УДК 621.18.001.573

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА, ВКЛЮЧАЯ ОТХОДЫ ПРЕДПРИЯТИЙ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ, ДЛЯ СЕРОСВЯЗЫВАНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЭС

Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И., Воронков В.В.

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассматривается важная экологическая задача снижения выбросов оксидов серы с дымовыми газами тепловых электростанций при сжигании топлив различного состава. Разработана математическая модель котлоагрегата, с использованием которой осуществлены поверочные расчеты котла с определением скоростей абразивного износа конвективных поверхностей теплообмена и коррозионного износа воздухоподогревателя. Выявлены зависимости характерных параметров работы котлоагрегата от состава топлива. Дана технологическая оценка использования топлива различного состава, включая отходы предприятий углеобогащения и связующие компоненты (мраморную крошку), для снижения выбросов оксидов серы.

ВВЕДЕНИЕ

При окислительном сжигании любого органического топлива, кроме природного газа, из серы, содержащейся в нем в виде органических соединений (органическая сера) и виде сульфида железа (FeS_2) и сульфатов щелочных и щелочноземельных металлов (в минеральной части), образуются диоксид (SO_2) и триоксид (SO_3) серы. Вследствие взаимодействия с водяным паром триоксид серы мгновенно образует серную кислоту.

Несмотря на относительно небольшую концентрацию паров серной кислоты в дымовых газах, их конденсация при достижении температуры газов сернокислотной точки росы, вызывает низкотемпературную коррозию, наносящую существенный ущерб низкотемпературным поверхностям теплообмена котлоагрегата. Поэтому температура конденсации паров серной кислоты, обусловленная их концентрацией, влияет на выбор температуры уходящих газов, от которой зависит тепловая эффективность котла.

Помимо этого, окислы серы, попадающие в атмосферный воздух с дымовыми газами, оказывают негативное влияние на экологическую обстановку. Сернистый газ относится к наиболее активным загрязнителям окружающей среды. Его присутствие в атмосфере приводит к закислению водоемов, выщелачиванию из золы и почвы тяжелых металлов, оказывающих сильное отравляющее воздействие, образованию кислотных дождей, появлению аллергических кожных и респираторных заболеваний у людей.

Вопросам снижения выбросов окислов серы с дымовыми газами посвящено большое количество работ. В большинстве из них рассматриваются четыре основных способа снижения выбросов окислов серы с дымовыми газами предприятий энергетики:

- переход на сжигание менее сернистого топлива;
- снижения образования вредных веществ путем совершенствования процессов сжигания органического топлива;
- улучшение качества исходного топлива путем его предварительной подготовки (очистки)

(обогащение исходного сырья, использование водоугольных суспензий, водомазутных эмульсий);

- очистка уходящих дымовых газов.

Последнее направление получило наибольшее распространение, что обусловлено достаточной эффективностью разрабатываемых методов, приемлимыми капиталовложениями в установки и стоимостью их эксплуатации, отсутствием необходимости в глубокой реконструкции основного оборудования. Но непосредственная очистка дымовых газов от окислов серы не позволяет снизить ущерб, наносимый низкотемпературным поверхностям теплообмена при протекании низкотемпературной коррозии.

В представленной работе дана технологическая оценка использования топлива различного состава, включая отходы предприятий углеобогащения, для связывания окислов серы и улучшения экологических показателей работы котлоагрегатов. С этой целью была разработана математическая модель парового котла, позволяющая с достаточной точностью описывать происходящие в нем процессы.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРОВОГО КОТЛА НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА, ВКЛЮЧАЯ ОТХОДЫ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

В качестве объекта моделирования был выбран котлоагрегат типоразмера БКЗ-75-39ФБ, предназначенный для факельного сжигания угольной пыли (каменных и бурых углей) с твердым шлакоудалением. Номинальная производительность котлоагрегата 75 т/ч, рабочее давлением и температура перегретого пара 3,8 МПа и 440 °С соответственно.

На базе котлоагрегата данного типоразмера, установленного на одной из ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго», осуществлялось опытное сжигание отходов предприятий углеобогащения. На основании результатов опытного сжигания был сделан вывод о возможности использования отходов углеобогащения (ОУ) в качестве топливной добавки к основному углю, для чего требуется их предварительная грануляция (отходы углеобогащения обладают высоким содержанием влаги, что может привести к замазыванию тракта на этапе подачи топлива в мельницы на размол). При этом было принято решение исследовать возможность снижения выбросов окислов серы с дымовыми газами котла, используя принцип хемосорбции – добавлением в состав гранул активного компонента, что позволит связать часть окислов серы еще в топке котла.

Модель котлоагрегата разработана с применением созданной в ИСЭМ СО РАН системы машинного построения программ (СМПП-ПК), которая на основании информации о математических моделях отдельных элементов, технологических связях между ними и целях расчета автоматически генерирует математическую модель установки в виде программы расчета на языке FORTRAN.

На рисунке 1 представлена расчетная схема котла, включающая следующие элементы: камеру сгорания (КС); топочную камеру (ТОР); топочные экраны (ЕК); барабан (SEP); две ступени конвективного пароперегревателя (КРР1, КРР2); пароохладитель (регулятор перегрева), служащий для регулирования температуры перегретого пара в период эксплуатации (РО); две ступени водяного экономайзера (ВЕ1, ВЕ2); две ступени воздухоподогревателя (ВР1, ВР2). Кроме указанных элементов в технологической схеме используется раздвоитель (RW) и смеситель (CW), установленные на линии питательной воды и обеспечивающие подачу охлаждающей воды в пароохладитель.

Материальные (газовоздушный и пароводяной) и энергетический (тепловой) потоки учтены связями между соответствующими элементами схемы.

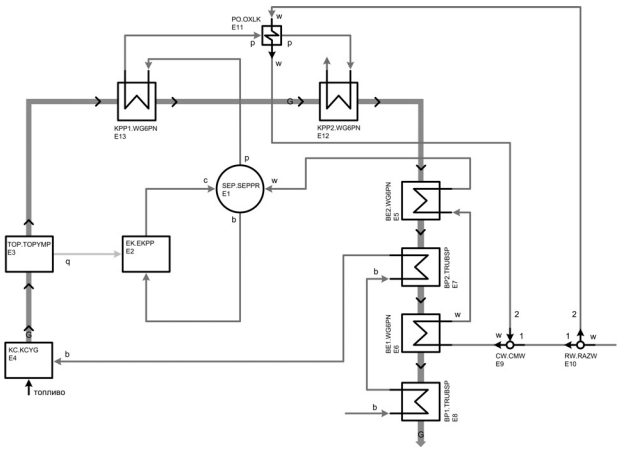

Рис.1 Расчетная схема котла БКЗ-75-39ФБ.

Разработанная математическая модель также позволяет определять характеристики и параметры котла при работе на разных видах

топлива и различных нагрузках, требуемые для оценки технологических и экологических последствий использования топлива различного состава, включая отходы углеобогащения, и организации мероприятий по снижению выбросов окислов серы.

СВЯЗЫВАНИЕ ОКСИДОВ СЕРЫ И ОЦЕНКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Как уже упоминалось выше, для связывания образующихся окислов серы в работе исследуется возможность введения в топливо специальных добавок. В качестве таких добавок рассматриваются отходы мраморного производства (мраморная крошка), содержащие значительные количества оксидов CaO и MgO.

Основными химическими реакциями связывания являются

$$CaO+SO_2+{}^1/_2O_2=CaSO_4, \quad (1)$$
$$MgO+SO_2+{}^1/_2O_2=MgSO_4. \quad (2)$$

Применение такого способа связывания окислов серы в топочной камере имеет ряд особенностей:

- ввод в дымовые газы отходов мраморного производства может изменить химический состав золы и снизить в результате этого температуру начала деформации золы, что может привести к усилению шлакования поверхностей нагрева;

- приводит к снижению температуры сернокислотной точки росы (при больших количествах вводимого известняка температуру точки росы можно снизить почти до значения водяной).

Расчёт связывания окислов серы выполняется на основании методических указаний и экспериментальных данных [1, 3, 5].

Доля оксидов серы (η_{SOx}), связываемая летучей золой топлива, принимается в зависимости от мольного отношения:

$$C^{аэкв}/S = 5{,}71\cdot10^{-3}\cdot A^r/S^r\cdot(CaO+1{,}39\cdot MgO), \quad (3)$$

где CaO, MgO - содержание оксидов кальция и магния в золе топлива, содержащего в составе отходы углеобогащения и мраморную крошку, % массы.

Таблица 1. Эффективность связывания оксидов серы в зависимости от мольного соотношения компонентов

$Ca^{экв}/S$	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
η_{SOx}	0,10	0,18	0,36	0,55	0,69	0,80

Для расчета скорости коррозионного износа металла труб воздухоподогревателя первой ступени котлоагрегата используются табличные данные, изложенные в [4]. На основе указанных данных построены аппроксимационные зависимости скорости низкотемпературной коррозии металла от средней температуры стенки труб.

АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Из всех отрицательных факторов, вызываемых изменением состава топлива, в частности увеличением зольности угля, самым значительным оказывается золовой износ конвективных поверхностей нагрева котлов, вызывающий вывод их в аварийный ремонт с соответствующей недовыработкой энергии.

Золовой износ конвективных поверхностей нагрева парогенераторов, температура стенки труб которых не превышает 350 °С, можно рассматривать как чисто механический процесс. Роль коррозии при температуре 250-350 °С незначительна и износу подвергается основной материал труб (сталь 20К), механические свойства которого в этом интервале можно считать неизменными. Таким образом, при абразивном износе свойства изнашиваемого материала не изменяются, и коэффициент износа характеризует свойства абразива. Поэтому, применительно к золовому износу конвективных поверхностей нагрева коэффициент износа можно принимать равным коэффициенту абразивности золы, определенному относительно материала котельных труб.

Коэффициент абразивности золы определяется на центробежном абразивметре по ГОСТ 21708-96; ориентировочные значения коэффициента абразивности золы рассчитываются в зависимости от содержания в золе ($SiO_2+Al_2O_3$), % по формуле:

a_{20}=0,045•(SiO_2+Al_2O_3-44) •10^{-12}, м²/Н (4)

Абразивность частиц золы, прежде всего, зависит от содержания SiO_2 в золе и заметно увеличивается, когда SiO_2> 60%.

Зная коэффициент абразивности и условия работы котельных труб (скорость и температуру газов, концентрацию золы, неравномерность скоростных и концентрационных полей), можно рассчитать величину золового износа труб парогенераторов и оценить срок службы конвективных поверхностей нагрева при работе на топливе различного состава.

Величина золового износа стенки труб водяного экономайзера ($J^{ВЭК}$, мм) определяется из уравнения:

$$J^{ВЭК} = 9{,}5\cdot 10^3 \cdot \frac{a\cdot k_p \cdot k_\mu \cdot \tau \cdot M}{(\vartheta + 273)^{0.35}} \times$$

$$\times \left(\frac{k_w}{k_D}\cdot w \cdot \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{R_{90}}{d}\right)^{0.5}, \ мм \qquad (5)$$

где a – коэффициент абразивности золы, м²/Н; k_P – коэффициент, учитывающий влияние поперечного шага труб (шахматные гладкотрубные и мембранные пучки: $\sigma_1 \le 2{,}8$ – k_P=3,5; $2{,}8<\sigma_1<5{,}4$ – $k_P=4{,}8/(\sigma_1-1{,}4)$; $\sigma_1 \ge 5{,}4$ – k_P=1,2; коридорные гладкотрубные пучки – k_P=1,2); $\mu_{ЗЛ}$ – концентрация золы в газах в рассчитываемом сечении пакета, г/м³; τ – срок службы труб, ч; w – скорость газов на входе в поверхность нагрева, м/с; R_{90} – остаток золы на сите 90 мкм, %; d – диаметр трубы, мм; ϑ– температура газов, ºС; M – коэффициент истираемости металла труб: для углеродистых труб M=1, для легированных M=0,7; k_W и k_μ – коэффициенты неравномерности соответственно полей скоростей газов и концентраций золы: при П- и Т-образной компоновке котла для поверхностей за поворотной камерой k_W=1,45 и k_m=1,25; при повороте газов перед пакетом на 180º k_W=1,6 и k_m =1,6; при башенной компоновке k_W=1,2 и k_m=1,1; k_D – отношение расчетной скорости газов при номинальной нагрузке котельного агрегата к скорости газов при среднеэксплуатационной нагрузке: для котлов D≥35 кг/с – k_D=1,15; для котлов D=14-20 кг/с – k_D=1,4-1,3.

Золовой износ входных участков теплообменных труб трубчатого воздухоподогревателя (ЈВЗП, мм) определяется из уравнения:

$$J^{ВЗП} = 37\cdot a\cdot k_\mu \cdot \mu \cdot \tau \cdot \left(\frac{k_w}{k_D}\cdot w\right)^3 \times$$

$$\times k_з \cdot \exp(0{,}041\cdot \beta), \ мм \qquad (6)$$

где k_μ – коэффициент неравномерности распределения концентрации золы по сечению: для встроенного в конвективную шахту воздухоподогревателя k_m=1,6; для воздухоподогревателя вынесенной компоновки k_m=2,0; k_W – коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению: для встроенного в конвективную шахту воздухоподогревателя k_W=1,45; для воздухоподогревателя вынесенной компоновки k_W=2,0; $k_з$ – коэффициент защиты: для ячейковой защиты и наставок большого диаметра $k_з$=0,25; при плавном входе в трубу $k_з$=0,6; для вставок $k_з$=0,5; если защиты нет, то $k_з$=1,0; β – угол (градусы) между вектором скорости набегающего на трубную доску потока продуктов сгорания и продольными осями теплообменных труб.

Необходимые для проведения исследований абразивного износа конвективных поверхностей нагрева значения скоростей, объемов и температуры газов, концентрации золы и т.п. определялись в результате поверочного расчета котла.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОТЛА

Расчет с использованием математической модели котлоагрегата производился на следующие составы топлива: черемховский уголь (W^r – 15,0%, A^r – 29,8%, S^r – 2,0%, C^r – 42,5%, H^r – 3,1%, N^r – 0,6%, O^r – 8,1%, Q_i^r – 16410,0 кДж/кг), смесь черемховского угля с гранулированными отходами углеобогащения (Wr – 26,6%, A^r – 28,1%, S^r – 0,55%, C^r – 36,76%, H^r – 2,68%, N^r – 0,52%, O^r – 7,0%, Q_i^r – 12537,1 кДж/кг) с содержанием последних 30%, 50% и 70%, с добавлением и без добавления в состав гранул связывающего окислы серы компонента (мраморной крошки следующего состава: CaO – 59,22%, SiO_2 – 22,49%, MgO – 17,4%, Al_2O_3 – 0,487%, Fe_2O_3 – 0,115% и др.).

В результате расчетов были получены данные, на основании которых построены зависимости, представленные на рисунках 2 - 6. Линия 1 на рисунках 2 – 4 соответствует результатам расчета на смесь угля и отходов углеобогащения при отсутствии в составе гранул мраморной крошки; линия 2 – при при-

сутствии мраморной крошки соответственно; линии 1, 2 на рисунках 5, 6 – при отсутствии в составе гранул мраморной крошки для водяного экономайзера (воздухоподогревателя) 1-й и 2-й ступени соответственно; линии 3, 4 на рисунках 5, 6 – при присутствии в составе гранул мраморной крошки для водяного экономайзера (воздухоподогревателя) 1-й и 2-й ступени соответственно.

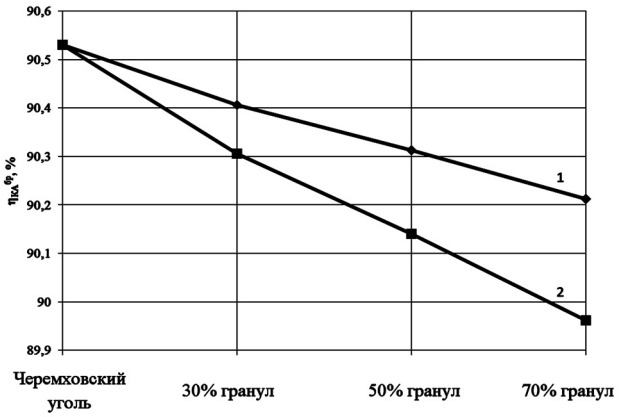

Рис.2 Изменение КПД котла брутто ($\eta_{КА}^{бр}$) при сжигании топлива различного состава.

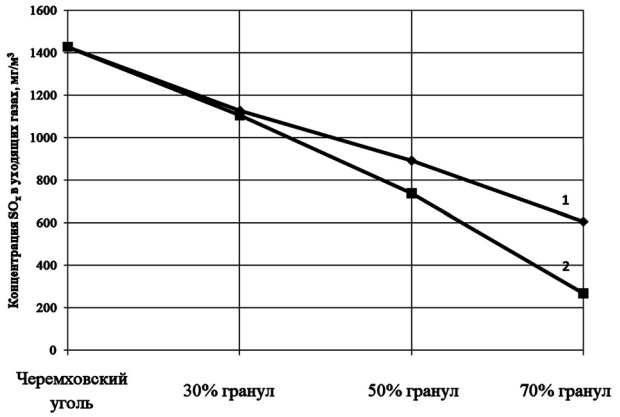

Рис.3 Изменение концентрации SO_x при сжигании топлива различного состава.

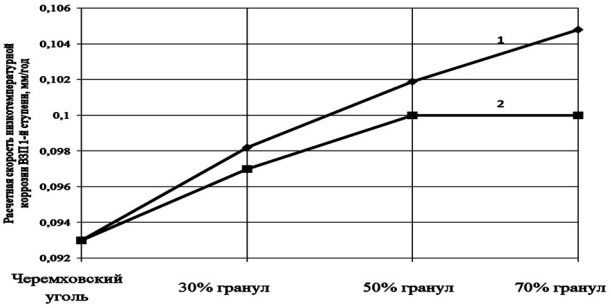

Рис.4 Скорость низкотемпературной коррозии ВЗП 1-й ступени при сжигании топлива различного состава.

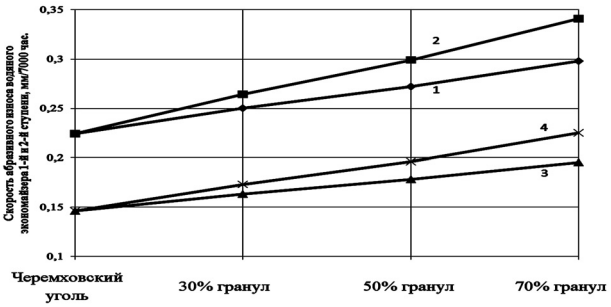

Рис.5 Скорость абразивного износа водяного экономайзера 1-й и 2-й ступеней при сжигании топлива различного состава.

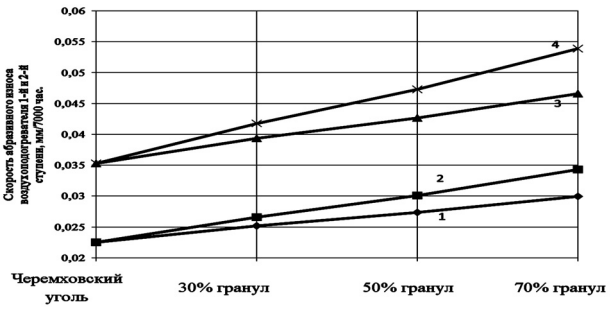

Рис.6 Скорость абразивного износа воздухоподогревателя 1-й и 2-й ступеней при сжигании топлива различного состава.

ВЫВОДЫ

На основании анализа представленных результатов расчетов можно сделать следующие выводы.

Использование гранулированных отходов углеобогащения в качестве добавки к исходному углю приводит к снижению $\eta_{КА}^{бр}$, что обусловлено ухудшением качества топлива (уменьшением теплоты сгорания сжигаемой смеси). При этом добавление в состав гранул

мраморной крошки приводит к большему снижению $\eta_{КА}^{бр}$ вследствие увеличения зольности гранулированных ОУ и, как следствие, большему снижению их теплоты сгорания.

С увеличением доли гранулированных ОУ в сжигаемой смеси снижаются массовый выброс окислов серы с уходящими газами и концентрация окислов серы в газах вследствие снижения содержания серы в составе сжигаемой смеси. Добавление в состав гранул мраморной крошки позволяет дополнительно связать часть окислов серы, при этом эффективность связывания существенно зависит от соотношения реагирующих компонентов – $Ca^{экв}/S$ (эквивалентное содержание кальция напрямую зависит от содержания оксидов кальция и магния и, как следствие, от количества мраморной крошки).

С увеличением доли гранулированных ОУ уменьшается теплота сгорания сжигаемой смеси, что приводит к увеличению расхода топлива, необходимого для сохранения паропроизводительности, что приводит в свою очередь к увеличению объема выбросов твердых частиц с дымовыми газами. Добавление в состав гранул мраморной крошки, как уже было отмечено, еще больше снижает теплоту сгорания сжигаемой смеси и, помимо этого, приводит к увеличению зольности гранулированных ОУ. Поэтому, с увеличением доли гранул с мраморной крошкой в составе сжигаемой смеси наблюдается рост объема выбросов твердых частиц.

Скорость низкотемпературной коррозии возрастает. Добавление мраморной крошки позволяет снизить скорость протекания низкотемпературной коррозии за счет уменьшения концентрации окислов серы в уходящих газах.

Увеличение расхода топлива и массового выброса твердых частиц приводит к росту скорости абразивного износа конвективных поверхностей теплообмена. При этом, скорость абразивного износа ВЗП 1-й ступени выше, чем ВЗП 2-й ступени, что обусловлено большей площадью проходного сечения по газам (ВЗП 2-й ступени – 5,46 м^2, ВЗП 1-й ступени – 3,85 м^2) и, как следствие, несколько большей средней скоростью газов в трубках ВЗП 1-й ступени, по сравнению с ВЗП 2-й ступени.

Уменьшение концентрации окислов серы в уходящих газах приводит к уменьшению температуры точки росы. Это позволяет снизить температуру уходящих газов и тем самым несколько увеличить тепловую эффективность котлоагрегата ($\eta_{КА}^{бр}$). Однако, наличие в продуктах сгорания безводного гипса, образующегося в результате связывания окислов серы оксидом кальция, может привести к образованию в водяных скрубберах трудно удаляемых гипсующих отложений, что требует не только подбора оптимального состава сжигаемой смеси, но и точного химического баланса золоуловителя.

Полученные результаты показывают возможность связывания окислов серы летучей золой сжигаемой смеси черемховского угля и ОУ без добавления мраморной крошки (связывание окислов серы при соотношении угля к ОУ 50/50 и 30/70 – 7,35% и 20,23% соответственно).

Наиболее высокое связывание окислов серы показывают варианты с использованием в качестве топлива смеси черемховского угля и гранул, включающих мраморную крошку, в пропорциях 50/50 и 30/70 – 26,89% и 66,63% соответственно.

Использование отходов предприятий углеобогащения в качестве топливной добавки позволяет снизить содержание окислов серы в дымовых газах котла. Добавление в состав гранул серосвязывающего компонента (мраморной крошки) позволяет усилить этот эффект. Но с целью получения оптимального состава топлива с учетом увеличения золового износа конвективных поверхностей теплообмена и с учетом возможного замазывания в системе пылеприготовления необходимо проведение дальнейших технико-экономических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Абрамов и др.; под общей редакцией В.Я. Путилова. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: информационный сборник.– М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 388 с.
2. Клер А.М. и др. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. - Новосибирск: Наука. СИФ РАН, 1997. – 120 с.
3. Методика определения валовых и удельных выбросов вредных веществ в атмос-

феру от котлов тепловых электростанций. РД 34.02.305-90. – М.: ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1991. – 34 с.
4. Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котла. РД 34.26.105. - М.: ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1984 (с изм. от 1995). – 6 с.
5. Методика по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании водоугольного топлива. – Институт горючих ископаемых НПО «Гидротрубопровод», 1990.
6. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч. ВТИ. – М.: Московское отделение Гидрометеоиздата, 1985.
7. Тепловой расчет котлов (нормативный метод)/ Из-во НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256 с.