C_{ventd} – капиталовложения в вентиляторы рециркуляции.

Величины, входящие в выражение определения суммарных ежегодных затрат, определяются следующим образом.

Затраты на покупку и перевозку твердого топлива:

$$U_{topl} = C_{topl} \cdot B_g,$$

где C_{topl} – цена 1 т условного топлива с учетом доставки, р/т у.т.; B_g – годовой расход условного топлива, т у.т.

Расход натурального топлива пересчитывается на расход условного топлива по соотношению:

$$B_g = B_n \cdot \frac{Q_n^r}{Q_{yt}},$$

где B_n – расход натурального топлива, т; Q_n^r – низшая теплота сгорания рабочей массы натурального топлива, кДж/кг; $Q_{yt} = 29300$ кДж/кг – теплота сгорания условного топлива.

Среднегодовой расход топлива:

$$B^n = \sum_i \tau_i B_i^{nac},$$

где τ_i – число часов работы котла при разной паропроизводительности; B_i^{nac} – расход топлива при данной паропроизводительности, кг/ч.

Годовые затраты на замену воздухоподогревателя (или его ступени), приведенные к началу расчетного периода:

$$U_{bzp} = \frac{S_{bzp}}{(1+E)^{\tau_{bzp}}} \cdot \frac{1}{\tau_{bzp}},$$

где S_{bzp} – стоимость изготовления и замены поверхностей воздухоподогревателя, р.; τ_{bzp} – срок службы воздухоподогревателя до замены.

Годовые затраты, связанные с изменением мощности дутьевых вентиляторов и дымососов:

$$\Delta U_{vent} = \sum_i \Delta P_{vent_i} \cdot \tau_i \cdot c^{ep},$$

где ΔP_{vent} – изменение мощности дутьевых вентиляторов и дымососов при разной паропроизводительности; c^{ep} – стоимость электроэнергии на привод агрегатов.

Капиталовложения в калориферы подогрева воздуха, приведенные к одному году:

$$C_{klr} = F_{klr} \cdot c_{klr}^{yd} \cdot P_n,$$

где F_{klr} – площадь поверхностей нагрева калорифера; c_{klr}^{yd} – удельная стоимость поверхностей нагрева

калорифера; p_n – нормативный коэффициент при- ведения капиталовложений.

Капиталовложения в дополнительные воздухо- подогреватели, приведенные к одному году:

$$C_{dop} = F_{dop} \cdot c_{dop}^{yd} \cdot P_n,$$

где F_{dop} – площадь поверхностей нагрева дополни- тельного воздухоподогревателя; c_{dop}^{yd} – удельная стоимость поверхностей нагрева дополнительного воздухоподогревателя.

Капиталовложения в дополнительные венти- ляторы, приведенные к одному году:

$$C_{ventd} = P_{ventd} \cdot c_{ventd}^{yd} \cdot P_n,$$

где P_{ventd} – мощность дополнительных вентилято- ров; c_{ventd}^{yd} – удельная стоимость дополнительных вентиляторов.

Задача оптимизации мероприятий по сниже- нию низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей теплообмена парового котла может быть сформулирована в следующем виде:

$$\min Z_{nkor}(x, y, U_{topl}, U_{bzp}, \Delta U_{vent}, C_{klr}, C_{dop}, C_{ventd}),$$

при условиях:

$$H(x, y) = 0, G(x, y) \geq 0, x_{\min} \leq x \leq x_{\max},$$

где x – вектор независимых оптимизируемых па- раметров; y – вектор зависимых вычисляемых па- раметров; H – вектор ограничений-равенств (ура- внения материального, энергетического балансов, теплопередачи и др.); G – вектор ограничений-не- равенств; x_{\min}, x_{\max} – векторы граничных значений оптимизируемых параметров.

Результаты расчетов

Оптимизационные расчеты проводились на несколько режимов работы котлоагрегата – номи- нальный режим, режим средней нагрузки ($\approx 75\%$ от $D_{ном}$), режим минимальной нагрузки ($\approx 50\%$ от $D_{ном}$) – для каждой из приведенных схем предвари- тельного подогрева воздуха таким образом, чтобы основные параметры работы котлоагрегата (на- грузка, давление и температура острого пара) оста- вались в допустимых для соответствующего режи- ма пределах. Также вводилось ограничение на раз- ницу между минимальной температурой стенки трубок ВЗП и температурой точки росы. Наборы оптимизируемых параметров и ограничений опре- делялись в зависимости от специфики конкретной рассчитываемой схемы.

Основные результаты вариантного теплового расчета базовой схемы и оптимизационных расче- тов схемы котлоагрегата, дополненной типовыми схемами предварительного подогрева воздуха, представлены в таблице, где $D_{оп}$, $P_{оп}$, $t_{оп}$ – расход, давление и температура острого пара; V_n – расход натурального топлива; $KПД_{КА}^{бр}$ – КПД котлоагрега- та брутто; доля рециркулирующего/греющего агента – часть рециркулирующего воздуха или часть воды, идущая на предварительный подогрев; $t_{ВЗП}$, $t_{ст.мин}$, $t_{росы}$ – температура воздуха на входе в

Таблица. Результаты расчета математической модели кот- лоагрегата БКЗ-420-140-6 с различными схема- ми предварительного подогрева воздуха

Table. Results of calculation of mathematical model of bo- iler unit BKZ-420-140-6 with different diagrams of air preheating

Параметр Parameter	Базовая схема Basic pattern	Оптимизационный расчет Optimization calculation				
		Рециркуляция Recycling of				КТВП МТАН
		горячего воздуха Hot air recycling	слабонагретого воздуха Slight-heated air recycling	Подогрев воздуха питательной водой Air heating with feed water		
$D_{оп}/D_{б}$	т/ч/т/h	417,8	417,9	417,6	417,6	417,7
$P_{оп}/P_{б}$	кгс/см ² kgf/cm ²	140,6	140,6	140,9	137,7	137,9
$t_{оп}/t_{б}$	°C	545,8	543,2	539,9	539,9	539,9
$t_{хлг}/t_{гг}$		131	146,8	148,2	167,6	164,6
V_n/V_n	кг/с kg/s	17,7	17,8	17,8	18,1	17,6
$KПД_{КА}^{бр}$ efficiency _{gross}		92,58	91,74	91,68	89,85	91,79
Доля рецирку- лирующего /греющего агента Part of recy- cling/heating agent	–	0,29	0,47	0,48	0,77	–
$t_{ВЗП}/t_{АН}$	°C	22,5	87,9	95,2	86,1	76,7
$t_{ст.мин}^{ВЗП} / t_{w.tube}^{АН}$		59,4	104,8	108,2	112,8	105,2
$t_{росы}^{ВЗП} / t_{dew}^{АН}$		103,9	103,8	104	103,9	103,9
$t_{ВЗП_доп} / t_{АН_ADD}$		–	–	98,8	–	87
$t_{ст.мин}^{ВЗП_доп} / t_{w.min}^{АН_ADD}$		–	–	112,9	–	108,2
$t_{росы}^{ВЗП_доп} / t_{dew}^{АН_ADD}$		–	–	103,2	–	103,6
$F_{КАЛ.}/F_{HEATER}$	м ² /м ²	–	–	–	1824,2	1169,1
$F_{ДОП.}/F_{ADD.}$		–	–	5634,3	116,5	142,2
$N_{ДС.}/N_{ДФ}$	кВт/kW	2546	2701,5	2745,6	2875	2809,6
$N_{ДВ.}/N_{ДФ}$		366	455,8	382,1	176,1	433,5
$N_{РВ.}/N_{РФ}$		–	120,2	434,2	–	–
Z_{nkor}	тыс. р./год thous. rbs/year	154784	143568	150468	148167	142889

ВЗП, минимальная температура стенки трубок ВЗП, температура точки росы дымовых газов, про- ходящих через поверхность соответственно; $t_{ВЗП_доп}$, $t_{ст.мин}^{ВЗП_доп}$, $t_{росы}^{ВЗП_доп}$ – то же самое для дополни- тельного воздухоподогревателя; $F_{КАЛ.}$ – площадь поверхности калорифера; $F_{ДОП.}$ – площадь дополни-

тельной теплообменной поверхности (воздухоподогревателя или экономайзера); $N_{ДС}$, $N_{ДВ}$, $N_{РВ}$ – мощности дымососа, дутьевого и рециркуляционного вентиляторов соответственно; $Z_{нбор}$ – часть суммарных ежегодных затрат по ТЭС, связанная с мероприятиями по снижению низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей нагрева паровых котлов.

Выводы

Из приведенных результатов расчетов видно, что некоторые способы предварительного подогрева воздуха позволяют добиться повышения температуры воздуха на входе в котлоагрегат до такой степени, что минимальная температура стенки трубок ВЗП становится выше температуры точки

росы, при значении суммарных ежегодных затрат ниже, чем в базовом варианте. Из этого можно сделать вывод о том, что организация предварительного подогрева воздуха, несмотря на снижение тепловой эффективности котлоагрегата и капитальные затраты, связанные с введением дополнительных поверхностей нагрева и тягодутьевых мощностей, может быть эффективным способом снижения низкотемпературной коррозии. Ее существенное снижение при доведении температуры стенки трубок ВЗП до значения, выше температуры точки росы, позволяет ощутимо снизить затраты на ремонт и замену трубчатого воздухоподогревателя, что тем актуальнее, чем выше паропроизводительность котлоагрегата и, соответственно, площадь конвективных поверхностей теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ebara R., Tanaka F., Kawasaki M. Sulfuric acid dew point corrosion in waste heat boiler tube for copper smelting furnace // *Engineering failure analysis*. – 2013. – V. 33. – P. 29–36.
2. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
3. Rockel M.B., Bender R. *Corrosion Handbook*. Society for Chemical Engineering and Biotechnology. – Frankfurt, Germany, 2008. – 486 p.
4. Низкотемпературная сернокислотная коррозия воздухоподогревателей. URL: <http://e-him.ru/?page=dynamic§ion=61&article=1221> (дата обращения: 08.06.2014).
5. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. – М.: Физматлит, 2002. – 335 с.
6. *Low-temperature Corrosion* / ed. by Holmes D.R. – Birmingham: Institute of Corrosion Science and Technology, 1985. – 526 p.
7. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: информационный сборник / под ред. В.Я. Путилова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 388 с.
8. Miller B.G. *Coal Energy Systems*. – San Diego: Elsevier Academic Press, 2005. – 526 p.
9. Пермяков Б.А. Применение воздухоподогревателя со стеклянными трубами – способ борьбы с низкотемпературной сернокислотной коррозией в котельных агрегатах // *Практика противокоррозионной защиты*. – 1996. – № 1. – С. 20–21.
10. Basu P. et al. *Boilers and Burners*. – Ney York: Springer-Verlag Inc., 2000. – 566 p.
11. Апатовский Л.Е., Фомина В.Н., Халупович В.А. Подогрев воздуха на тепловых электростанциях. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.
12. Батухтин А.Г., Сафронов П.Г., Кириллов М.В. Оптимизация предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателями котлов (на примере Харанорской ГРЭС) // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*. – 2012. – Т. 142. – С. 97–102.
13. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaustfl ue gas in a 600 MW power plant / C.J. Wang, B.S. He, S.Y. Sun et al. // *Energy*. – 2012. – V. 48. – № 1. – P. 196–202.
14. Антонов А.Я., Розенгауз И.Н., Фомина В.Н. Компонировка современных зарубежных парогенераторов. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1979. – 68 с.
15. Reichert G. Planung ind Bau von 600-Mw Bloken fur Ol // *Gas*. – VGB Kraftwerkstechnik, 1973. – V. 53. – Heft 13. – S. 33–36.
16. Теплосиловые системы: оптимизационные исследования / А.М. Клер, Н.П. Деканова, Э.А. Тюрина и др. – Новосибирск: Наука, 2005. – 236 с.
17. Клер А.М., Скрипкин С.К., Деканова Н.П. Автоматизация построения статистических и динамических моделей теплоэнергетических установок // *Изв. РАН. Энергетика*. – 1996. – № 3. – С. 78–84.
18. Kler A.M., Mai V.A., Skripkin S.K., Epelstein V.V. Generation of applied programs in a computer-aided system of complex thermal power plant studies // *Soviet Technology Review: Energy*. – 1993. – V. 6. – P. 55–67.
19. РД 34.26.105. Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котла. – М.: ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1984 (с изм. от 1995). – 6 с.
20. Гриценко М.В., Клер А.М., Степанова Е.Л. Комплексная методика определения затрат при использовании на ТЭС различных видов твердого топлива // *Научный вестник НГТУ*. – 2007. – № 4. – С. 99–110.

Поступила 02.07.2014 г.

UDC 621.18.001.573

OPTIMIZATION RESEARCH OF METHODS OF REDUCING LOW-TEMPERATURE CORROSION OF BOILER UNIT CONVECTIVE SURFACES BY AIR PREHEATING

Elina A. Tyurina,

Dr. Sc., Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

E-mail: tyurina@isem.sei.irk.ru

Maxim I. Izghanaytis,

National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov street,
Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: izghanaytis_mi@rambler.ru

The relevance of the research is explained by the need to improve the reliability and to reduce the costs of repairing convective heat transfer surfaces in a boiler unit burning sulfur coals.

The main aim of the study is to conduct optimization research and to compare different methods for air preheating before boiler units to reduce the rate of low-temperature corrosion of the air heater surfaces.

The methods used in the study: thermal (verification and design) and optimization calculations on a mathematical model of the boiler unit BKZ-420-140-6. The model is supplemented by the flow diagrams of air preheating. The mathematical model of the boiler unit is developed using a system for computer-aided program generation (SCAPG-PC). The System was developed at the Energy Systems Institute SB RAS on the basis of applicable normative documents, technical feature of the boiler unit, instructions for its operation and results of its tests.

The results. The authors have developed the mathematical model of the boiler unit which includes the calculation of a low-temperature corrosion rate, and makes it possible to define rather accurately the processes that occur in the boiler, and to determine the characteristics and the parameters of its operation. The optimization, technical and economic studies of the air preheating methods have been conducted. The findings allow the efficiency of the methods to be compared within the problem of the reduction in a low-temperature corrosion rate.

Key words:

Boiler units, mathematical modeling, air preheating, low-temperature corrosion.

REFERENCES

- Ebara R., Tanaka F., Kawasaki M. Sulfuric acid dew point corrosion in waste heat boiler tube for copper smelting furnace. *Engineering failure analysis*, 2013, vol. 33, pp. 29–36.
- Magadeev V.Sh. *Korroziya gazovogo trakta kotelnykh ustanovok* [Gas path corrosion of boiler units]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 272 p.
- Rockel M.B., Bender R. *Corrosion Handbook. Society for Chemical Engineering and Biotechnology*. Frankfurt, Germany, 2008. 486 p.
- Nizkotemperaturnaya sernokislota korroziya vozdukhopodogrevateley* [Low-temperature sulfuric acid corrosion of air heaters]. Available at: <http://e-him.ru/?page=dynamic§ion=61&article=1221> (accessed 8 June 2014).
- Semenova I.V., Florianovich G.M., Horoshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and Corrosion Protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 335 p.
- Holmes D.R. (Ed.). *Low-temperature Corrosion*. Birmingham, Institute of Corrosion Science and Technology, 1985. 526 p.
- Putilov V.Ya. (Ed.). *Sovremennye prirodookhrannye tekhnologii v elektroenergetike: informatsionnyy sbornik* [Modern environmental technologies in power industry: collected articles]. Moscow, MEI Publ., 2007. 388 p.
- Miller B.G. *Coal Energy Systems*. San Diego, Elsevier Academic Press, 2005. 526 p.
- Permyakov B.A. Primenenie vozdukhopodogrevatelya so steklyannymi trubami – sposob borby s nizkotemperaturnoy sernokislotoy korroziyey v kotelnykh agregatakh [Using a glass-tube air heater – a method of decreasing low-temperature sulfuric acid corrosion in boiler units]. *Praktika protivokorroziionnoy zashchity*, 1996, no. 1, pp. 20–21.
- Basu P. *Boilers and Burners*. Ney York, Springer-Verlag Inc., 2000. 566 p.
- Apatovskiy L.E., Fomina V.N., Khalupovich V.A. *Podogrev vozdukh na teplovykh elektrostantsiyakh* [Air heating for thermal power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 120 p.
- Batukhtin A.G., Safronov P.G., Kirillov M.V. Optimizatsiya predvaritelnogo podogreva vozdukh pered vozdukhopodogrevatelyami kotlov (na primere Kharanorskoy GRES) [Optimization of air preheating before boiler units air heaters (on example of Kharanorskaya power plant)]. *Nauchno-technicheskie vedomosti SPbGTU*, 2012, vol. 142, pp. 97–102.
- Wang C.J., He B.S., Sun S.Y. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant. *Energy*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 196–202.
- Antonov A.Ya., Rozengauz I.N., Fomina V.N. *Komponovka sovremennykh zarubezhnykh parogeneratorov* [Design of modern foreign steam generators]. Moscow, SPO Soyuztekhnenergo Publ., 1979. 68 p.
- Reichert G. Planung und Bau von 600-Mw Blöcken für Öl [Design and construction of 600 MW power unit for oil]. *Gas, VGB Kraftwerkstechnik*, 1973, Vor. 53, Heft 13, S. 33–36.
- Kler A.M., Dekanova N.P., Tyurina E.A. *Teplosilovye sistemy: Optimizatsionnye issledovaniya* [Thermal power systems: Optimization studies]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 236 p.
- Kler A.M., Skripkin S.K., Dekanova N.P. *Avtomatizatsiya postroeniya statisticheskikh i dinamicheskikh modeley teploenergeticheskikh ustanovok* [Automation of thermal power plants statistical and dynamical models construction]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 1996, no. 3, pp. 78–84.
- Kler A.M., Mai V.A., Skripkin S.K., Epelstein V.V. Generation of applied programs in a computer-aided system of complex thermal power plant studies. *Soviet Technology Review: Energy*, 1993, vol. 6, pp. 55–67.
- RD 34.26.105. Metodicheskie ukazaniya po preduprezhdeniyu nizkotemperaturnoy korrozii poverkhnostey nagreva i gazokhodov kotla* [Management Directive 34.25.105. Methodological guidelines for preventing low-temperature corrosion of boiler flues and heating surfaces]. Moscow, Dzerzhinsky All-Union Institute of Heat Engineering, 1984 (as amended in 1995). 6 p.
- Gritsenko M.V., Kler A.M., Stepanova E.L. Kompleksnaya metoda opredeleniya zatrat pri ispolzovanii na TES razlichnykh vidov tverdogo topliva [Complex method of determining costs when various solid fuels used on a thermal power plant]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2007, no. 4, pp. 99–110.

Received 02 July 2014.