

DOI: 10.18721/JEST.230307

УДК 621.181:622.612

А.А. Тринченко, А.П. Парамонов, М.Р. Кадыров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВИХРЕВОЕ СЖИГАНИЕ КАК СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОЩНОГО КОТЛА

Требованиями нормативных документов в области защиты окружающей среды предписано выполнять установленные нормы выбросов как при новом строительстве объектов энергетики, так и при совершенствовании энергетического оборудования. В работе представлены результаты численного исследования низкотемпературного вихревого сжигания в котле П-49 блока 500 МВт Назаровской ГРЭС для экологического обоснования проекта его технического перевооружения на низкотемпературную вихревую технологию. С использованием разработанных модели, методики и компьютерной программы проведены расчеты топочного процесса и выполнена количественная оценка уровня выбросов оксидов азота модернизируемого котла. Результаты моделирования и опытными данными, полученными при проведении пусконаладочных и балансовых испытаний котла П-49 с НТВ-топкой, подтверждено, что организация вихревого сжигания позволила повысить эффективность работы, ликвидировать шлакование, значительно сократить выбросы оксидов азота, улучшить воспламенение и выгорание топлива. ЭНЕРГЕТИКА; ТОПЛИВО; ТОПОЧНАЯ КАМЕРА; ГОРЕНИЕ; ГАЗООБРАЗНЫЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Ссылка при цитировании:

А.А. Тринченко, А.П. Парамонов, М.Р. Кадыров. Низкотемпературное вихревое сжигание как способ улучшения экологических показателей мощного котла // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 3. С. 74–87. DOI: 10.18721/JEST.230307

A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov, M.R. Kadyrov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

LOW-TEMPERATURE SWIRL BURNING AS A METHOD FOR IMPROVING THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A HIGH-POWER BOILER

The normative documents in the field of environmental protection require that the established emission standards be met both in the construction of new energy facilities and in the improvement of energy equipment. The study presents the results of numerical research on low-temperature vortex burning in a P-49 boiler of the 500 MW block of the Nazarovsky state district power plant for ecological justification of the project of its modernization to low-temperature swirl technology. Using the developed models, technique and the computer program, calculations of furnace process were carried out and quantitative assessment of the emissions level of nitrogen oxides for the modernized boiler was executed. The results of modeling and the experimental data obtained when carrying out commissioning and balance tests of the P-49 boiler with the LTS fire chamber confirmed that introducing swirl burning has allowed to increase overall performance, to eliminate slagging, to considerably reduce emissions of nitrogen oxides, to improve ignition and burning out of fuel. ENERGY; FUEL; COMBUSTION CHAMBER; BURNING; GASEOUS POLLUTANTS; MATHEMATICAL MODEL

Citation:

A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov, M.R. Kadyrov, Low-temperature swirl burning as a method for improving the environmental performance of a high-power boiler, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (03) (2017) 74–87, DOI: 10.18721/JEST.230307

Введение

Реконструкция котельно-топочного оборудования в современных условиях невозможна без выполнения нормативов по уровню выбросов в атмосферу токсичных составляющих продуктов сгорания топлива. Предельное содержание загрязнителей в уходящих дымовых газах котлов установлено соответствующим стандартом* и зависит от технологии сжигания, вида топлива и мощности котельной установки. При выборе способа сжигания одним из определяющих факторов, наряду с высокими технико-экономическими показателями, являются его возможности в обеспечении установленных нормативов выбросов вредных веществ (прежде всего оксидов азота и серы). Предъявляемым требованиям в полной мере соответствует низкотемпературная вихревая (НТВ) технология сжигания**,***, разработанная в Ленинградском политехническом институте (ныне Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого) под руководством профессора В.В. Померанцева [1]. НТВ-технология прошла апробацию при сжигании широкой гаммы топлив [2–5], теплота сгорания которых колеблется от 7,5 до 17,6 МДж/кг. Положительный опыт последних лет по внедрению НТВ-технологии на котлах малой и средней мощности при сжигании каменных углей (котел БКЗ-85 МУП «Южная тепловая станция» г. Рубцовска, Алтайский край) [6], бурых углей (котел БКЗ-220 Новомосковской ГРЭС) [7], а также опыт создания многотопливной топки котла БКЗ-210 Кировской ТЭЦ-4 для сжигания фрезерного торфа, каменного угля и природного газа [8–10] позволил предложить ее в качестве альтернативы прямоточному пылеугольному факелу при техническом перевооружении котла П-49 блока 500 МВт Назаровской ГРЭС, что определило направление исследования.

Цель настоящей работы — численное исследование генерации и преобразования газо-

вых загрязнителей при организации низкотемпературного вихревого сжигания в котле П-49 Назаровской ГРЭС для повышения экологических показателей его работы.

Объект и методы исследования. Котел П-49 Назаровской ГРЭС ст. № 7 ($D_{\text{пп}} = 1600$ т/ч, $p_{\text{пп}} = 25 \cdot 10^6$ Па, $t_{\text{пп}} = 818$ К) — прямоточный, с жидким шлакоудалением (расчетный коэффициент шлакоулавливания — 0,4), уравновешенной тягой — предназначен для работы в блоке с турбиной К-500-240. Котел состоит из двух корпусов с трехходовой компоновкой, работающих независимо друг от друга (рис. 1). Расчетное топливо для котла — сушенка назаровского бурого угля.

Длительный опыт эксплуатации на сильно шлакующих назаровских углях показал, что работа котла П-49 характеризуется следующими недостатками:

1. Максимальная длительная нагрузка котла составляет 75–80 % от номинальной (1200–1280 т/ч) по условию шлакования ширмовых поверхностей нагрева, расположенных на выходе из топки. Высокая температура газов на выходе из топки обусловлена повышенной влажностью расчетного топлива (сушенки) и неудовлетворительной аэродинамикой топки и горелочных устройств.

2. Фактический КПД брутто котла находится на уровне 88–89 % при расчетном — 92 %. Основная причина низкого КПД — высокие потери с уходящими газами ($v_{\text{ух г}} = 473\text{--}493$ К, $\alpha_{\text{ух г}} \approx 1,72$).

3. Минимальная нагрузка котла составляет 550 т/ч по условию стабильного выхода шлака.

4. Выбросы оксидов азота превышают нормативные значения и составляют 1000–1200 мг/нм³.

При проведении технического перевооружения котла П-49 с переводом на низкотемпературную вихревую технологию сжигания назаровского бурого угля проектом предусматривается монтаж новой топки. В нижней части топки фронтальной и задней экраны образуют скаты «холодной» воронки, которые перекрывают друг друга в плане (по осям экранных труб) на 50 мм. В средней части топки панели фронтальной стены НРЧ образуют фронтальной аэродинамический выступ с вылетом в топку, который предназначен для формирования вихревой зоны топки. Для снижения максимальных температур и температуры на выходе из топки в вихревой зоне установлены 10 внутритопочных ширм [11, 12].

* ГОСТ Р 50831–95 «Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.»

** Патент РФ № 2253801. Вихревая топка / Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Приоритет 10.06.2005.

*** Патент Евразийский № 008691. Вихревая топка / Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Приоритет 29.06.2007.

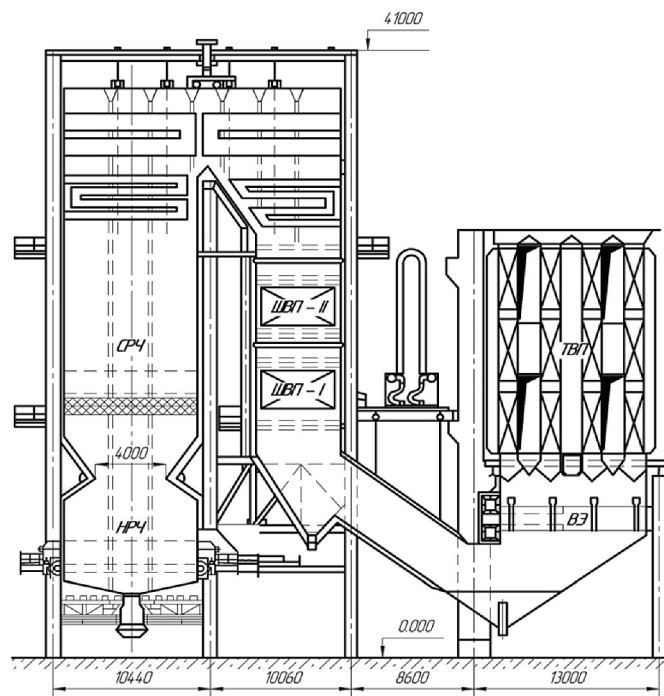


Рис. 1. Общий вид корпуса котла П-49 ст. № 7 Назаровской ГРЭС

Fig. 1. General view of the P-49 boiler № 7 of Nazarovsky state district power plant

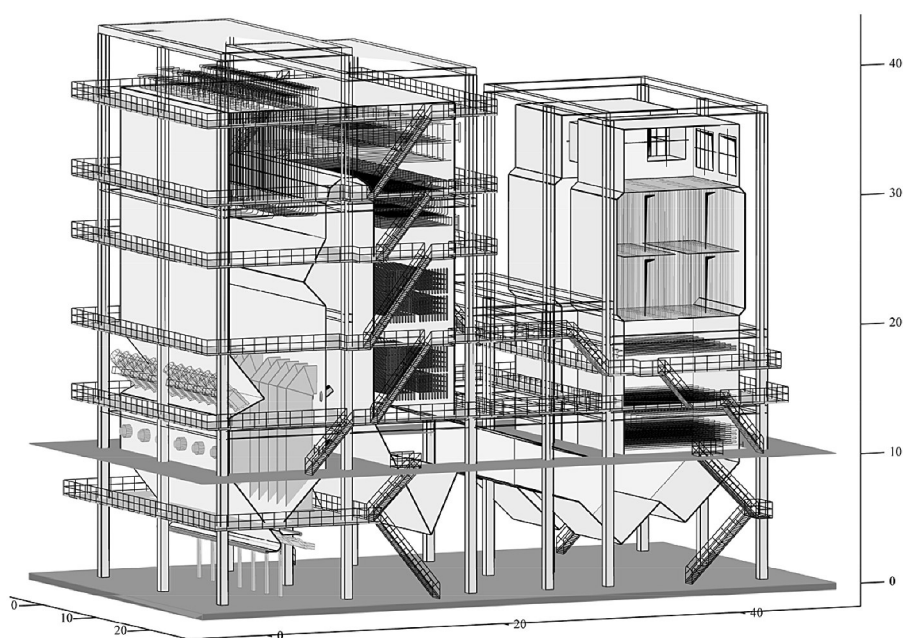


Рис. 2. Модель корпуса котла П-49

Fig. 2. P-49 boiler hull model



Расчетные исследования горения топлива, генерации и преобразования газообразных загрязнителей проводились с использованием математической модели котла П-49 ст. № 7 (корпус А) Назаровской ГРЭС с низкотемпературной вихревой технологией сжигания (рис. 2). Разработанная модель отражает принятые конструктивные решения и позволяет производить изменения, необходимые для оптимизации конструктивных характеристик и режимных параметров работы. При проведении вариантных расчетов могут быть изменены как геометрические размеры элементов модели, так и качественные (вид, состав твердого топлива, его помол и др.), а также количественные (расход топлива, скорости и температуры горелочного воздуха, воздуха нижнего и третичного дутья и пр.) характеристики процесса.

Модель прямоточной двухканальной твердотопливной горелки (рис. 3, а) разработана с использованием данных проекта и изготовленного макета (рис. 3, б). Для возможности проведения анализа сепарационных характеристик системы нижнего дутья (СНД) каждый блок СНД смоделирован в двухсопловом исполнении (рис. 4), а для учета влияния на процесс горения третичного дутья нижнего и среднего ярусов по ширине топки смоделированы соответствующие вводы. Влияние на температурные характеристики процесса горения внутритопочных ширм производится путем учета в нижней вихревой зоне соответствующей тепловоспринимающей поверхности.

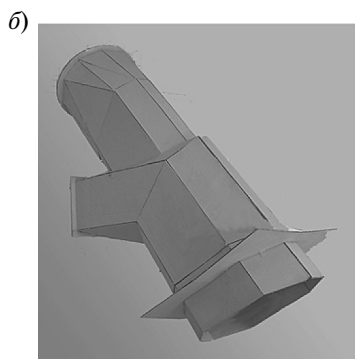
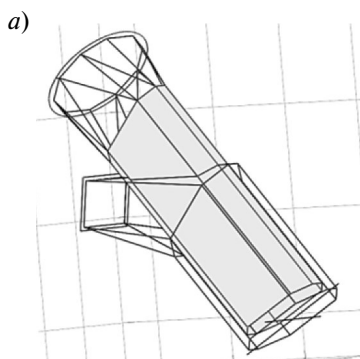


Рис. 3. Прямоточная двухканальная твердотопливная горелка котла П-49:

а — модель горелки; б — макет горелки

Fig. 3. Direct-flow two-channel solid-fuel torch of P-49 boiler:

а — torch model; б — torch model

Проект технического перевооружения котла П-49 Назаровской ГРЭС на низкотемпературную вихревую технологию сжигания предусматривает возможность использования в котле сушенки назаровского бурого угля. Приведем его теплотехнические характеристики и гранулометрический состав.

Элементарный состав, %, топлива:

Влага, W_f	24,0
Зола, A_f	10,0
Сера, S_f	0,49
Углерод, C_f	46,22
Водород, H_f	3,2
Азот, N_f	0,49
Кислород, O_f	15,6

Низшая теплота сгорания:

ккал/кг	4150
МДж/кг	17,35

Выход летучих на сухое

беззольное состояние, V^{daf}	47
---------------------------------------	----

Гранулометрический состав пыли, %:

полный остаток на сите 100 мкм, R_{100}	70
полный остаток на сите 200 мкм, R_{200}	40

Анализ теплотехнических характеристик проектного топлива и расчетные оценки показали: генерация оксидов серы в процессе горения топлива не превысит уровня 1450–1600 мг/нм³, что удовлетворяет требованиям действующих нормативов (2000 мг/нм³). Концентрации оксидов азота находились с использованием разработанной модели расчета процесса горения в НТВ топке котла П-49 полифракционно-го топлива с учетом его гранулометрических характеристик.

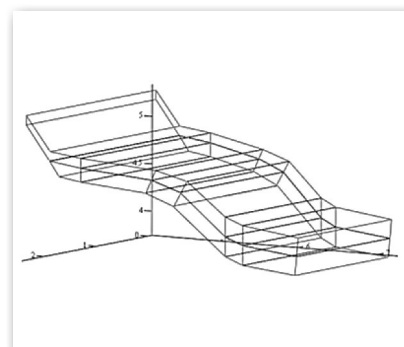


Рис. 4. Модель блока системы нижнего дутья котла П-49

Fig. 4. Model of the lower blasting system block of П-49 boiler

Моделирование объекта исследования

Модель топочного процесса основана на диффузионно-кинетической теории горения, учитывает генерацию и преобразование оксидов азота при горении топлива и позволяет проводить количественные оценки выбросов NO_x при работе котла.

Расход натурального твердого топлива полифракционного состава, подаваемого в топочную камеру, пересчитывался на эквивалентный расход шарообразных частиц. Рассеивочная кривая разбивалась на $N = 10$ фракций, каждая из которых характеризуется своим средним диаметром.

Размеры топливных частиц, их число на 1 кг расчетного топлива, масса в пределах каждой фракции и площадь начальной поверхности реагирования, находились путем обработки рассеивочной кривой исходного топлива. Распределение частиц исходной пыли по размерам описывалось зависимостью Розина — Раммлера — Беннета:

$$R_{0i} = \exp(-b\delta_{0i}^n), \quad (1)$$

где b и n — опытные коэффициенты, характеризующие соответственно тонкость помола и равномерность зернового состава.

Средний расчетный размер самых мелких частиц составил 44 мкм (1-я группа). Размер самой крупной частицы δ_{01} составил 880 мкм при среднем размере в 10-й группе 837 мкм (рис. 5). Показатель полидисперсности $n = 1,36$.

Рассмотрение процесса горения с диффузионно-кинетических позиций [13] позволило составить систему нелинейных дифференциальных уравнений диффузии и кинетики типа

$$\begin{cases} dG_j = -\frac{D}{RT} \frac{d^2 p_j}{dx^2} dx; \\ G_j = \frac{\alpha_D}{RT} (p_j - p_{j0}); \\ \frac{dG_i}{d\tau} = C_i k_i \end{cases} \quad (2)$$

с учетом окислительных и восстановительных реакций, идущих на поверхности частиц, и гомогенных реакций, протекающих в пределах пограничного слоя.

Расчеты показали, что процесс горения протекает в промежуточной области по схеме двойного горящего пограничного слоя (случай «молочной» газификации) (рис. 6).

В результате решения системы уравнений (2) получено выражение для потока углерода, выгорающего с поверхности частиц, (кмоль/(м²·с))

$$G_c = \frac{\alpha_D}{RT} \left[\frac{N_3}{1 + N_3} p_{\text{CO}_2\Delta} + \frac{N_{3'}}{1 + N_{3'}} (p_{\text{O}_2\Delta} + 0,5 p_{\text{H}_2\text{O}\Delta}) + \frac{N_5}{1 + N_5} p_{\text{NO}\Delta} \right], \quad (3)$$

и зависимости для расчета убыли массы и размера частицы

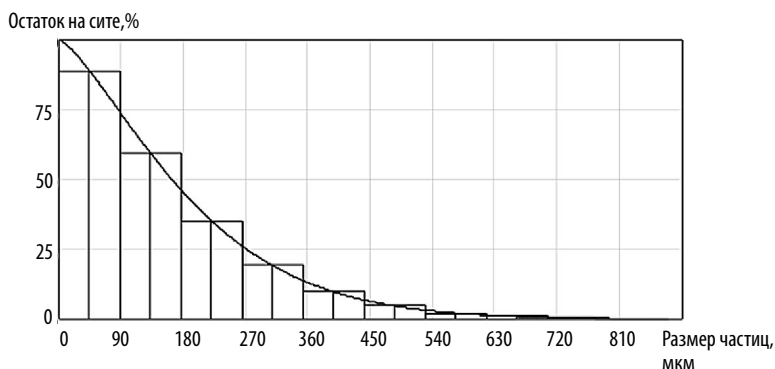


Рис. 5. Обработка рассеивочной кривой сушенки назаровского бурого угля ($W^r = 24\%$, $A^r = 10\%$, $R_{100} = 70\%$, $R_{200} = 40\%$)

Fig. 5. Processing of the sieving curve of nazarovsky brown coal ($W^r = 24\%$, $A^r = 10\%$, $R_{100} = 70\%$, $R_{200} = 40\%$)

$$\begin{cases} \frac{dm}{d\tau} = \frac{dm_{\text{вр}}}{d\tau} + \frac{dm_{\text{лет}}}{d\tau} + \frac{dm_{\text{с}}}{d\tau} \text{ кг/с;} \\ \frac{dm_{\text{с}}}{d\tau} = -G_{\text{с}} M_{\text{с}} \pi \delta^2 \text{ кг/(м}^2 \text{с);} \\ \frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{2M_{\text{с}}}{\rho_{\text{с}}} G_{\text{с}} \text{ м/с,} \end{cases} \quad (4)$$

где $M_{\text{с}} = 12 \text{ кг/кмоль}$ — молярная масса углерода; $m = \pi/6 \cdot \delta_{\text{экр}}^3 \cdot \rho$ — масса сферической частицы, кг; $f_{\text{пов}} = \pi \cdot \delta_{\text{экр}}^2$ — площадь наружной поверхности, м^2 .

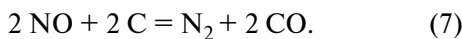
Распределение концентраций NO по сечению топки (поле концентраций) в известном поле скоростей газового потока определялось путем численного решения (схема «против потока» [14]) дифференциального уравнения массообмена при наличии источникового члена (зоны генерации NO):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho C_{\text{NO}}) + \nabla (\rho \vec{w} C_{\text{NO}}) = \\ = \rho D_{\text{NO}} \nabla^2 C_{\text{NO}} + J_{\text{NO}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_{NO} — массовая концентрация оксидов азота; w — скорость газового потока; D_{NO} — средний эффективный коэффициент диффузии NO в смеси топочных газов; J_{NO} — интенсивность генерации оксидов азота (мощность источника NO [15]),

$$J_{\text{NO}} = \begin{cases} \frac{dN_{2i}}{d\tau_i} = k_{01} e^{-\frac{E_1}{RT_i}} (1/T_i) [N_i]^2; \\ \frac{dNO_{x_i}}{d\tau_i} = k_{02} e^{-\frac{E_2}{RT_i}} (1/T_i) [O_2]_i^{1,8} [N]_i. \end{cases} \quad (6)$$

Количество оксидов азота, разложившихся на поверхности горящих углеродных частиц, рассчитывается из баланса реакции



Для определения векторов скорости газоздушных потоков в объеме топки котла использована расчетная схема (рис. 7), положение характерных точек которой (рис. 7, а) задавалось в трехмерном пространстве декартовой системы координат [6, 7, 10]. Скорости ввода потоков воздуха нижнего дутья, третичного дутья нижнего и среднего яруса приняты согласно проектным

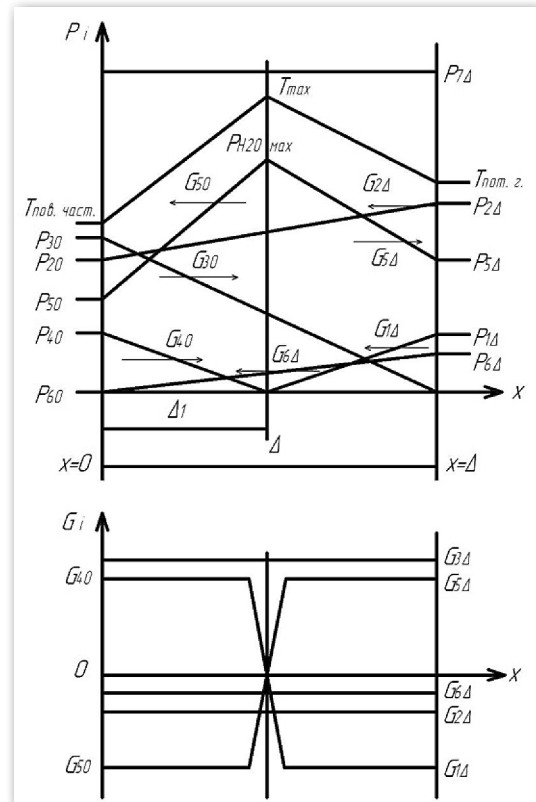


Рис. 6. Распределение парциальных давлений и потоков компонентов в приведенной пленке крупной коксовой частицы

(индексы 1 — O_2 ; 2 — CO_2 ; 3 — CO ; 4 — H_2 ; 5 — H_2O ; 6 — NO ; 7 — N_2 ; 0 — поверхность частицы; Δ — поток)

Fig. 6. Distribution of partial pressure and flows components in the given film of coarsened coke particle

(index 1 — O_2 ; 2 — CO_2 ; 3 — CO ; 4 — H_2 ; 5 — H_2O ; 6 — NO ; 7 — N_2 ; 0 — particle surface; Δ — flow)

данным и могут варьироваться в зависимости от нагрузки.

Векторы скорости газоздушных потоков (рис. 7, б) с учетом характеристик дутья находились (с использованием программного комплекса Ansys Fluent) в узловых точках элементарных ячеек (рис. 7, в), на которые разбивалась топочная камера. При этом характерный размер каждой из элементарных ячеек не превышает 200 мм.

Температуры в характерных зонах НТВ топки котла П-49 для расчета констант скорости химических реакций определены в результате зонального теплового расчета (рис. 8) с учетом влияния внутритопочных ширм. Увеличение площади тепловоспринимающей поверхности

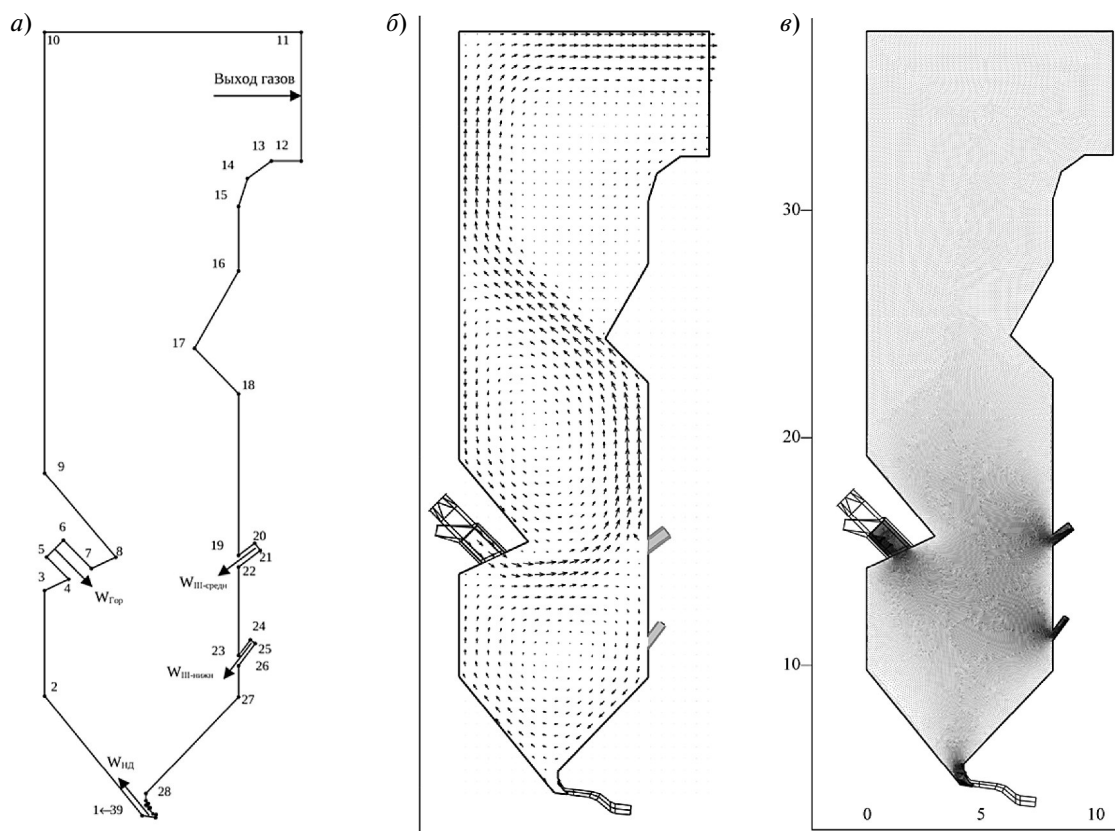


Рис. 7. Расчетная схема для определения векторов скорости газоздушных потоков в модели топки котла П-49:

a — схема НТВ-топки котла П-49; *б* — проекции векторов скорости газоздушных потоков на координатные оси; *в* — узловые точки для определения векторов скорости газоздушных потоков

Fig. 7. The design scheme for determining the velocity vectors of gas-air flows in the model of the boiler furnace P-49:

a — scheme of P-49 boiler LTS-furnace; *б* — projections of air-gas flows speed vectors in the LTS fire chamber of P-49 boiler on coordinate axes; *в* — nodal points for definition of the air-gas flows speed vectors

топки при установке внутритопочных ширм (рис. 8, *a*) снизило расчетный максимум температур с 1400–1450 °С в варианте без ширм (рис. 8, *б*) до 1250–1300 °С в варианте с ширмами (рис. 8, *в*). Кроме того, установка внутритопочных ширм в нижней вихревой зоне влечет за собой дополнительное снижение температуры газов на выходе из топки (на 50–100 °С), что положительно отразится на работе ширмовых поверхностей нагрева, расположенных в районе выходного окна.

Поля концентраций основных реагирующих газовых компонентов (рис. 9) для расчета процесса горения (зависимости (3)–(6)) принимались характерными для НТВ топок [16].

Результаты численного исследования топочного процесса, анализ генерации и преобразования оксидов азота

Техническое перевооружение котла П-49 Назаровской ГРЭС на низкотемпературную вихревую технологию сжигания предусматривает возможность использования в котле сушенки назаровского бурого угля, подготовленной на центральном пылезаводе.

Аэродинамическая картина течений (рис. 10) дает возможность определить вектор скорости потока в любой точке топочной камеры, использовать его проекции на координатные оси для расчетов траекторий движения реагирующих

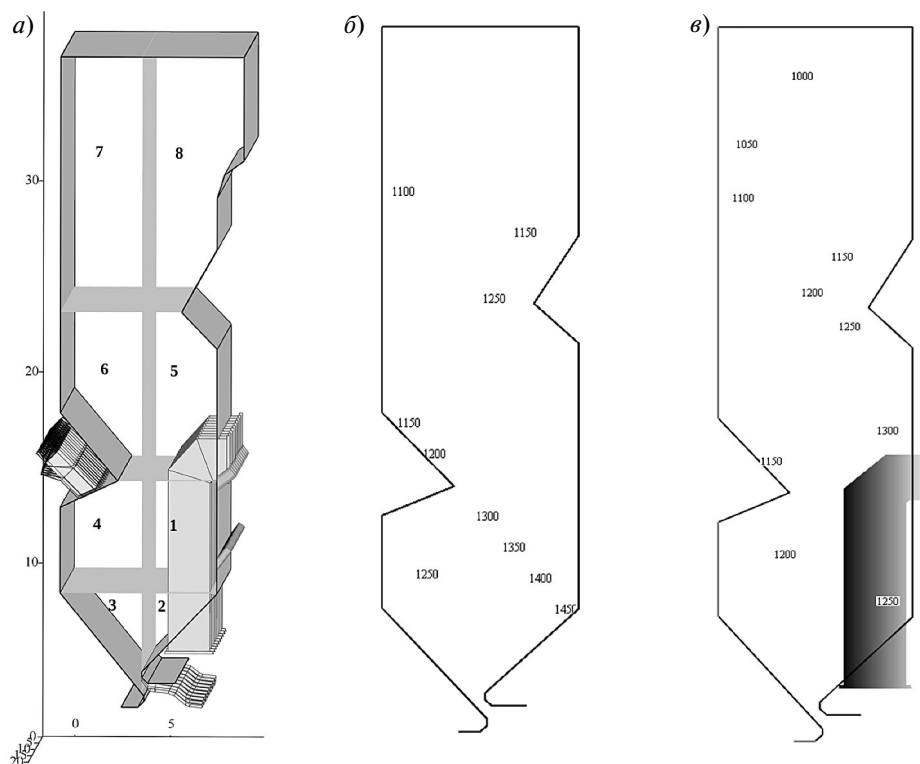


Рис. 8. Результаты зонального теплового расчета топки котла П-49 (НТВ)

Fig. 8. Results of zone thermal calculation of P-49 (LTS) boiler fire chamber

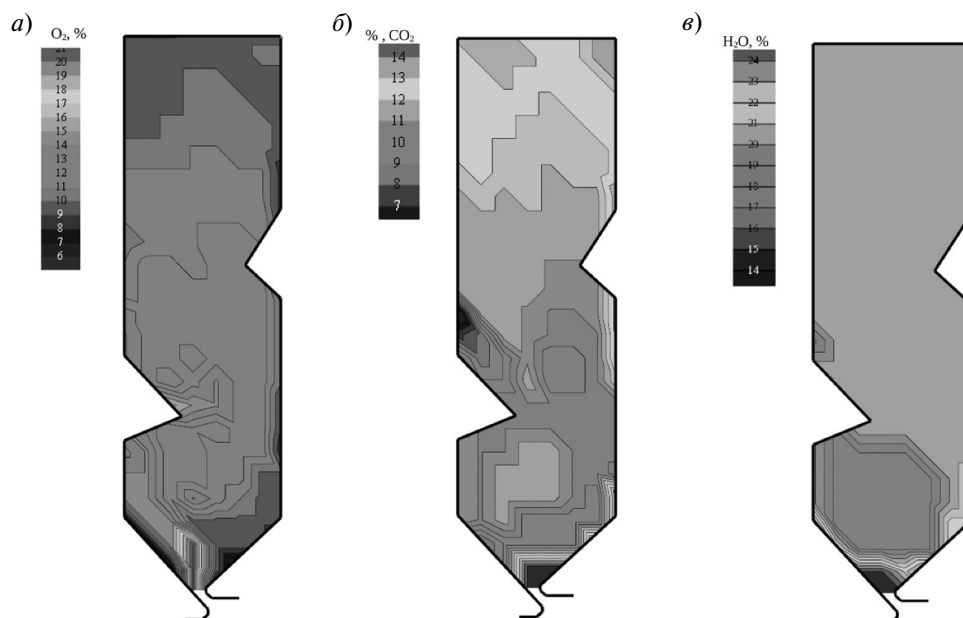


Рис. 9. Поля концентраций основных реагирующих компонентов в НТВ-топке котла П-49: *a* — O_2 ; *б* — CO_2 ; *в* — H_2O

Fig. 9. Fields of concentration of the main reacting components in P-49 boiler LTS fire chamber: *a* — O_2 ; *б* — CO_2 ; *в* — H_2O

частиц (рис. 11) и распределения концентрации оксидов азота в сечении топки (рис. 12).

Как показали расчеты (рис. 13), мелкие частицы ($\delta_{\text{частиц}} < 50\text{--}100\text{ мкм}$) выгорают практически мгновенно, за время, не превышающее двух секунд. Частицы с размерами более $100\text{--}150\text{ мкм}$ попадают в нижнюю вихревую зону, где циркулируют либо до полного выгорания, либо до выхода в прямооточную часть факела. Время горения этих частиц зависит от их размеров и составляет от 2 до 18 секунд.

Количество генерируемых оксидов азота суммировалось в объемах элементарных ячеек топочной камеры, в которых учитывалось также их разложение на поверхности горящего углерода, после чего результаты расчета усреднялись по ширине топки и приводились к выбранному контрольному сечению. Применительно к сжиганию сушенки назаровского бурого угля (см.

рис. 12) максимальные концентрации оксидов азота (800 мг/м^3) находятся у задней стены топки выше сопел третичного дутья, что, по всей видимости, вызвано интенсивной их генерацией из мелких частиц топлива, устремляющихся в прямооточную часть факела сразу же после выхода из горелок. Концентрации NO_x в нижней вихревой зоне значительно меньше и находятся на уровне $400\text{--}500\text{ мг/м}^3$. Такие концентрации, несмотря на выгорание большого количества топлива в НВЗ, достигаются ступенчатым подводом воздуха в процессе многократной циркуляции частиц и разложением NO на их горячей поверхности. К выходу из топки результирующие концентрации оксидов азота снижаются и находятся на уровне примерно 400 мг/м^3 .

Таким образом, расчеты с помощью представленной модели показали, что в результате технического перевооружения котла П-49

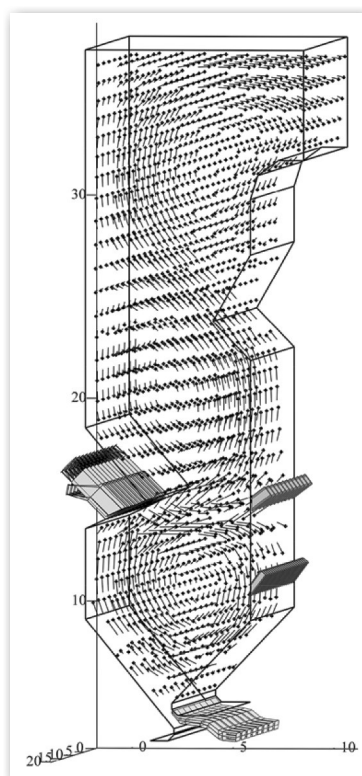


Рис. 10. Векторы скорости газоздушных потоков в объеме НТВ-топки котла П-49

Fig. 10. Vectors of air-gas flows speed in the volumt of P-49 boiler LTS-fenny

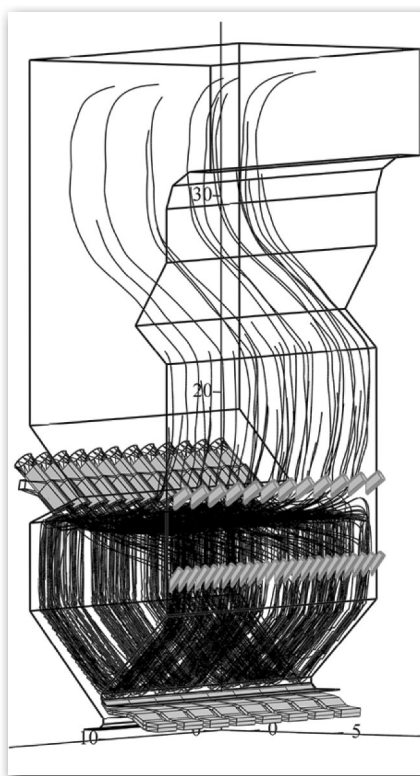


Рис. 11. Расчетные траектории реагирующих частиц сушенки назаровского бурого угля

Fig. 11. Calculated trajectories of the reacting particles of nazarovsky brown coal

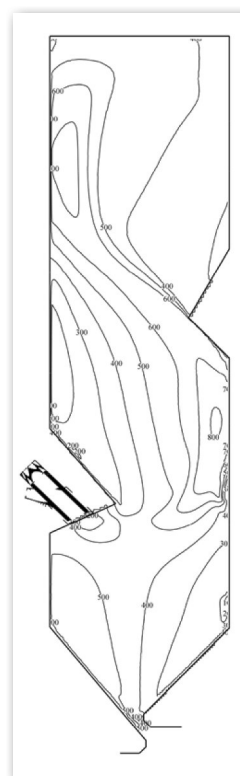


Рис. 12. Концентрация оксидов азота в сечении топки

Fig. 12. Concentration of nitrogen oxides in fire chamber section

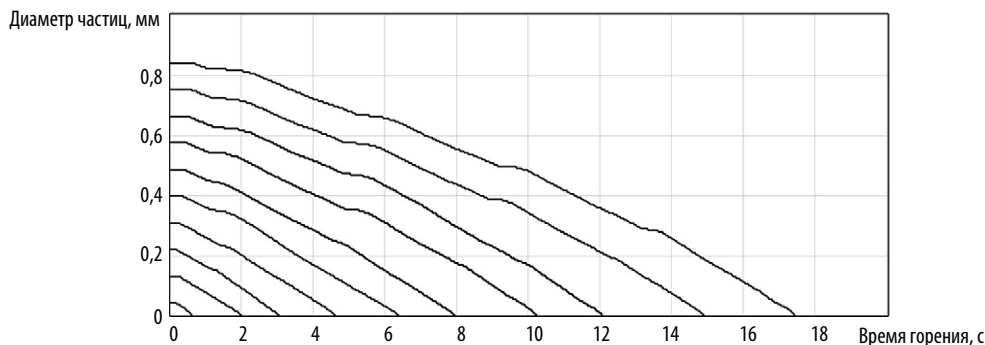


Рис. 13. Кривые выгорания частиц сушенки назаровского бурого угля в НТВ-топке котла П-49

Fig. 13. Curves of nazarovsky brown coal particles burning out in the П-49 boiler LTS fire chamber

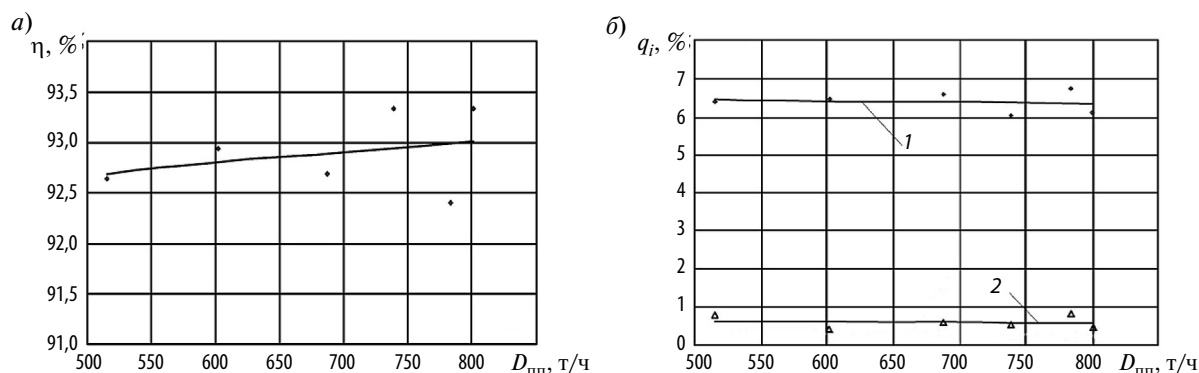


Рис. 14. Техничко-экономические показатели корпуса «А» котла П-49 Назаровской ГРЭС после технического перевооружения: а — КПД (брутто); б — потери тепла (1 — q_2 ; 2 — q_4)

Fig. 14. Technical and economic indicators of the hull «A» of the Nazarovskiy state district power plant P-49 boiler after modernization: а — Efficiency (gross); б — losses of heat (1 — q_2 ; 2 — q_4)

ст. № 7 Назаровской ГРЭС на низкотемпературную вихревую технологию сжигания следует ожидать значительного (практически трехкратного) снижения выбросов оксидов азота, а выбросов оксидов серы – не превышающих требований норматива.

Результаты внедрения НТВ-технологии на Назаровской ГРЭС

Пусконаладочные и балансовые испытания котла проведены согласно рекомендациям* в диапазоне нагрузок 1000–1600 т/ч, при параметрах перегретого пара, близких к номинальным при сжигании сушенки назаровского бурого угля.

* РД 153-34.1-26.303-98. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок. М.: Изд-во ОРГРЭС, 2000. 18 с.

В объеме балансовых испытаний определены технико-экономические (присосы, потери тепла, КПД, затраты электроэнергии на собственные нужды) и экологические (выбросы оксидов азота, оксидов серы, СО) показатели котла в рабочем диапазоне нагрузок.

В диапазоне нагрузок $D = 500\text{--}800$ т/ч $= (0,63\text{--}1,0) \times D_{\text{ном}}$ на один корпус обеспечиваются следующие показатели: КПД (брутто) корпуса А (рис. 14, а) с ростом нагрузки изменяется от 92,5 % (при $D_{\text{пп}} = 500$ т/ч) до 93 % (при $D_{\text{пп}} = 800$ т/ч). Потери тепла с уходящими газами (q_2) практически не изменяются с ростом нагрузки и находятся на уровне 6,0–6,5 %. Потери тепла с механическим недожогом (q_4) с ростом нагрузки не изменяются и составляют 0,3–0,6 % (рис. 14, б).

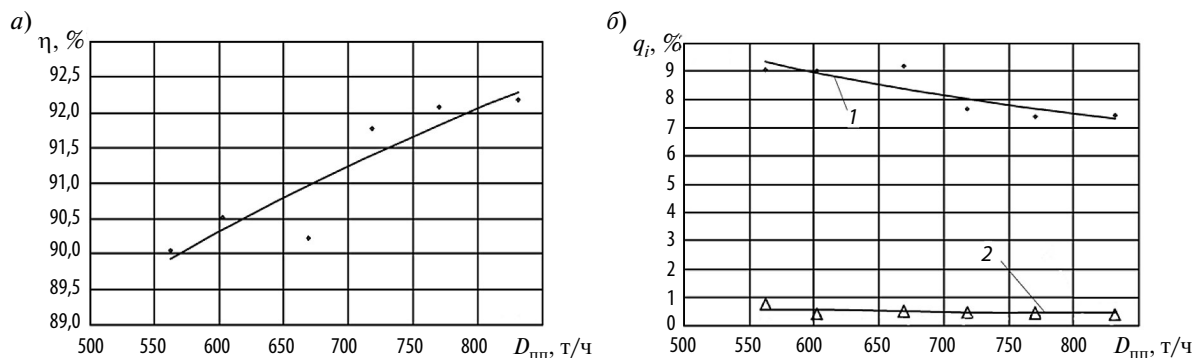


Рис. 15. Техничко-экономические показатели корпуса «Б» котла П-49 Назаровской ГРЭС после технического перевооружения: а — КПД (брутто); б — потери тепла (1 — q_2 ; 2 — q_4)

Fig. 15. Technical and economic indicators of the hull «B» of the Nazarovskiy state district power plant P-49 boiler after modernization: а — Efficiency (gross); б — losses of heat (1 — q_2 ; 2 — q_4)

Аналогичная картина изменения потерь в зависимости от нагрузки имеет место и для корпуса Б котла П-49. При номинальной нагрузке КПД корпуса Б котла П-49 составляет 92,5 % (рис. 15, а). Несколько отличается изменение потерь тепла с уходящими газами (q_2) корпуса Б (рис. 15, б), что связано в первую очередь с использованием на корпусе Б при проведении технического перевооружения старых ширмовых пароперегревателей (ШПП4,5 и ШВП2), что, по всей видимости, привело к недостаточному теплосъему и увеличению температуры уходящих газов.

Экологические показатели (выбросы оксидов азота, оксидов серы, СО), достигнутые после технического перевооружения, и их сравнение с нормативными приведены в таблице.

Работа котла во всем диапазоне нагрузок происходит при полном отсутствии шлакования.

Выводы

Разработана и апробирована на экспериментальных данных математическая модель расчета процесса горения полидисперсного топлива в НТВ-топке котла большой мощности, учитывающая генерацию и преобразование загрязнителей в топочных газах.

С использованием разработанной модели произведена достоверная оценка уровня генерации оксидов азота в топочной камере котла П-49 блока 500 МВт Назаровской ГРЭС, запланированного для технического перевооружения на НТВ-технологии сжигания.

Экологические показатели котла П-49 ст. № 7 Назаровской ГРЭС после технического перевооружения на НТВ-технологии сжигания

Ecological indicators of Nazarovskiy state district power plant П-49 boiler № 7 after modernization on LTS technology of burning

Наименование показателя	Значение		
	в корпусе А	в корпусе Б	норматив
Приведенное содержание оксидов азота в уходящих газах (при $\alpha = 1,4$, н.у.), C_{NO_x} , мг/нм ³	365–400	300–370	370
Приведенное содержание оксидов серы в уходящих газах (при $\alpha = 1,4$, н.у.), C_{SO_x} , мг/нм ³	480	500	2000
Приведенное содержание окиси углерода в уходящих газах (при $\alpha = 1,4$, н.у.), C_{CO} , мг/нм ³	105–215	50–160	300



В результате технического перевооружения обеспечена работа котла П-49 в диапазоне нагрузок 1000–1600 т/ч в двухкорпусном режиме с поддержанием расчетных параметров пара,

высоким КПД (90–93 %), полным отсутствием шлакования и пониженными концентрациями оксидов азота (370–400 мг/нм³) и серы (480–500 мг/нм³) в уходящих дымовых газах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Скудицкий В.Е., Шестаков С.М. Низкотемпературная вихревая технология сжигания: опыт внедрения, перспективы использования // Виктор Владимирович Померанцев. К 100-летию со дня рождения: Сборник воспоминаний и научных статей. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 133–149.
2. Grigoryev K.A., Roundyguine Yu.A., Skuditskii V.E., Anoshin R.G., Paramonov A.P., Trinchenco A.A. Low-Temperature Swirl Fuel Combustion: Development and Experience // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.— Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. P. 662–665.
3. Grigoryev K.A., Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V., Roundyguine Yu.A., Osmanov V.V. Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. P. 504–506.
4. Османов В.В. Совершенствование топочной теплотрии на основе градиентных датчиков теплового потока : дисс. ... кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2015. 158 с.
5. Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Митяков В.Ю., Османов В.В. Разработка и промышленные испытания системы теплотрии на основе градиентных датчиков теплового потока // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 1 (190). С. 61–69.
6. Тринченко А.А., Парамонов А.П. Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 4 (231). С. 72–81. DOI:10.5862/JEST.231.8
7. Тринченко А.А. Внедрение низкотемпературной вихревой технологии сжигания в энергетических котлах как способ повышения их экологических показателей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 4 (207). С. 61–70.
8. Османов В.В. Градиентные датчики теплового потока для теплотрии в топках котлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4 (183). Т. 1. С. 100–104.
9. Григорьев, К.А., Скудицкий В.Е., Зыкин Ю.В. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных видов топлива в котле БКЗ-210–13,8 Кировской ТЭЦ-4 // Электрические станции. 2010. № 4. С. 9–13.
10. Тринченко А.А., Парамонов А.П. Техническое перевооружение котла БКЗ-210–140–13,8 на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 62–74. DOI: 10.18721/JEST.230206
11. Скудицкий В.Е., Аношин Р.Г., Григорьев К.А., Михайлов В.В. Внедрение низкотемпературной вихревой технологии сжигания на блоке 500 МВт на Назаровской ГРЭС // II Межд. науч.-технич. конф. «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (Москва, 28–29 октября 2014). М.: ОАО «ВТИ», 2014. С. 128–135.
12. Скудицкий В.Е., Аношин Р.Г., Рундыгин Ю.А., Михайлов В.В., Рыжиков Н.В., Григорьев К.А. Решение проблем сжигания углей Канско-Ачинского бассейна в котле П-49 блока 500 МВт Назаровской ГРЭС // Электрические станции. 2017. № 2. С. 23–28.
13. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
14. Патанкар М. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
15. Бабий В.И., Куваев В.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
16. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Повышение экологических показателей низкотемпературных вихревых топков за счет разложения оксидов азота на коксовых частицах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 2 (54). С. 149–156.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРИНЧЕНКО Алексей Александрович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: trinchenco@mail.ru

ПАРАМОНОВ Александр Павлович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: paramon@mail.ru

КАДЫРОВ Марсель Робертович — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: marsel-kadyrov@mail.ru

REFERENCES

1. Grigoryev K.A., Rundygin Yu.A., Skuditskiy V.Ye., Shestakov S.M. Nizkotemperaturnaya vikhrevaya tekhnologiya szhiganiya: opyt vnedreniya, perspektivy ispolzovaniya. *Viktor Vladimirovich Pomerantsev. K 100-letiyu so dnya rozhdeniya: Sbornik vospominaniy i nauchnykh statey*. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2006. S. 133–149. (rus.)
2. Grigoryev K.A., Roundyguine Yu.A., Skuditskii V.E., Anoshin R.G., Paramonov A.P., Trinchenko A.A. Low-Temperature Swirl Fuel Combustion: Development and Experience. *Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion* / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.— Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. P. 662–665.
3. Grigoryev K.A., Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V., Roundyguine Yu.A., Osmanov V.V. Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces. *Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion* / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. P. 504–506.
4. Osmanov V.V. Sovershenstvovaniye topochnoy teplometrii na osnove gradiyentnykh datchikov teplovogo potoka : dissertatsiya... kandidata tekhnicheskikh nauk. Sankt-Peterburg, 2015. 158 s. (rus.)
5. Grigoryev K.A., Rundygin Yu.A., Mityakov V.Yu., Osmanov V.V. Razrabotka i promyshlennyye ispytaniya sistemy teplometrii na osnove gradiyentnykh datchikov teplovogo potoka. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2014. № 1 (190). S. 61–69. (rus.)
6. Trinchenko A.A., Paramonov A.P. Vnedreniye nizkotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiya dlya energeticheskogo ispolzovaniya kamennykh ugley. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2015. № 4 (231). S. 72–81. (rus.) DOI:10.5862/JEST.231.8
7. Trinchenko A.A. Vnedreniye nizkotemperaturnoy vikhrevoy tekhnologii szhiganiya v energeticheskikh kotlakh kak sposob povysheniya ikh ekologicheskikh pokazateley. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2014. № 4 (207). S. 61–70. (rus.)
8. Osmanov V.V. Gradiyentnyye datchiki teplovogo potoka dlya teplometrii v topkakh kotlov. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 4–1 (183). T 1. S. 100–104. (rus.)
9. Grigoryev K.A., Skuditskiy V.Ye., Zykin Yu.V. Opyt nizkotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiya razlichnykh vidov topliva v kotle BKZ-210–13,8 Kirovskoy TETs-4. *Elektricheskkiye stantsii*. 2010. № 4. S. 9–13. (rus.)
10. Trinchenko A.A., Paramonov A.P. Tekhnicheskoye perevooruzheniye kotla BKZ-210–140–13,8 na osnove nizkotemperaturnoy vikhrevoy tekhnologii szhiganiya. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2017. T. 23. № 2. S. 62–74. DOI: 10.18721/JEST.230206 (rus.)
11. Skuditskiy V.Ye., Anoshin R.G., Grigoryev K.A., Mikhaylov V.V. Vnedreniye nizkotemperaturnoy vikhrevoy tekhnologii szhiganiya na bloke 500 MVt na Nazarovskoy GRES. *II Mezhd. nauch-tekhnich. konf. «Ispolzovaniye tverdykh topliv dlya effektivnogo i ekologicheskogo proizvodstva elektroenergii i tepla»* (Moskva, 28–29 oktyabrya 2014). — M.: OAO «VTI», 2014. S. 128–135. (rus.)
12. Skuditskiy V.Ye., Anoshin R.G., Rundygin Yu.A., Mikhaylov V.V., Ryzhikov N.V., Grigoryev K.A. Resheniye problem szhiganiya ugley Kansk-Achinskogo basseyna v kotle P-49 bloka 500 MVt Nazarovskoy GRES. *Elektricheskkiye stantsii*. 2017. № 2. S. 23–28. (rus.)
13. Pomerantsev V.V., Arefyev K.M., Akhmedov D.B. Osnovy prakticheskoy teorii gorennya. L.: Energoatomizdat, 1986. 312 s. (rus.)
14. Patankar M. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. M.: Energoatomizdat, 1984. 150 s. (rus.)
15. Babiy V.I., Kuvayev V.F. Gorennye ugolnoy pyli i raschet pyleugolnogo fakela. — M.: Energoatomizdat, 1986. 208 s. (rus.)
16. Trinchenko A.A., Shestakov S.M. Povysheniye ekologicheskikh pokazateley nizkotemperaturnykh vikhrevykh topok za schet razlozheniya oksidov azota na koksovykh chastitsakh. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2008. № 2 (54). S. 149–156. (rus.)

AUTHORS

TRINCENKO Aleksei A. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: trinchenko@mail.ru



PARAMONOV Aleksandr P. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: papamon@mail.ru

KADYROV Marsel R. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: marsel-kadyrov@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24 августа 2017 г.