

УДК 621.18

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

Тюрина Элина Александровна^{1,2},
tyurina@isem.irk.ru

Медников Александр Станиславович¹,
mednikov@isem.irk.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью использования непроектных углей на действующем оборудовании ТЭС. Как известно, использование таких углей может негативно сказаться на работе, в первую очередь, угольного котла.

Цель: определить межремонтный период, а также скорость низкотемпературной коррозии и абразивного износа конвективных поверхностей (воздухонагревателя и водяного экономайзера), вызванных использованием различных углей (Азейского, Мугунского, Переясловского и Ирбейского месторождений) и их смесей.

Методы: математическое моделирование и комплексная технико-экономическая оптимизация параметров моделей с применением автоматизированной системы машинного построения программ, которая предназначена для генерации математических моделей исследуемых установок на основании математических моделей отдельно взятых элементов, информации о технологических связях между ними, целях расчета. Данный комплекс разработан в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

Результаты. Для оценки последствий использования непроектного топлива разработана достаточно точная математическая модель парового котла БКЗ-420-140. Проведены исследования на математической модели котла с целью определения оптимальных составов топлива для минимизации эксплуатационных издержек, связанных с изменением топлива, и увеличения межремонтного периода конвективных поверхностей нагрева для повышения надежности работы котельного агрегата. Построены аппроксимационные зависимости скорости низкотемпературной коррозии металла от средней температуры стенки труб и сернистости сжигаемого топлива. Получены технико-экономические показатели работы котлоагрегата на углях Азейского, Мугунского, Переясловского и Ирбейского месторождений, а также на угольных смесях (Азейский уголь (7 %) + Ирбейский уголь (93 %), Азейский уголь (23 %) + Переясловский уголь (77 %), Переясловский уголь (80 %) + Мугунский уголь (20 %), Ирбейский уголь (95 %) + Мугунский уголь (5 %)).

Ключевые слова:

Угольный котел, абразивный износ, низкотемпературная коррозия, непроектный уголь, математическое моделирование, межремонтный период.

Введение

Топливо-энергетический комплекс нашей страны обладает значительными разведанными и прогнозными запасами угля [1]. За последнее десятилетие объем добычи угля вырос в 1,3 раза и превышает 440 млн т в год. За этот период продолжилось развитие Кузнецкого, Канско-Ачинского, Минусинского и Горловского бассейнов, а также новых месторождений в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [2].

В 2020 г. на угольные ТЭС России для выработки энергии было поставлено около 93 млн т угля, из которых 73,4 млн т – с российских месторождений. Необходимо отметить, что угольная энергетика играет важную роль в экономике России, особенно в восточных регионах страны [2].

Доля топливной составляющей в себестоимости энергии превышает 50 % [3–9]. Истощение запасов проектного топлива, закрытие нерентабельных мест угледобычи, рост цен на привозное топливо – причины, по которым на протяжении нескольких лет на ряде существующих ТЭС возникла необходимость в сжигании непроектных углей [10–13].

Использование на ТЭС непроектных углей может негативно влиять на надежность котельного оборудования, а именно более остро стоят проблемы износа, шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, снижения надёжности работы теплообменных поверхностей, изменения межремонтного периода [10, 14].

В настоящее время в данном направлении ведутся исследования как в нашей стране, так и за рубежом, но большинство работ посвящены проблемам шлакования и загрязнения поверхностей нагрева [10, 11, 13–21].

В работе [11] представлена оценка влияния физико-химических свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях Иркутской области, на эксплуатационные характеристики котельных агрегатов. Авторы представили результаты расчетов показателей, определяющих шлакующие и загрязняющие свойства твердых топлив, а также предложили мероприятия, позволяющие уменьшить цикличность очистки поверхностей нагрева котельных агрегатов.

Е.А. Бойко и И.В. Загородный рассмотрели проблемы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева БКЗ-420-140 с твердым шлакоудалением Абаканской ТЭЦ. Расчетно-экспериментально опре-

делили факторы шлакования поверхностей нагрева котельного агрегата при сжигании углей переменного качества с различными техническими характеристиками и составами минеральной части [10].

П.В. Росляков и др. на основании эксплуатационных данных, режимной карты, нормативных документов и экологических требований определили критерии оценки работы оборудования с позиций надежности, эффективности и экологической безопасности. По данным критериям анализировали результаты расчетных рабочих параметров котельной установки при сжигании сланца и угля в различных сочетаниях [16].

В статье [17] авторы опытным путем определили, что использование жеронского угля приводит к шлакованию радиационного пароперегревателя, конвективной шахты, неудовлетворительному выходу шлака на минимальной нагрузке и увеличению механического недожога на котлоагрегатах БКЗ-420-140.

М. Пронобис и др. [18] представили математический метод выбора оптимального помола угля при изменении характеристик топлива для пылевидных котлов. Этот метод основан на экономических критериях и учитывает изменения нагрузки энергоблока, а также мощность и срок службы мельниц.

Дж. Мбабази и др. [19] разработали математическую модель для определения влияния скорости и угла удара частиц золы на абразивный износ поверхностей из низкоуглеродистой стали.

Р. Нагараджан и др. [20] определяли влияние физических свойств частиц золы и траектории их движения на абразивный износ трех различных марок низколегированной стали газовоздушного тракта котла.

Ч. Ванг и др. [21] исследовали процессы загрязнения и шлакования, связанные с сжиганием углей с высоким содержанием натрия.

Данная работа направлена на оценку износа (абразивного и низкотемпературной коррозии) конвективных поверхностей (воздухоподогревателя и водяного экономайзера) и обусловленного этим изменения их межремонтного периода. Проведено математическое моделирование отдельных элементов и котлоагрегата с учетом абразивного износа и низкотемпературной коррозии. Определены скорости износа конвективных поверхностей нагрева котлоагрегата, получены оптимальные смеси поставляемых углей, определен межремонтный период в зависимости от состава угольной смеси.

Методика проведения исследований котлоагрегатов угольных ТЭС при использовании непроектного топлива

Одним из основных принципов, позволяющих производить непосредственное сопоставление сложных технических систем, в том числе вариантов наборов оборудования, входящего в состав энергетических установок, является принцип оптимальности, в соответствии с которым каждый из рассматриваемых вариантов должен быть приведен к оптимальным условиям [22–28]. Этим, в частности, вызвана необходимость проведения оптимизации параметров для

каждого из рассматриваемых в работе вариантов рабочих параметров котлоагрегата.

В качестве основного инструмента в данной работе используется программно-вычислительный комплекс математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок СМПП-ПК (система машинного построения программ), предназначенный для генерации математических моделей исследуемых установок на основании математических моделей отдельных взятых элементов, информации о технологических связях между ними, целях расчета. Данный комплекс разработан в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН и за время его применения в исследованиях теплоэнергетических установок была создана база математических моделей отдельных узлов и элементов, использование которой позволяет достаточно эффективно создавать математические модели установок различной сложности для расчетов различной направленности.

Работа посвящена исследованию использования непроектных углей на действующем оборудовании, поэтому математические модели котлоагрегатов, разработанные с применением СМПП-ПК и используемые для проведения комплексных оптимизационных исследований, были идентифицированы путем настройки коэффициентов тепловой эффективности теплообменных поверхностей, коэффициентов механического и химического недожога и др., что позволило достичь соответствия параметров работы котлоагрегатов, рассчитанных с применением данных моделей, параметрам работы действующего оборудования. Результаты исследований показали хорошее соответствие рассчитываемых параметров паровых котлов экспериментальным данным. Относительные отклонения параметров работы установки в различных режимах составляют: паропроизводительность – 0,06...0,1 % (0,03...0,08 т/ч), давление перегретого пара – 0,3 – 0,5 % (0,11... 0,21 кгс/см²), температура перегретого пара – 0,33...0,65 % (1,4...2,8 °С), температура уходящих газов – 0,8 ...1,4 % (0,9... 1,65 °С), КПД котлоагрегата брутто – 0,03... 0,06 %.

С целью оценки экономической эффективности рассматриваемых в работе вариантов за основу принята методика, разработанная в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН [29], позволяющая наиболее полно учесть последствия от использования непроектного топлива по всем элементам котлоагрегата. Данная методика доработана с целью учета межремонтного периода конвективных поверхностей котельного агрегата, обусловленного их абразивным износом и низкотемпературной коррозией.

В основе методики лежит определение части суммарных эксплуатационных издержек по ТЭС, связанных с эксплуатацией котельного агрегата при использовании непроектного топлива. Задача оптимизации сформулирована как задача минимизации суммарных ежегодных эксплуатационных затрат, связанных с использованием непрерывного топлива

$$\min Z \left(x^p, x^k, y, U^t, U^{т. скл}, U^{р. скл}, U^{р. кот}, U^{з. ул}, U^{р. з. ул}, U^{з. ул}, U^{р. з. ул}, U^{з. хр}, U^{з. выбор}, U^{SO_2 \text{ выбр}} \right)$$

при условиях

$$H(x, y) = 0;$$

$$G(x, y) \geq 0;$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max},$$

где U^T – затраты на покупку и перевозку топлива, р.; x^p – вектор независимых оптимизируемых параметров (входные расчетные параметры, определяющие режим работы котлоагрегата; x^k – вектор конструктивных параметров; y – вектор зависимых вычисляемых параметров; X – вектор ограничений-равенств (уравнения материального, энергетического балансов, теплопередачи и др.); G – вектор ограничений-неравенств (ограничения на соблюдение технологических требований к работе котлоагрегата); $x_{\min}$, $x_{\max}$ – векторы граничных значений оптимизируемых параметров, определяющих режим работы котлоагрегата; $U^{T. \text{скл}}$ – затраты на разгрузку, складирование и подачу топлива, р.; $U^{p. \text{скл}}$ – затраты на ремонт систем разгрузки, складирования и подачи топлива, р.; $U^{p. \text{кот}}$ – затраты на ремонт основного и вспомогательного котельного оборудования, р.; $U^{3. \text{ул}}$ – затраты на золоулавливание, р.; $U^{p. 3. \text{ул}}$ – затраты на ремонт систем золоулавливания, р.; $U^{3. \text{уд}}$ – затраты на золошлакоудаление, р.; $U^{p. 3. \text{уд}}$ – затраты на ремонт систем золошлакоудаления, р.; $U^{3. \text{хр}}$ – затраты на хранение зо-

лы и шлака, р.; $U^{3. \text{выбр}}$ – плата за выбросы золы, р.; $U^{SO_2 \text{выбр}}$ – плата за выбросы SO_2 , р.

Результатом решения задачи является минимальное в заданных условиях значение суммарных ежегодных затрат для каждого из рассматриваемых вариантов, связанных с абразивным износом и низкотемпературной коррозией конвективных поверхностей котлоагрегата.

Математическое моделирование котлоагрегата БКЗ-420-140

С целью оценки последствий использования непроектного топлива разработана математическая модель парового котла БКЗ-420-140 (рис. 1), позволяющая с достаточной точностью описывать происходящие в котлоагрегате процессы. Принятые на рисунке обозначения: КПП – конвективный пароперегреватель, ВЭК – водяной экономайзер, ВЗП – воздухоподогреватель.

Котлоагрегат БКЗ-420-140 предназначен 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.

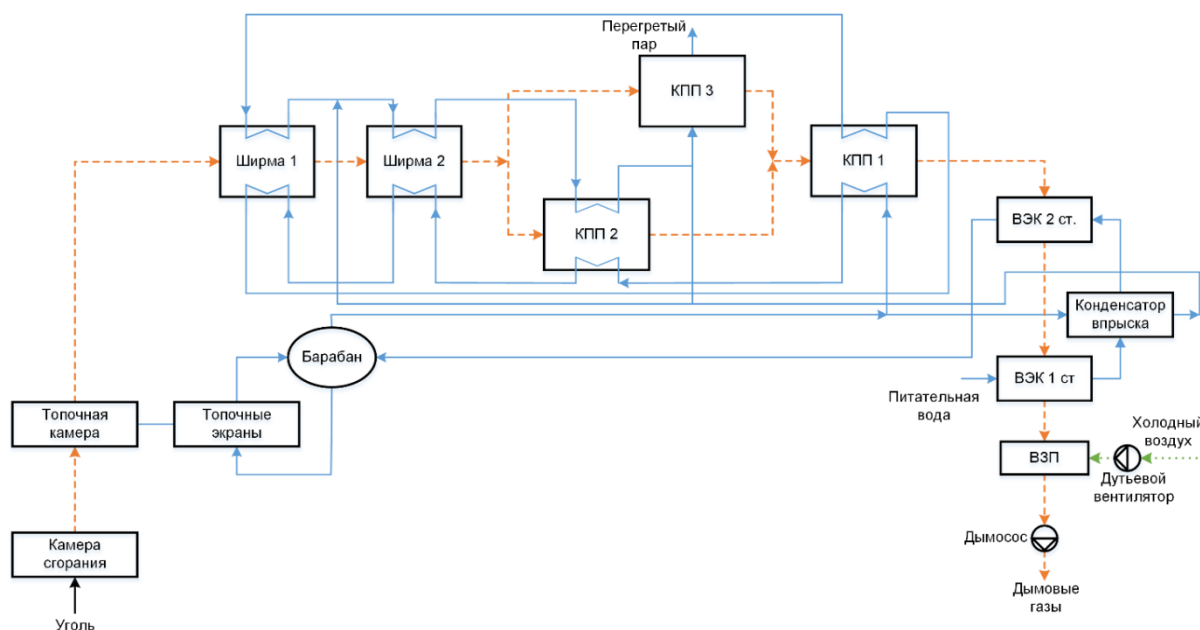


Рис. 1. Базовая расчетная схема котлоагрегата БКЗ-420-140

Fig. 1. Basic design diagram of the BKZ-420-140 boiler unit

Материальные и энергетические потоки учтены связями между соответствующими элементами схемы. Каждой связи между элементами схемы соответствует информационная связь между моделями. Связь между элементами осуществляется:

- по воздуху: между дутьевым вентилятором, воздухоподогревателем и топкой котла; связь характеризуется температурой, давлением и расходом;
- по дымовым газам: между элементами газового тракта (топка котла, ширмы, конвективные паро-

перегреватели, конвективные поверхности нагрева ВЭК и ВЗП, дымосос); связи осуществляются по давлению, температуре и расходу каждого компонента уходящих газов;

- по воде (пароводяной смеси, пару): между элементами пароводяного тракта (водяной экономайзер, конденсатор впрыска, барабан, топочные экраны, ширмы, конвективные пароперегреватели, конвективные поверхности нагрева ВЭК и ВЗП); связь характеризуется энтальпией, давлением и расходом.

В качестве конструктивных информационно-входных параметров используются: наружные и внутренние диаметры труб поверхностей нагрева, их шаги и количество, марка стали, расположение труб в пучке; схема движения теплоносителя; ширина и глубина топки; ширина и глубина газохода в разных сечениях; площадь поверхности теплообменников и т. п. [21].

Режимными информационно-входными параметрами являются: состав твердого топлива, его теплота сгорания, расход, температура питательной воды, воздуха, требуемая температура пара.

Разработанная математическая модель настроена в соответствии с экспериментальными данными, полученными в результате опытного сжигания, и позволяет определять характеристики и параметры котла при работе на твердом топливе различного состава и при различных нагрузках, требуемые для оценки технологических и экологических последствий использования топлива различного состава.

Математическая модель котлоагрегата дополнена расчетом скорости протекания низкотемпературной коррозии и расчетом скорости абразивного износа конвективных поверхностей котлоагрегата.

Наиболее сильно абразивные свойства золы дымовых газов проявляются в зоне температур газового потока ниже 600 °С – то есть в верхней части конвективного газохода частицы теряют поверхностную пластичность. Золовой износ конвективных поверхностей, температура стенки которых ниже 350 °С, рассматривается обычно как чисто механический процесс, а свойства материала подвергающейся износу поверхности считаются неизменными. Поэтому применительно к золовому износу конвективных поверхностей нагрева коэффициент износа принимается равным коэффициенту абразивности золы, определенному относительно материала, из которого поверхности нагрева изготовлены.

Величина золового износа ступеней водяного экономайзера и воздухоподогревателя котлоагрегата определяется в соответствии с [30].

Величина абразивного износа стенки труб водяного экономайзера (мм) определяется из уравнения

$$J^{\text{ВЭК}} = 9,5 \cdot 10^3 \frac{ak_p k_{\mu} \mu \tau M}{(g + 273)^{0,35}} \left(\frac{k_w}{k_D} w \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_1} \right)^3 \left(\frac{R_{90}}{d} \right)^{0,5},$$

где a – коэффициент абразивности золы, м²/Н; k_p – коэффициент, учитывающий влияние поперечного шага труб (шахматные гладкотрубные и мембранные пучки: $\sigma_1 \leq 2,8 - k_p = 3,5$; $2,8 < \sigma_1 < 5,4 - k_p = 4,8/(\sigma_1 - 1,4)$; $\sigma_1 \geq 5,4 - k_p = 1,2$; коридорные гладкотрубные пучки – $k_p = 1,2$); μ – концентрация золы в газах в рассматриваемом 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; g – температура газов, °С; 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 $k_{\mu} = 1,25$; при повороте газов перед пакетом на 180° $k_w = 1,6$ и $k_{\mu} = 1,6$; при башенной компоновке $k_w = 1,2$ и $k_{\mu} = 1,1$; k_D – отношение расчетной скорости газов при номинальной нагрузке котельного агрегата к скорости газов при среднеэксплуатационной нагрузке: для котлов $D \leq 35$ 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 (мм) определяется из уравнения:

$$J^{\text{ЗВП}} = 37 a k_{\mu} \mu \tau \left(\frac{k_w}{k_D} w \right)^3 k_3 \exp(0,041\beta),$$

где k_{μ} – коэффициент неравномерности распределения концентрации золы по сечению: для встроенного в конвективную шахту воздухоподогревателя $k_{\mu} = 1,6$; для воздухоподогревателя вынесенной компоновки $k_{\mu} = 2,0$; 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_3 – коэффициент защиты: для ячеистой защиты и наставок большого диаметра $k_3 = 0,25$; при плавном входе в трубу $k_3 = 0,6$; для вставок $k_3 = 0,5$; если защиты нет, то $k_3 = 1,0$; β – угол (градусы) между вектором скорости набегающего на трубную доску потока продуктов сгорания и продольными осями теплообменных труб.

На основе данных, изложенных в [31], построены аппроксимационные зависимости скорости низкотемпературной коррозии металла от средней температуры стенки труб и приведенной сернистости сжигаемого топлива (рис. 2). Указанные зависимости были использованы в расчетах для определения низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей ВЗП.

Необходимые температуры газов и их объемы, значения скоростей, концентрации серы, золы и т. д. для проведения исследований абразивного износа и низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей нагрева определялись в результате поверочного расчета с использованием математической модели котлоагрегата.

Результаты исследования

На основе вышеизложенного материала проведены исследования на математической модели котла с целью определения оптимальных составов топлива для минимизации эксплуатационных издержек, связанных с изменением топлива, и увеличения межремонтного периода конвективных поверхностей нагрева ВЭК и ВЗП для повышения надежности работы котельного агрегата.

Исходя из полученных результатов поверочных расчетов на математической модели котла в номинальном режиме работы котла при сжигании различных топлив, используемых на ТЭЦ, в табл. 1 представлены итоговые параметры работы котлоагрегата.

Из результатов расчета (рис. 3, табл. 1) видно, что при номинальных нагрузках по паропроизводитель-

ности и давлению острого пара, при использовании разных углей, существенно отличаются расходы топлива, а также скорости коррозии, скорости абразивного износа ВЭК и ВЗП. Как следствие, отличается наработка поверхностей нагрева до износа и, соответственно, суммарные затраты на ремонт конвективных

поверхностей нагрева. На рис. 3 показано, что ВЭК 2 ступени характеризуется более высоким абразивным износом, обусловленным большей площадью проходного сечения по газам и, как следствие, несколько большей средней скоростью газов в трубках ВЗП 1 ступени, по сравнению с ВЗП 2 ступени.

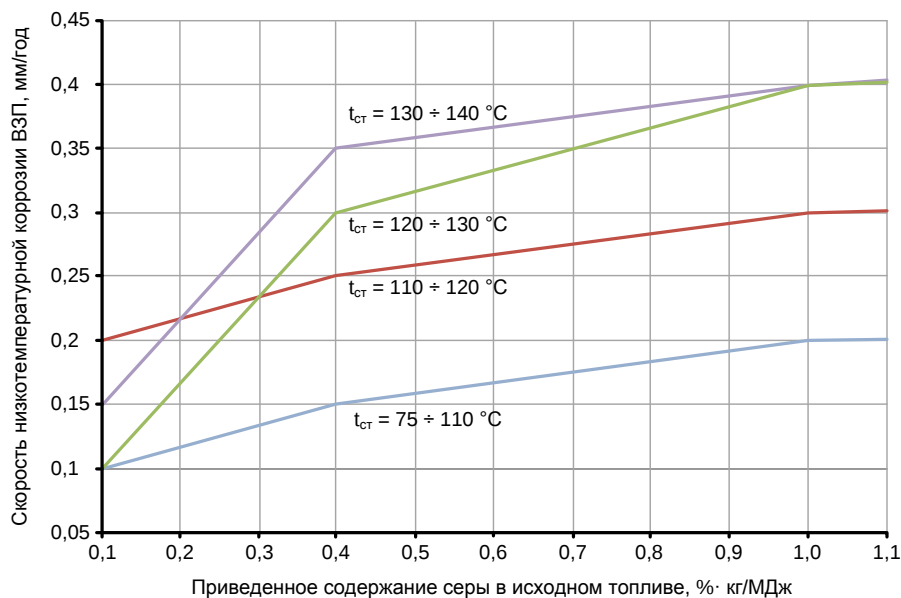


Рис. 2. Зависимость скорости низкотемпературной коррозии ВЗП от приведенного содержания серы в исходном топливе и средней температуры стенки

Fig. 2. Dependence of the low-temperature corrosion rate of the air heater on the reduced sulfur content in the initial fuel and the average wall temperature

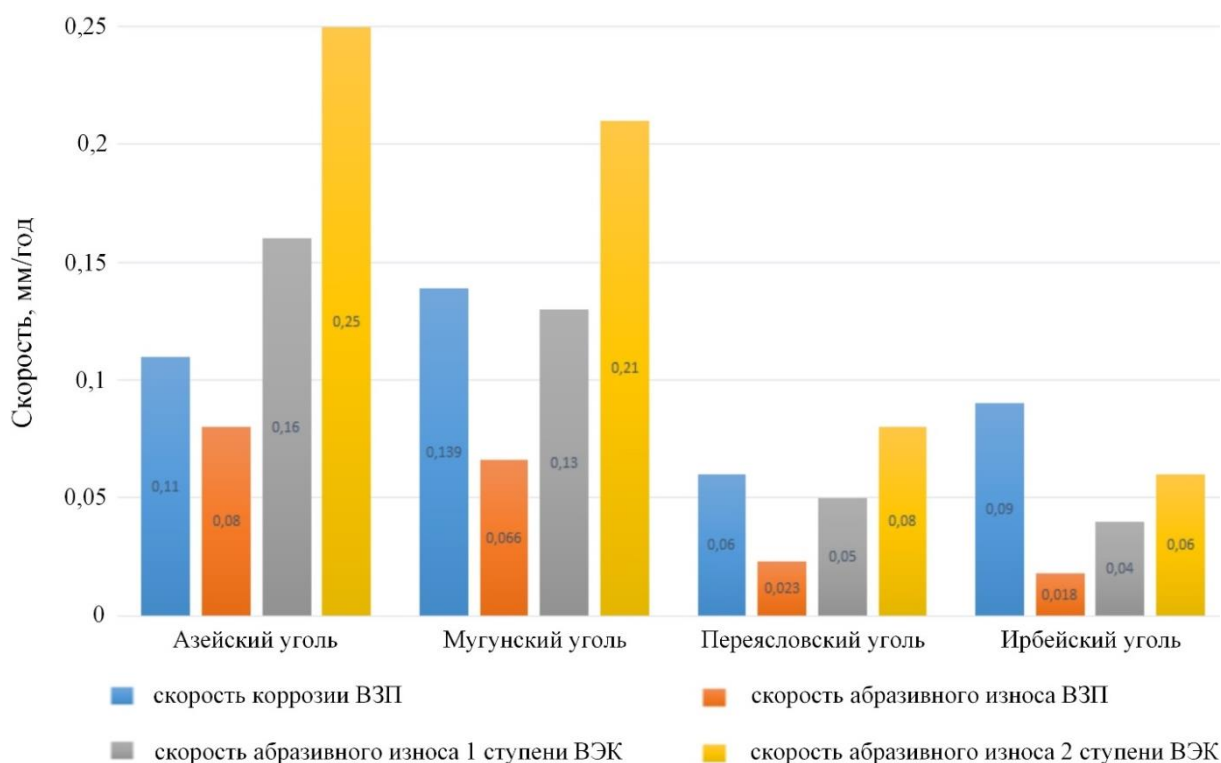


Рис. 3. Скорости коррозии и абразивного износа водяных экономайзеров и воздухоподогревателя

Fig. 3. Rates of corrosion and abrasive wear of water economizers and air heater

Таблица 1. Итоговые технико-экономические показатели работы котлоагрегата

Table 1. Technical and economic indicators of the boiler unit operation

Наименование параметра Parameter	Уголь/Coal			
	Азейский Azeisky	Мугунский Mugunsky	Переясловский Pereyaslovsky	Ирбейский Irbeysky
Расход топлива, кг/с/Coal consumption, kg/s	20,3	18,8	20,3	17,4
Паропроизводительность, кг/с/Steam capacity, kg/s	117			
Расход питательной воды, кг/с/Feed water consumption, kg/s	120,8	120,3	120,2	121,4
Температура уходящих газов/Flue gas temperature, °C	144,5	143,4	150,8	133,7
КПД котлоагрегата/Boiler efficiency, %	91,5	91,52	90,5	93,6
Температура точки росы/Dew point temperature, °C	111,0	121,6	93,1	109,1
Наработка до износа, лет/Operating time before wear, years	2,18	1,96	3,3	3,6
Суммарные эксплуатационные затраты, связанные с использованием углей разного состава, тыс. р. Total operating costs associated with the use of different coal composition, thousand rubles	300901	362702	142501	196500

Из табл. 1 видно, что экономически неэффективно использовать угли Азейского и Мугунского месторождений, но необходимо отметить, что Азейский уголь является проектным углем для котла БКЗ-420-140, а остальные угли используются энергетической компанией в качестве непроектных углей в смеси. Наибольший интерес представляет использование угля Переясловского месторождения в чистом виде с точки зрения эксплуатационных затрат. Наблюдаются существенные

изменения эксплуатационных затрат, включающие затраты на ремонт ВЭК и ВЗП, а также межремонтного интервала, связанные с жиганием углей разного состава. Поэтому проведены исследования с использованием смесей углей с целью усреднения эксплуатационных затрат и увеличения межремонтных периодов конвективных поверхностей котлоагрегата.

В табл. 2 даны результаты расчетов для смесей различных углей.

Таблица 2. Показатели работы котлоагрегата на различных угольных смесях

Table 2. Indicators of the boiler unit operation on various coal mixtures

Наименование параметра Parameter	Уголь/Coal, %			
	Азейский (7)+ Ирбейский (93) Azeisky (7)+ Irbeysky (93)	Азейский (23)+ Переясловский (77) Azeisky (23)+ Pereyaslovsky (77)	Переясловский (80)+ Мугунский (20) Pereyaslovsky (80)+ Mugunsky (20)	Ирбейский (95)+ Мугунский (5) Irbeysky (95)+ Mugunsky (5)
Расход топлива, кг/с Coal consumption, kg/s	17,6	20,3	20	17,5
Паропроизводительность, кг/с Steam capacity, kg/s	117			
Расход питательной воды, кг/с Feed water consumption, kg/s	120,9	120,2	120,3	120,8
Температура уходящих газов, °C Flue gas temperature, °C	134,2	149,4	149,4	133,9
КПД котлоагрегата, % Boiler efficiency, %	92,8	90,1	90,2	92,7
Температура точки росы, °C Dew point temperature, °C	109	98	102	110
Наработка до износа, лет Operating time before wear, years	2,28	2,42	2,39	2,3
Суммарные эксплуатационные затраты, связанные с использованием углей разного состава, тыс. р. Total operating costs associated with the use of different coal composition, thousand rubles	250650			

Как видно из табл. 2, при средних эксплуатационных затратах, связанных с использованием углей разного состава, в том числе на ремонт ВЭК и ВЗП, в размере 250650 р. использование всех предлагаемых смесей приводит примерно к одинаковому межремонтному периоду. Наибольший КПД котла при работе на смесях Азейский уголь (7 %) + Ирбейский уголь (93 %) и Ирбейский уголь (95 %) + Мугунский уголь (5 %).

Заключение

На базе программно-вычислительного комплекса СМПП-ПК разработана математическая модель кот-

лоагрегата БКЗ-420-140, настроенная на выполнение оптимизационных расчетов. Разработанная и верифицированная математическая модель котлоагрегата позволяет достаточно точно описывать происходящие в нем процессы, чем достигается необходимая сходимость параметров его работы, рассчитанных с применением математической модели, с параметрами эксплуатируемого оборудования. Это обеспечивается полнотой исходных данных и позволяет производить любые исследования без вмешательства в технологический процесс. Модели позволяют проводить оптимизационные расчеты по критериям энергетической и экономической эффективности.

Полученные результаты показывают существенные различия по суммарным затратам на ремонт конвективных поверхностей нагрева в результате использования непроектных углей. Наибольшую наработку до износа поверхностей нагрева котла показал режим работы на Переясловском угле, соответственно и наименьшие суммарные приведенные затраты на их ремонт. Наименьшая, в свою очередь, наработка получилась при работе на Мугунском угле, а также наибольшие затраты на ремонт поверхностей нагрева.

Получены результаты с использованием смесей углей, используемых на станции, с целью усреднения эксплуатационных затрат и повышения надежности работы котельного агрегата БКЗ-420-140. Экономия затрат при использовании вышеуказанных смесей ис-

пользуемых на станции углей максимально может достигать до 100 млн р. в год.

Предлагаемая методика определения технико-экономической эффективности установки на основе расчета суммарных ежегодных затрат на ремонт и эксплуатацию оборудования представляется весьма универсальной, поскольку позволяет учесть широкую область возможных изменений в условиях работы котлоагрегата, зависящих от изменения состава сжигаемого топлива по всей технологической линии.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН, номер темы FWEU-2021-0005, регистрационный номер: АААА-А21-121012190004-5, и ИРННТУ по направлению подготовки магистров 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuandykova A.A., Lebedev V.M. On the perspective of transfer of Omsk thermal power plants to combustion of fired coals // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2021. – № 14 (1). – P. 118–129. DOI: 10.17516/1999-494X-0292.
2. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565123539> (дата обращения 14.02.2022).
3. Роголев Н.Д., Зубкова А.Г., Мastroва И.В. Экономика энергетики. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 320 с.
4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 472 с.
5. Dynamic feed-in tariffs with reduced complexity and their impact on the optimal operation of a combined heat and power plant / O. Selinger-Lutz, A. Groß, B. Wille-Haussmann, Slide Wittwer // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – V. 118. – 105770. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105770> (дата обращения 15.02.2022).
6. Does district heating tariff motivate energy efficiency improvement? / I. Pakere, D. Blumberga, A. Kamenders, V. Vitoliņš. // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – Supplement. 4. – P. 410–418. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.087> (дата обращения 15.02.2022).
7. Stepanova E.L., Zharkov P.V. A technique for determining a relationship between the prices of heat and electricity generated by CHP // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 209. – 03025. – P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903025> (дата обращения 15.02.2022).
8. Kler A.M., Stepanova E.L., Zharkov P.V. Investigation of the operating modes of a cogeneration gas turbine plant with uncertainty in the prices of generated energy products and various climatic operating conditions // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Владивосток, 2020. – P. 1–5.
9. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A. Thermodynamic and economic analysis of effect of heat accumulator volume on the specific cost of heat production in the gas-steam CHP plant // Energy. – 2021. – V. 230. – 120828. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120828> (дата обращения 15.02.2022).
10. Бойко Е.А., Загородний И.В. Комплексное исследование интенсивности шлакования поверхностей нагрева котлоагрегата при сжигании непроектных топлив // Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 6. – С. 101–116. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116.
11. Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго» // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 639–648.
12. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 27–33.
13. Тайлашева Т.С., Гиль А.В., Воронцова Е.С. Оценка условий сжигания высоковолажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – № 1 (327). – С. 128–135.
14. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners // Energy. – 2019. – V. 186. 115844. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.174> (дата обращения 15.02.2022).
15. Сжигание непроектных марок угольного топлива на ТЭЦ / В.В. Васильев, М.Н. Назаров, А.А. Рубцов, С.Р. Янов // Новости теплоснабжения. – 2012. – № 05 (141).
16. Use of coals for cocombustion with estonian shale oil / P.V. Roslyakov, M.N. Zaichenko, D.A. Melnikov, V.A. Vereshetin, R. Attikas // Thermal Engineering. – 2016. – V. 63. – № 3. – P. 188–196.
17. Оценка возможности сжигания жеронского каменного угля на котлоагрегатах бкз-420-140 пт-2 усть-илимской тэц / А.Н. Кудряшов, Н.В. Кулагин, А.В. Синицкая, Ю.Д. Бибикина // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 2 (121). – С. 106–117. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-106-117.
18. Optimisation of coal fineness in pulverised-fuel boilers / M. Pronobis, K. Mroczek, M. Tymoszek, S. Ciukaj, R. Wejkowski, T. Janda, K. Jagodzińska // Energy. – 2017. – V. 139. – P. 655–666. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.057> (дата обращения 15.02.2022).
19. Mbabazi J.G., Sheer T.J., Shandu R. A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles // Wear. – 2004. – V. 257. – I. 5–6. – P. 612–624. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.007> (дата обращения 15.02.2022).
20. Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers / R. Nagarajan, B. Ambedkar, S. Gowrisankar, S. Somasundaram // Wear. – 2009. – V. 267. – Iss. 1–4. – P. 122–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.057> (дата обращения 15.02.2022).
21. Experimental study on fouling and slagging behaviors during oxy-fuel combustion of high-sodium coal using a high-temperature drop-tube furnace / Slide Wang, R. Sun, L. Zhao, Slide Wang, G. Hu, N. Zhao, D. Che // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2020. – V. 97. 103054. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103054> (дата обращения 15.02.2022).
22. Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 209. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002> (дата обращения 15.02.2022).
23. Kler A., Alekseiuk V., Maksimov A. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 114. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911406009> (дата обращения 15.02.2022).
24. Zabuga F., Alekseiuk V. Research based on mathematical modeling of CHP-10 power unit No 5 «Baikal Energy Company»

- LLC to assess the efficiency of its modernization // E3S Web of Conferences. – 2021. – V. 289. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902002> (дата обращения 15.02.2022).
25. Penkovskii A., Stennikov V., Postnikov I. Unified heat supply organization: Mathematical modeling and calculation // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 3439–3444. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.930.
26. Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Integrated energy supply schemes on basis of cogeneration plants and wind power plants // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 154–159. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.063.
27. Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Prosumer in the district heating systems: operating and reliability modeling // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 2530–2535. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.411.
28. Stepanova E.L., Maximov A.S. The optimization problems of CP operation // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 891 (1). – 012215. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012215.
29. Гриценко М.В., Клер А.М., Степанова Е.Л. Комплексная методика определения затрат при использовании на ТЭС различных видов твердого топлива // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 4. – С. 99–110.
30. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод, издание 2-е) / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский, Э.С. Карасина. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
31. 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.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Тюрина Э.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; заведующая кафедрой теплоэнергетических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

Медников А.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

UDC 621.18

DIGITAL MODEL OF WEAR OF HEAT EXCHANGE CONVECTIVE SURFACES OF A CHARCOAL BOILER

Elina A. Tyurina^{1,2},
tyurina@isem.irk.ru

Aleksandr S. Mednikov¹,
mednikov@isem.irk.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to use off-design coals on the operating equipment of TPPs. As you know, the use of such coals can adversely affect the operation, first of all, of a coal-fired boiler.

The main aim of the research was to determine the overhaul period as well as the rate of low-temperature corrosion and the rate of abrasive wear of convective surfaces (air heater and water economizer) caused by the use of various coals (Azeisky, Mugunsky, Pereyaslovsky and Irbeysky deposits) and their mixtures.

Methods: mathematical modeling and complex optimization studies on models using System of Computer-Aided Construction of Programs, designed to generate mathematical models of the investigated installations based on mathematical models of individual elements, information on technological relations between them, and calculation purposes. This complex was developed at the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Results. To assess the consequences of the use of non-design fuel, a sufficiently accurate mathematical model of the BKZ-420-140 steam boiler has been developed. Research was carried out on a mathematical model of the boiler in order to determine the optimal fuel compositions to minimize the operating costs associated with changing the fuel, and to increase the overhaul period of convective heating surfaces to improve the reliability of the boiler unit. The approximate dependences of the rate of low-temperature corrosion of metal on the average temperature of the pipe wall and the sulfur content of the combusted fuel are constructed. The technical and economic indicators of the boiler unit operation were obtained on the coals of the Azeisky, Mugunsky, Pereyaslovsky and Irbeysky deposits, as well as on coal mixtures (Azeysky coal (7 %) + Irbeysky coal (93 %), Azeysky coal (23 %) + Pereyaslovsky coal (77 %), Pereyaslovsky coal (80 %) + Mugunsky coal (20 %), Irbeysky coal (95 %) + Mugunsky coal (5 %)).

Key words:

Coal-fired boiler, abrasive wear, low-temperature corrosion, off-design coal, mathematical modeling, overhaul period.

The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021–2030, and INRTU in master training program 13.04.01 «Heat power engineering and combustion engineering».

REFERENCES

1. Kuandykova A.A., Lebedev V.M. On the perspective of transfer of Omsk thermal power plants to combustion of fired coals. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, no. 14 (1), pp. 118–129. DOI: 10.17516/1999-494X-0292.
2. *Programma razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii na period do 2035 goda* [Development program of the coal industry in Russia for the period up to 2035]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/565123539> (accessed 14 February 2022).
3. Rogalev N.D., Zubkova A.G., Mastrova I.V. *Ekonomika energetiki* [Energy economics]. Moscow, MEI Publ., 2011. 320 p.
4. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [Heating and heating networks]. Moscow, MEI Publ., 2006. 472 p.
5. Selinger-Lutz O., Groß A., Wille-Haussmann B., Wittwer Slide Dynamic feed-in tariffs with reduced complexity and their impact on the optimal operation of a combined heat and power plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 118, 105770. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105770> (accessed 15 February 2022).
6. Pakere, D. Blumberga, A. Kamenders, V. Vitoliņš. Does district heating tariff motivate energy efficiency improvement? *Energy Reports*, 2021, vol. 7 (4), pp. 410–418. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.087> (accessed 15 February 2022).
7. Stepanova E.L., Zharkov P.V. A technique for determining a relationship between the prices of heat and electricity generated by CHP. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 209, 03025, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903025> (accessed 15 February 2022).
8. Kler A.M., Stepanova E.L., Zharkov P.V. Investigation of the operating modes of a cogeneration gas turbine plant with uncertainty in the prices of generated energy products and various climatic operating conditions. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271592.
9. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A. Thermodynamic and economic analysis of effect of heat accumulator volume on the specific cost of heat production in the gas-steam CHP plant. *Energy*, 2021, vol. 230, 120828. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120828> (accessed 15 February 2022).
10. Boiko E.A., Zagorodnii I.V. Integrated research of slaging intensity of the boiler unit heating surfaces when burning non-project fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2020, vol. 22 (6), pp. 101–116. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116> (accessed 15 February 2022).
11. Koval T.V., Kudryashov A.N. Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, *JSC. iPolytech Journal*, 2020, vol. 24 (3), pp. 639–648. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648> (accessed 15 February 2022).
12. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desiatkov I.A. Determination of peat ash fusibility of Kirov region deposits. *Power engineering: re-*

- search, equipment, technology, 2018, vol. 20 (11–12), pp. 27–33. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33> (accessed 15 February 2022).
13. Taylasheva T.S., Gil A.V., Vorontsova E.S. Evaluation of the conditions for combustion of high-moisture non-design fuel in a chamber furnace based on numerical modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 1, no. 327, pp. 128–135. In Rus.
 14. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners. *Energy*, 2019, vol. 186, 115844. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.174> (accessed 15 February 2022).
 15. Vasiliev V.V., Nazarov M.N., Rubtsov A.A., Yanov S.R. Szhi-ganiye neproyektnykh marok ugolnogo topliva na TETS [Combustion of off-design grades of coal fuel at CHP]. *Novosti teplosnab-zheniya*, 2012, no. 05 (141).
 16. Roslyakov P.V., Zaichenko M.N., Melnikov D.A., Vereshetin V.A., Attikas R. Use of coals for cocombustion with estonian shale oil. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 3, pp. 188–196.
 17. Kudryashov A.N., Kulagin N.V., Sinitskaya A.V., Bibikova Yu.D. Assessing possibility of burning Zheronsky coal by Ust-Ilim CHP boiler units BKZ-420-140PT-2. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 106–117. In Rus. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-106-117.
 18. Pronobis M., Mroczek K., Tymoszek M., Ciukaj S., Wejkowski R., Janda T., Jagodzińska K. Optimisation of coal fineness in pulverised-fuel boilers. *Energy*, 2017, vol. 139, pp. 655–666. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.057> (accessed 15 February 2022).
 19. Mbabazi J.G., Sheer T.J., Shandu R. A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles. *Wear*, 2004, vol. 257, no. 5–6, pp. 612–624. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.007> (accessed 15 February 2022).
 20. Nagarajan R., Ambekar B., Gowrisankar S., Somasundaram S. Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers. *Wear*, 2009, vol. 267, no. 1–4, pp. 122–128. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.057> (accessed 15 February 2022).
 21. Wang Slide, Sun R., Zhao L., Wang Slide, Hu G., Zhao N., Che D. Experimental study on fouling and slagging behaviors during oxy-fuel combustion of high-sodium coal using a high-temperature drop-tube furnace. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, vol. 97, 103054. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103054> (accessed 15 February 2022).
 22. Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 209. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>.
 23. Kler A., Alekseiuk V., Maksimov A. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 114. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911406009>.
 24. Zabuga F., Alekseiuk V. Research based on mathematical modeling of CHP-10 power unit No 5 «Baikal Energy Company» LLC to assess the efficiency of its modernization. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 289. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902002>.
 25. Penkovskii A., Stennikov V., Postnikov I. Unified heat supply organization: mathematical modeling and calculation. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 3439–3444. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.930.
 26. Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Integrated energy supply schemes on basis of cogeneration plants and wind power plants. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 154–159. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.063.
 27. Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Prosumer in the district heating systems: Operating and reliability modeling. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 2530–2535. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.411.
 28. Stepanova E.L., Maximov A.S. The optimization problems of CP operation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 891 (1), 012215. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012215.
 29. Gritsenko M.V., Kler A.M., Stepanova E.L. Kompleksnaya metodika opredeleniya zatrat pri ispolzovanii na TES razlichnykh vidov tverdogo topliva [Comprehensive methodology for determining costs when using various types of solid fuel at TPPs]. *Nauchny vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 4, pp. 99–110.
 30. Kuznetsov N.V., Mitor V.V., Dubovsky I.E., Karasina E.S. *Teplovoy raschet kotelnikh agregatov (normativny metod, izdanie 2-e)* [Thermal calculation of boiler units (normative method, 2nd ed.)]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 296 p.
 31. *Metodicheskie ukazaniya po preduprezhdeniyu nizkotemperaturnoy korrozii poverkhnostey nagreva i gazokhodov kotla. RD 34.26.105* [Methodical instructions for the prevention of low-temperature corrosion of heating surfaces and boiler gas ducts. RD 34.26.105]. Moscow, F.E. Dzerzhinskii VTI Publ., 1984 (ed. 1995). 6 p.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Elina A. Tyurina, Dr. Sc., leading researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; head of the department, Irkutsk National Research Technical University.

Aleksandr S. Mednikov, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.