

DOI 10.5862/JEST.231.8

УДК 621.181:622.612

А.А. Тринченко, А.П. Парамонов

ВНЕДРЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov

THE INTRODUCTION OF THE LOW-TEMPERATURE OF VORTEX COMBUSTION FOR ENERGY USE HARD COAL

Энергетическое использование органического топлива сопровождается загрязнением окружающей среды токсичными газообразными компонентами продуктов сгорания. Требованиями действующего законодательства в области защиты окружающей среды предписано выполнение установленных норм выбросов как при новом строительстве, так и при совершенствовании энергетического оборудования. В работе приведены результаты комплексного подхода в решении задачи снижения вредного воздействия путем модернизации энергетического котла с внедрением низкотемпературного вихревого способа сжигания. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета, с использованием которых обоснована возможность эффективного сжигания каменных углей с обеспечением низкой концентрации загрязнителей в уходящих газах котла. Выполнена количественная оценка уровня выбросов, проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на модернизированном объекте.

ЭНЕРГЕТИКА; ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ; ТОПОЧНАЯ КАМЕРА; ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА; ОКСИДЫ АЗОТА; ОКСИДЫ СЕРЫ; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ.

The energy use of fossil fuels is accompanied by toxic gaseous components of combustion products contaminating the environment. The current legislation in the field of environmental protection prescribes observing the emission standards both in new construction and in improving the energy equipment. The results of a comprehensive approach to solving the problem of reducing the harmful effects through modernizing the power boiler through introducing the low-temperature vortex combustion method. We have developed a technique, an algorithm, and a calculation scheme for substantiating the possibility of efficient coal-burning ensuring low pollutant concentrations in exit gas from the boiler. We have also conducted a quantitative assessment of the emission level and a comparison between the calculation results and the experimental data obtained at a modernized facility.

ENERGY; ENVIRONMENT; FURNACE CHAMBER; FUEL COMBUSTION; NITROGEN OXIDES; SULFUR OXIDES; MATHEMATICAL MODEL; EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES.

Энергетическая стратегия развития России на период до 2030 года предусматривает увеличение доли угля как энергетического топлива. Одновременно к проектам создания нового и модернизации действующего котельно-топочного оборудования предъявляются жесткие требования по уровню выбросов в атмосферу газо-

образных загрязнителей — оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x).

Одно из перспективных направлений использования твердого топлива — низкотемпературная вихревая (НТВ) технология, разработанная в начале 1970-х годов на кафедре «Реакторо- и парогенераторостроение» ЛПИ под

руководством профессора В.В. Померанцева и рекомендованная в настоящее время [1] как альтернатива пылеугольному сжиганию в прямом факеле. НТВ-технология прошла апробацию при сжигании разнообразных топлив (торф, лигниты, бурые угли, сланцы), однако возможность использования каменных углей изучена недостаточно и ограничивается результатами опытного сжигания в НТВ-топках непродуктивного топлива.

Цель настоящей работы – теоретическое обоснование и промышленная проверка возможности низкотемпературного вихревого сжигания каменных углей с одновременным исследованием процесса горения, генерации и преобразования газовых загрязнителей с целью дальнейшего совершенствования НТВ-технологии.

Основанием для проведения исследований было техническое задание на модернизацию кот-

ла БКЗ-85-13 ст. № 1 МУП «Южная тепловая станция» города Рубцовска, предусматривающее повышение паровой нагрузки (до $D_H = 100$ т/ч) при работе на кузнецком каменном угле (в том числе ухудшенного качества) без подсветки резервным топливом и с размещением устанавливаемого оборудования в габаритах существующей котельной ячейки.

Котлы БКЗ-85-13 ТЭЦ МУП «Южная тепловая станция» изготовлены Барнаульским котельным заводом в середине 1960-х годов. Проектным топливом котлов являются кузнецкие каменные угли марки ССР. В качестве растопочного и резервного топлива используется мазут марки М-100.

В результате снижения качества топлива, а также физического износа оборудования показатели работы котлов к началу 2000-х годов резко ухудшились. Повышение влажности сжигае-

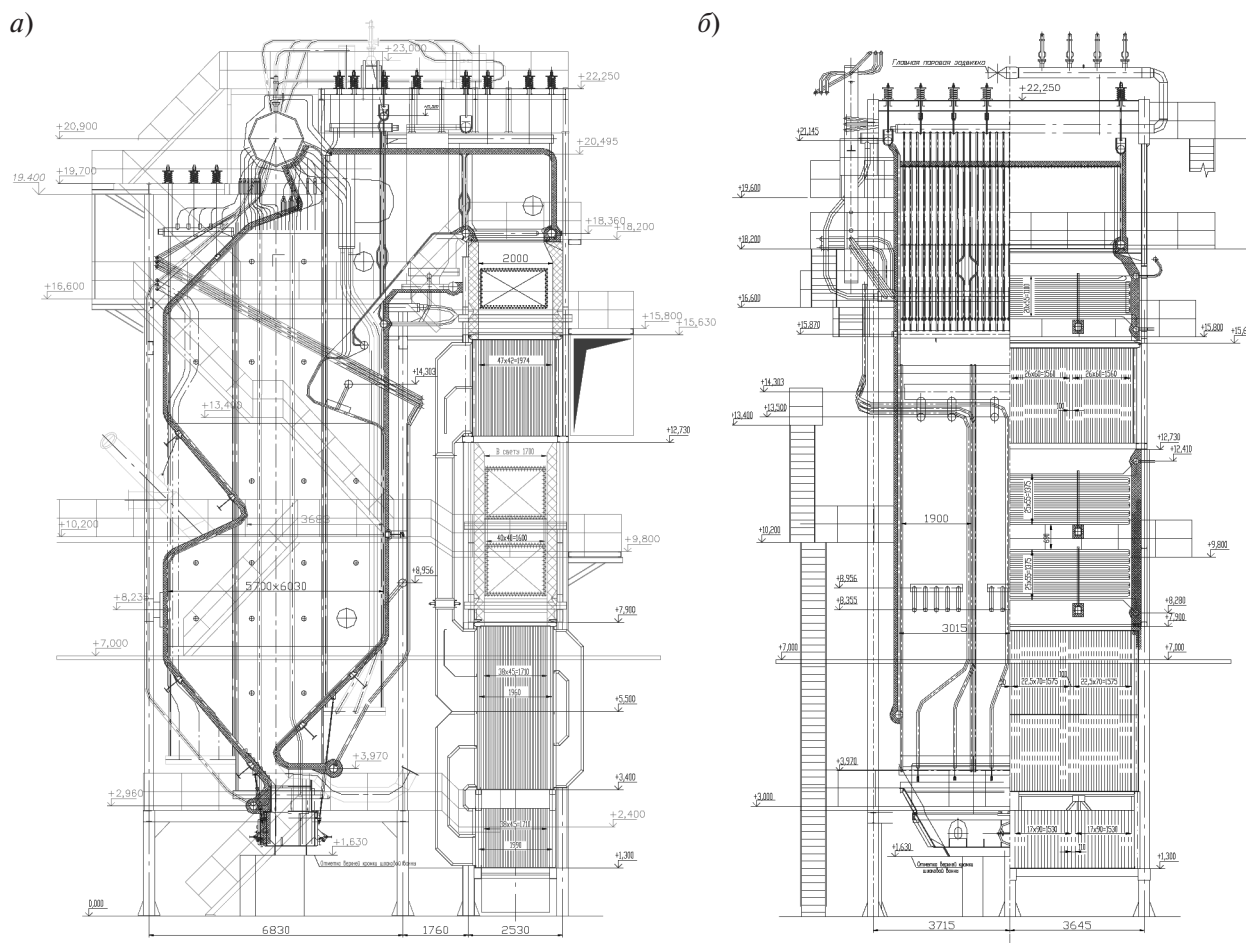


Рис. 1. Общий вид котла БКЗ-85-13 с НТВ-топкой: а) продольный разрез; б) поперечный разрез

мого угля привело к его частому зависанию в бункерах, замазыванию и выходу из строя питателей и, как результат, – неустойчивой подаче топлива в топку с повышением расхода мазута (до 60 % по теплу). При таких условиях работы нагрузка котла не превышала 65 % от номинальной при среднеэксплуатационном КПД (брутто) не более 70 %.

Основные проектные решения при модернизации состояли в следующем. Низкотемпературная вихревая топочная камера (рис. 1) изготавливается газоплотной и представляет собой блочную конструкцию, выполненную из цельносварных мембранных панелей заводского изготовления. Размеры в плане (по осям экранных труб) – 6030×5800 мм (существующий каркас котла сохранен). В нижней части топки фронтальной и задний экраны образуют скаты «холодной» воронки. В нижней части «холодной» воронки трубами фронтального и заднего экрана сформировано устье для выхода шлака. В средней части топки панели фронтальной стены образуют фронтальный аэродинамический выступ (с вылетом в топку на 2117 мм), предназначенный для формирования вихревой зоны. В верхней части топ-

ки панели заднего экрана образуют задний аэродинамический выступ, предназначенный для улучшения аэродинамики газового потока на выходе. Панели фронтального экрана образуют наклонный потолок топочной камеры.

Пылеугольные горелки котла щелевого типа (мощность 26 МВт) в количестве трех штук установлены на нижней образующей фронтального аэродинамического выступа на отметке +10,145 м и наклонены вниз под углом к горизонту 45°. Мазутные горелки (3 шт.) мощностью 8 МВт установлены на вертикальном участке фронтального экрана, расположенном между скатом холодной воронки и аэродинамическим выступом (отметка +8,235 м). Система нижнего дутья с соплами щелевого типа выполнена в двухсопловом варианте и состоит из трех блоков, размещенных в устье «холодной» воронки под задним экраном по всей ширине топки котла.

Проектные технические характеристики котла после модернизации приведены в таблице. Обязательным условием при модернизации было выполнение современных требований к уровню выбросов в атмосферу газовых загрязнителей (оксиды азота и серы) [2], что привело к необходимости проведения модельных исследований.

Проектные характеристики котла БКЗ-85-13

Параметр	Размерность	Значения параметра	
		Каменный уголь	Мазут
Паропроизводительность	т/ч	100	100
Температура перегретого пара	°С	280	280
Давление перегретого пара	МПа	1,4	1,4
Температура питательной воды	°С	104	104
Расчетный КПД (брутто)	%	89,65	93,6
Полный расход топлива	т/ч	12,05	6,86
Теплонапряжение топочного объема	МВт/м ³	0,136	0,134
Теплонапряжение сечения топки	МВт/м ²	2,86	2,82
Температура газов на выходе из топки	°С	980	1017
Температура уходящих газов	°С	115	119
Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель	°С	30	30
Температура горячего воздуха	°С	307	313
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	–	1,2	1,05
Массовая концентрация в дымовых газах (при нормальных условиях и $\alpha = 1,4$):	NO _x	470	–
	SO _x	1200	–

Математическая модель котла БКЗ-85-1,3-250 ст. № 1 МУП «Южная тепловая станция» (рис. 2) разработана согласно принятым проектным решениям. Анализ развития горелочных струй показал, что в НТВ-топке модернизированного котла для снижения вероятности возникновения эрозионного износа боковых экра-

нов крайние горелки необходимо повернуть к оси топки (рис. 3). Угол поворота горелок (при поддержании в них скорости на номинальной нагрузке 27 м/с) составил 5°.

Поле скоростей газового потока в НТВ-топке котла БКЗ-85-13 определялось с использованием программного комплекса ANSYS Fluent (ли-

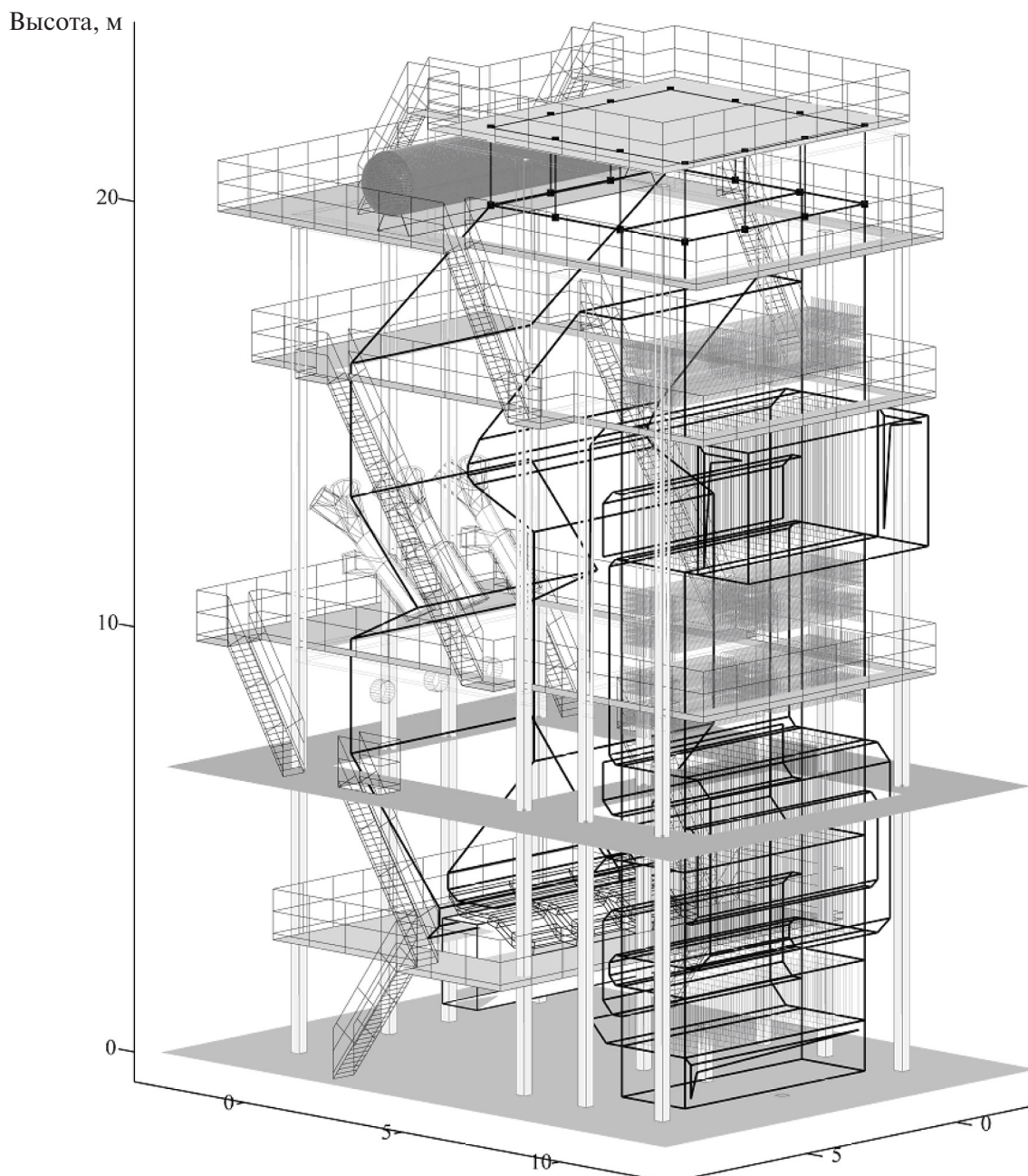


Рис. 2. Модель котла БКЗ-85-13ТЭЦ МУП «Южная тепловая станция» г. Рубцовска с низкотемпературной вихревой технологией сжигания

цензия С.Н. 420725). Для расчетов низкоскоростного течения ($M < 1$) использована модель турбулентности $k-\epsilon$ Realizable [3]. Проекция векторов скорости на координатные оси определялись в узловых точках с дальнейшим экспортом расчетных данных в разработанную модель (рис. 4) и последующей аппроксимацией для нахождения вектора скорости в искомой точке.

Расчет горения движущейся углеродной частицы проводился с учетом количества реагирующих компонентов (O_2 , CO_2 , H_2O), определяемого из полей концентраций этих компонентов, характерных для НТВ топков, [4] по зависимости

$$G_c = \frac{\alpha_D}{RT} \left(\frac{N_3}{1+N_3} p_{CO_2\Delta} + \frac{N_3'}{1+N_3'} \times \right. \\ \left. \times (p_{O_2\Delta} + 0,5 p_{H_2O\Delta}) + \frac{N_5}{1+N_5} p_{NO\Delta} \right), \text{ кмоль/м}^2 \quad (1)$$

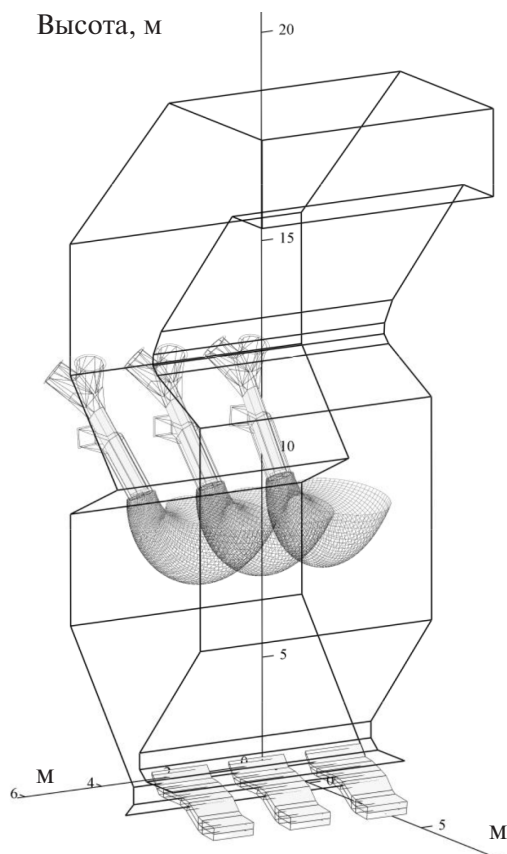


Рис. 3. Развитие горелочных струй в НТВ-топке котла БКЗ-85-13

Для решения задачи применены следующие понятия: «приведенная пленка» ($\Delta/\delta = 1/(Nu_D - 2)$); безразмерная координата ($\zeta = x/\Delta$); критерий Семенова ($Se = (k_4 \Delta / D)^{0.5}$); диффузионно-химический критерий ($N_i = k_i / \alpha_D$); зависимость Аррениуса для констант скоростей реакций ($k_i = k_{0i} \exp(-E_i / RT)$) [5]; «полюс» с координатами $k^* = 100 \text{ м/с}$, $T^* = 2600 \text{ К}$ [6]; энергия активации. Концентрации оксидов азота и серы находились расчетным путем [7].

Размеры топливных частиц, их число на 1 кг расчетного топлива, масса в пределах каждой фракции и площадь начальной поверхности реагирования определялись с учетом рекомендаций [8] путем обработки рассеивочной кривой (рис. 5) исходного топлива (кузнецкий каменный уголь ССР, $R_{90} = 20\%$, $R_{200} = 5\%$).

Анализ температурного уровня в НТВ топке котла БКЗ-85, полученного путем позонного

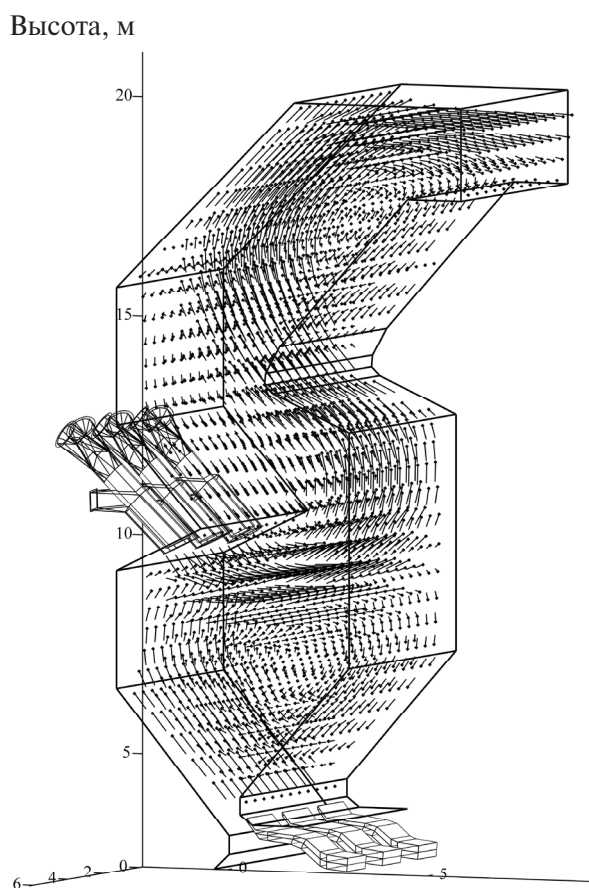


Рис. 4. Векторы скорости газоздушных потоков в НТВ-топке котла БКЗ-85

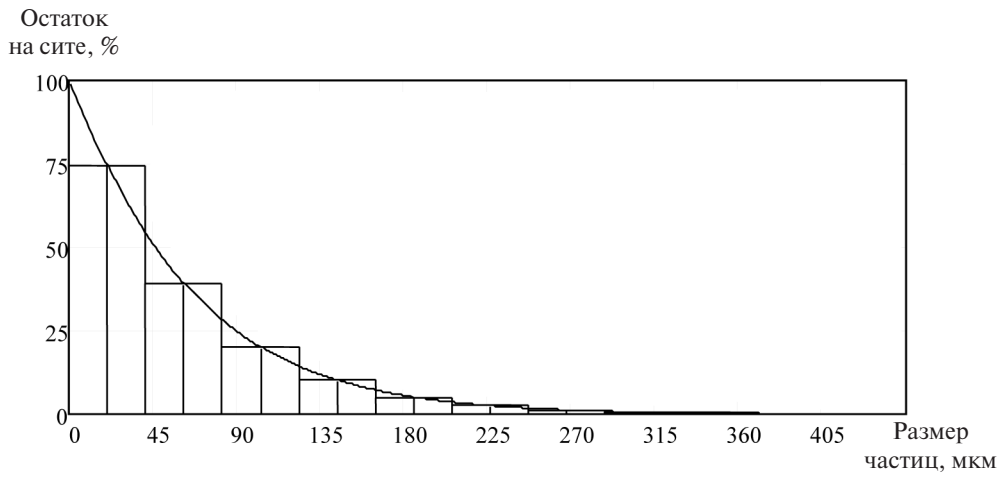


Рис. 5. Обработка расщепочной кривой исходного топлива (кузнецкий каменный уголь ССР, $W^r=14,5\%$, $A^r=9,8\%$), $R_{90}=25\%$, $R_{200}=4\%$)

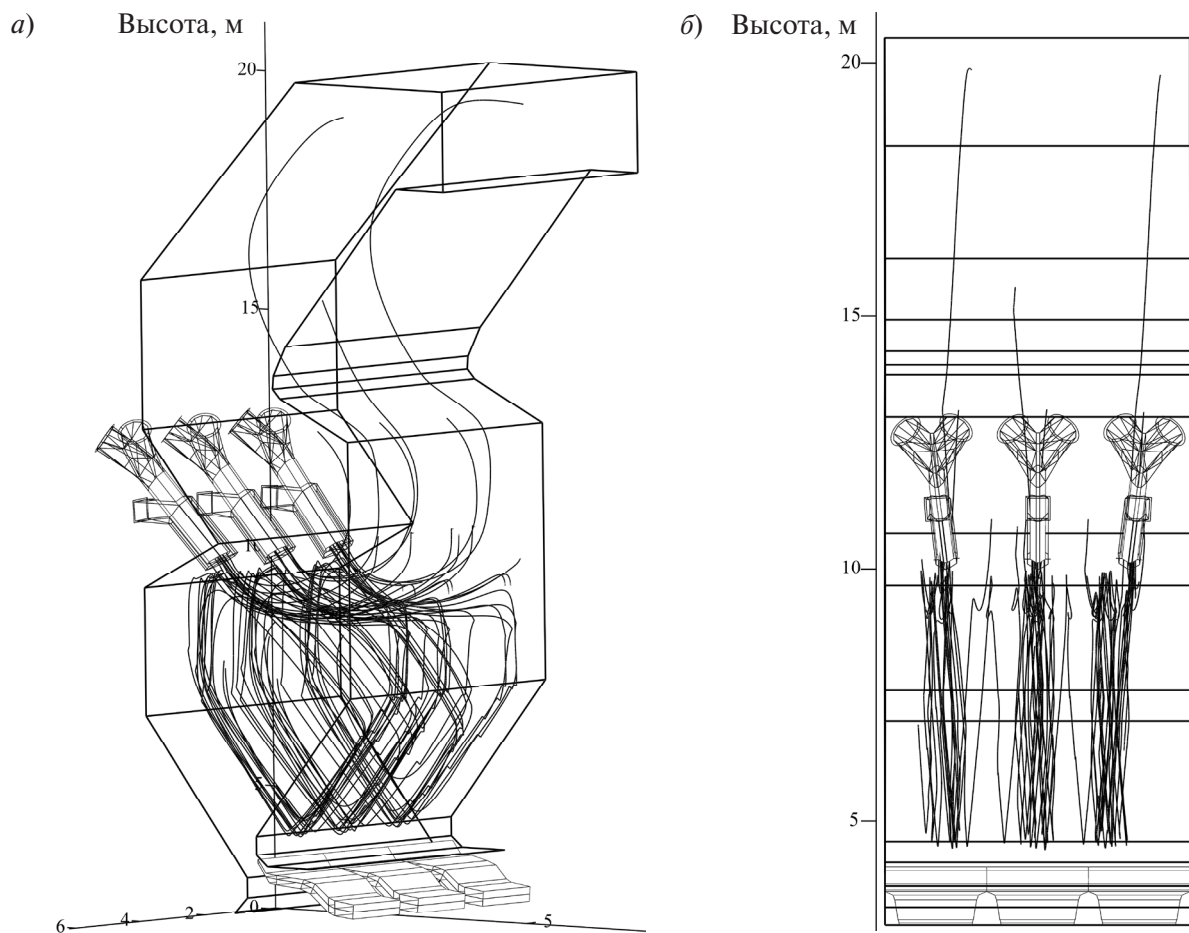


Рис. 6. Траектории движения реагирующих частиц в НТВ-топке котла БК3-85-13: а) в объеме топки; б) вид на фронт котла

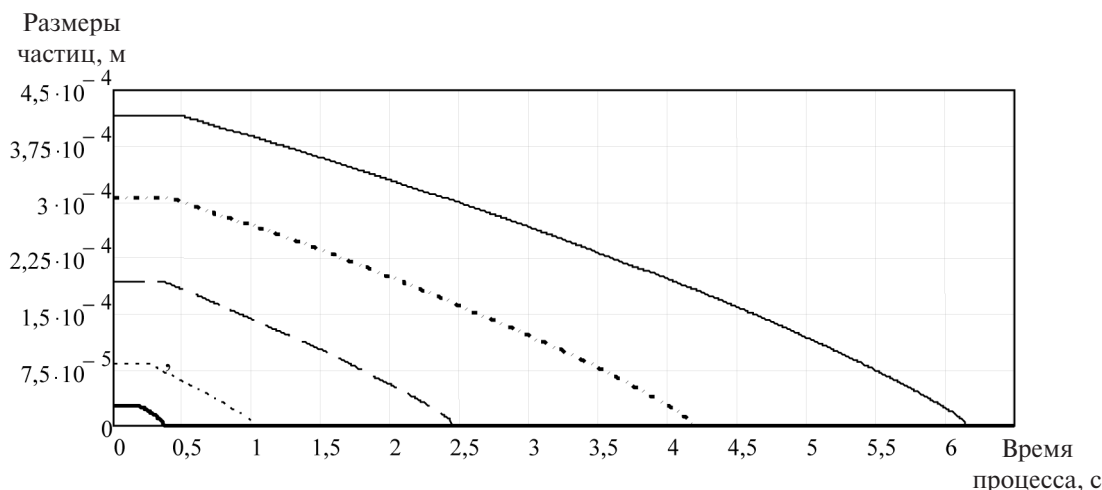


Рис. 7. Выгорание частиц в НТВ-топке котла БКЗ-85-13

теплового расчета [9], показал, что расчетные температуры не превышают допустимых по условию шлакования поверхностей нагрева и не способствуют возникновению «термических» оксидов азота ($T_{max} < 1800$ К) [10, 11].

Анализ состава исходного топлива показал, что ввиду большого содержания азота в рабочей массе ($N = 1,44$ %) интерес представляют результаты расчетного определения конечной концентрации оксидов азота [12], в то время как концентрация в уходящих газах оксидов серы (при ее содержании в рабочем топливе 0,26 %), определенная из баланса реакции их образования, не превысит требуемых нормативов.

Решением уравнения движения [6] с учетом действия на частицу двух основных сил – силы тяжести и силы аэродинамического сопротивления – получены траектории реагирующих топливных частиц в объеме топки (рис. 6), определено время их горения, найдены источниковые члены генерации оксидов азота и серы. Применительно к рассеивочной характеристике исходного топлива время полного выгорания топливных частиц, определяемое с учетом изменения их массы и размера, находят из системы уравнений

$$\frac{dm}{dr} = \frac{dm_{wr}}{d\tau} + \frac{dm_{лет}}{d\tau} + \frac{dm_c}{d\tau}, \text{ кг/с}; \quad (2)$$

$$\frac{dm_c}{d\tau} = -G_c + M_c \pi \delta, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (3)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{2M_c}{\rho_{\text{ч}}} G_c, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где $M_c = 12$ кг/кмоль – молярная масса углерода; $m = \pi/6 \delta^3 \rho$ – масса сферической частицы, кг; $f_{\text{пов}} = \pi \delta^2$ – площадь наружной поверхности, м². Согласно расчетам это время составило от 0,35 до 6,2 с (рис. 7).

Сгорание основной массы топлива происходит в нижней вихревой зоне топки. Мелкие частицы ($\delta = 20\text{--}30$ мкм) за время горения делают в ней менее одного оборота, а крупные ($\delta = 390\text{--}412$ мкм) успевают сделать 4–5 оборотов. Разрушения частиц при их ударе об экраны топочной камеры не происходит ввиду высокой тонкости помола топлива.

Результаты расчетного анализа представлены применительно к сечению топки, проходящему через ось центральной горелки (рис. 8). Начальные координаты частиц на выходе из горелки задавались случайным образом (рис. 9). Расчетные поля концентраций оксидов азота и оксидов серы найдены из решения дифференциального уравнения массообмена

$$dm_i/d\tau = D \nabla^2 m_i \quad (2)$$

при наличии источникового члена [13] для каждой из элементарных ячеек нерегулярной криволинейной сетки, максимальный размер которых не превышает $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м. Генерация загрязнителей в элементарных ячейках (источниковые члены) определялась путем суммирования количества NO и SO₂, выделившихся в этих ячейках за время пребывания в них реагирующих частиц.

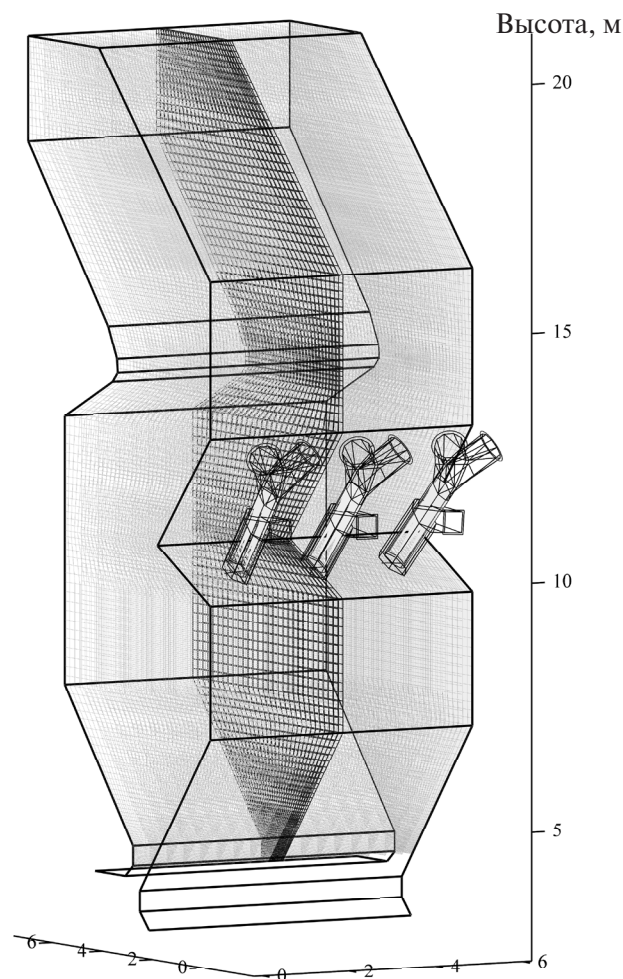


Рис. 8. Сечение топки котла БКЗ-85-13 для анализа результатов расчет

Генерация оксидов азота в нижней вихревой зоне (рис. 10, а) увеличивает их локальные концентрации, что улучшает условия дальнейшего реагирования с углеродной поверхностью. Для рассматриваемых условий разложение оксидов азота на поверхности горящих коксовых частиц достигает 30 % и зависит от гранулометрического состава и времени пребывания топлива в НВЗ. Увеличение показателя полидисперсности ($n = 0,8-1,6$) приводит к незначительному снижению количества разложившихся частиц NO, ввиду чего более равномерному помолу следует отдавать предпочтение.

Результирующая расчетная концентрация оксидов азота на выходе из топки с учетом суммарного воздействия на их генерацию и преоб-

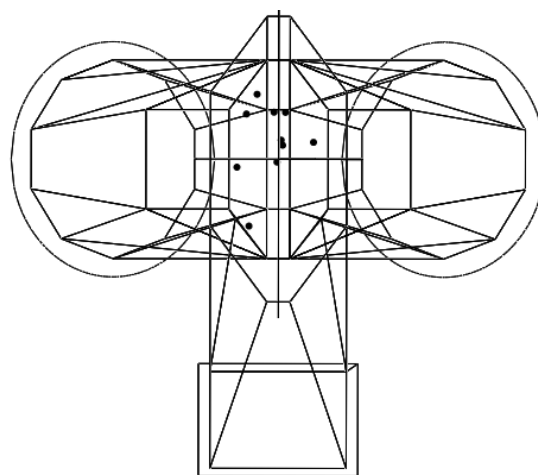


Рис. 9. Пример начального распределения частиц топлива на выходе из канала топливо-воздушной смеси

разование в процессе горения ряда факторов (пониженные температуры в нижней вихревой зоне; затянутые смесеобразование и воспламенение топлива; пониженная концентрация окислителя в НВЗ; ступенчатый его подвод, а также разложение образовавшихся оксидов азота на поверхности коксовых частиц) составила 350–400 мг/м³ (рис. 11, а), что на 40–50 % ниже, чем при сжигании по схеме прямооточного пылеугольного факела.

Генерация оксидов серы максимальна в зонах интенсивного выгорания углерода (рис. 10, б). К выходу из НВЗ она выравнивается и в прямооточной части факела остается практически без изменения на уровне ~ 500 мг/м³ (рис. 11, б).

Таким образом, результаты проведенных расчетов подтвердили возможность сжигания кузнецкого каменного угля в НТВ-топке котла БКЗ-85-13 с полным выполнением действующих нормативных требований по уровню выбросов вредных веществ, что дало основания для реализации НТВ-технологии на МУП «Южная тепловая станция» г. Рубцовска.

Испытания котла после модернизации проводились в соответствии с методиками [14, 15] при сжигании кузнецкого каменного угля марки ССР разреза «Киселевский». Его средний состав характеризуется следующим образом:

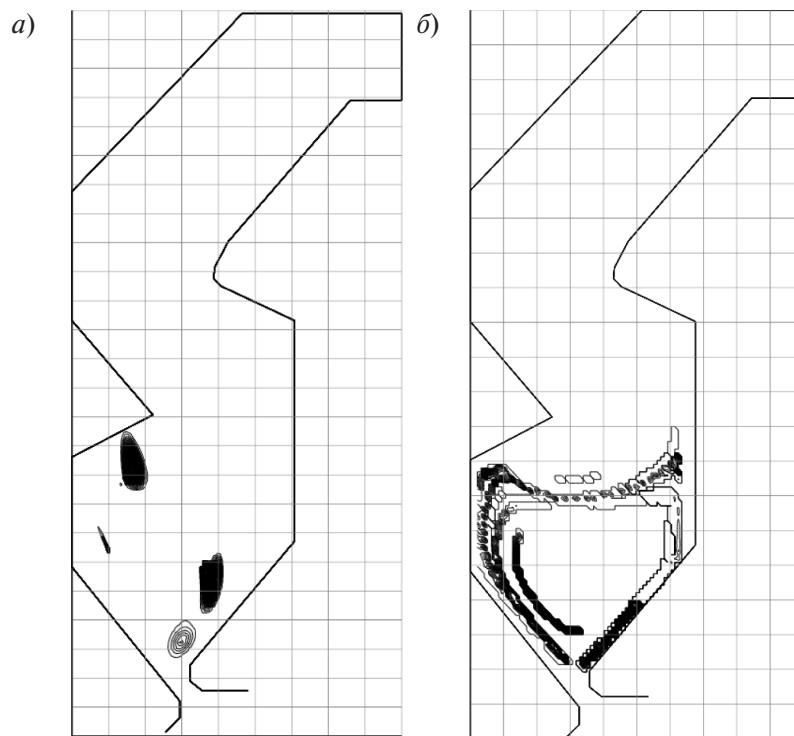


Рис. 10. Зоны интенсивной генерации газовых загрязнителей в НТВ-топке котла БК3-85-13: а) оксидов азота; б) оксидов серы

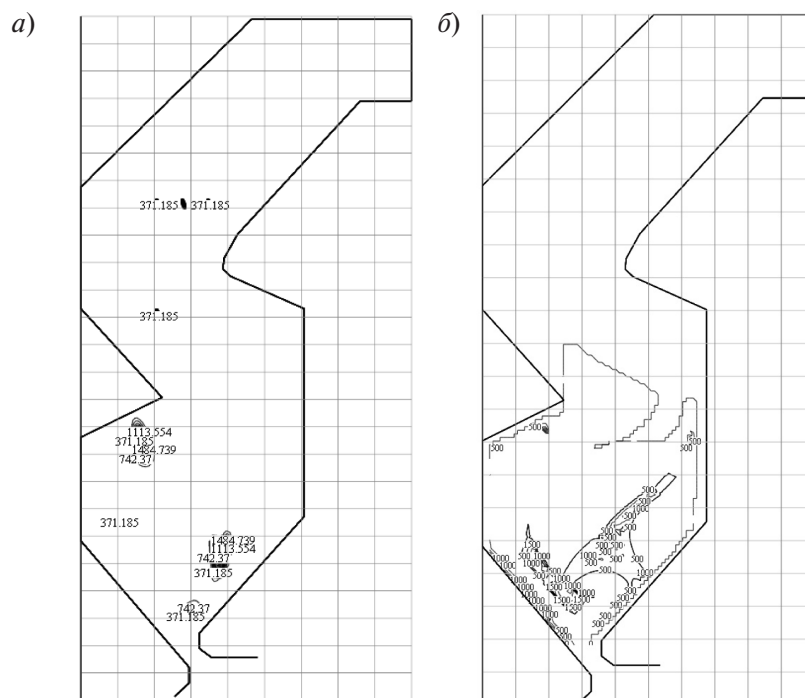


Рис. 11. Усредненное расчетное поле концентраций оксидов азота (а) и оксидов серы (б) в НТВ-топке котла БК3-85-13

Влажность W_t^r , %	14,5
Зольность A^r , %.....	9,8
Сера S_r , %.....	0,26
Углерод C_r , %.....	63,9
Водород H^r , %.....	3,2
Азот N^r , %.....	1,44
Кислород O^r	6,9
Теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг (ккал/кг)	23,91 (5710)
Выход летучих V^{daf} , %	24,5
Коэффициент размолоспособности $k_{до}$...	1,5

Гранулометрический состав пыли варьировался при помощи направляющего аппарата сепаратора мельницы в пределах изменения полного остатка на сите 90 мкм от $R_{90} = 9-10\%$ до $R_{90} = 17-18\%$.

Максимальная экономичность котла достигнута при работе на двух пылесистемах. В диапазоне паровых нагрузок $D = 80-126$ т/ч коэффициент полезного действия (брутто) котла составил $\eta = 89,3-91,2\%$. Во всем исследованном диапазоне работы котла температура перегретого пара удовлетворяла требованиям и составляла $250-280^\circ\text{C}$. Видимого влияния тонины помола на изменение механического недожога не обнаружено.

Пирометрия топки при номинальной нагрузке показала, что вихревая зона топки достаточно

изотермична. Температура факела изменяется в пределах $1250-1400^\circ\text{C}$, на выходе из топки — $950-960^\circ\text{C}$, что практически совпадает с расчетными значениями. С момента пуска котел отработал более 10000 часов в основном при паровой нагрузке $90-100$ т/ч. Шлакования топки и загрязнения конвективных поверхностей нагрева не наблюдалось.

Таким образом, в результате модернизации котла БКЗ-85-13 с переводом на НТВ-сжигание получены следующие результаты:

1. Повышена до 100 т/ч (на 18 %) номинальная паропроизводительность котла и обеспечена его устойчивая работа на кузнецком каменном угле марки ССР в диапазоне нагрузок $D = (0,5-1,05)D_{ном}$ без подсветки факела мазутом.

2. КПД (брутто) котла в рабочем диапазоне нагрузок $D = (0,8-1,05)D_{ном}$ составляет $\eta = 90,5-91,2\%$.

3. Выбросы газовых загрязнителей (оксидов азота и оксидов серы) не превышают установленных требований при сжигании проектного топлива (кузнецкие каменные угли марки ССР) в котлах установленной мощности ($D < 420$ т/ч).

По итогам НТВ-сжигания кузнецких углей в котле БКЗ-85-13 ст. № 1 МУП «Южная тепловая станция» на НТВ-технологии переведены аналогичные котлы ст. № 2 и ст. № 3, на которых внедрение новой технологической схемы позволило обеспечить эффективное сжигание кузнецких каменных углей различных марок с нормативными показателями по вредным выбросам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ 13.11.2009 № 1715-р.
2. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 1996. 24 с.
3. Парамонов А.П. Определение и тестирование эмпирических констант для математической модели горения коксового остатка, используемой в программном комплексе Fluent // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 2 (54). С. 144-149.
4. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Повышение экологических показателей низкотемпературных вихревых топок за счет разложения оксидов азота на коксовых частицах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 2 (54). С. 149-156.
5. Кондратьев В.Н. Константы скорости газозольных реакций: Справочник. М.: Наука, 1971. 306 с.
6. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. [и др.] Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
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. Ромадин В.Р. Пылеприготовление. М-Л.: Госэнергоиздат, 1953. 519 с.
9. Дураченко Л.И., Кравчук Т.Н., Марьямчик М.И. Автоматизированный метод позонного теплового

расчета низкотемпературных вихревых топок к // Вопросы сжигания топлив в парогенераторах: Межвузовский сборник. Барнаул.: Изд-во АПИ, 1981. С. 29–34.

10. **Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.** Окисление азота при горении. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 146 с.

11. **Сигал И.Я.** Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1988. 312 с.

12. **Котлер В.Р.** Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 144 с.

13. **Патанкар М.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.

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

15. **Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия, 1977. 296 с.

REFERENCES

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 30 noyabrya 2009 g. No1715-p. [Russia Governement decree No1715-p.] (rus)

2. **GOST 50831-95.** Ustanovki kotelnyye. Teplomekhanicheskoye oborudovaniye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. [Boiler plant. Heat-mechanical equipment. General technical requirements.] Mojscow: Standartinform, 1996. 24 s. (rus)

3. **Paramonov A.P.** Opredeleniye i testirovaniye empiricheskikh konstant dlya matematicheskoy modeli gorenija koksovogo ostatka, ispolzuyemoy v programmnom komplekse Fluent. [Determination and testing of empirical constants for mathematical models of combustion coke used in the software package Fluent]. *St. Petersburg State Politechnical Universiti Journal*. 2008. № 2(54). S. 144–149. (rus)

4. **Trinchenko A.A., Shestakov S.M.** Povysheniye ekologicheskikh pokazateley nizkotemperaturnykh vikhrevykh topok za schet razlozheniya oksidov azota na koksovykh chastitsakh. [Improving the environmental performance of the low-temperature vortex furnaces due to the decomposition of nitrogen oxides on the coke particles]. *St. Petersburg State Politechnical Universiti Journal*. 2008. №2(54). S. 149–156. (rus)

5. **Kondratiev V.N.** Konstanty skorosti gazofaznykh reaktsiy: Spravochnik. [The rate constants for gas phase reactions: Handbook.] Moscow: Nauka, 1971. 306 p. (rus)

6. **Pomerantsev V.V., Arefiev K.M., Akhmedov D.B.** Osnovy prakticheskoy teorii gorenija. [Fundamentals of practical combustion theory.] Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 312 s. (rus)

7. **Trinchenko A.A.** Vnedreniye nizkotemperaturnoy vikhrevoy tekhnologii szhiganiya v energeticheskikh kotlakh kak sposob povysheniya ikh ekologicheskikh pokazateley. [The introduction of the low-temperature

swirl combustion technology in power boilers as a way to improve their environmental performance]. *St. Petersburg State Politechnical Universiti Journal*. 2014. №4(207). S. 61–70. (rus)

8. **Romadin V.R.** Pyleprigotovleniye / [Pulverization.] Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1953. 519 p. (rus)

9. **Durachenko L.I.** [i dr.] Avtomatizirovanny metod pozonnogo teplovogo rascheta nizkotemperaturnykh vikhrevykh topok. [An automated method of calculation of the low-temperature thermal zone vortex furnaces]. *Voprosy szhiganiya topliv v parogeneratorakh*. Barnaul: API Publ., 1981. S. 29–34 (rus)

10. **Zel'dovich Y.B., Sadovnikov P.Y., Frank-Kamenetskiy D.A.** Okisleniye azota pri gorenii [The oxidation of nitrogen during combustion.] Moscow: AN USSR Publ., 1947. 146 p. (rus)

11. **Sigal I.Y.** Zashchita vozdušnogo basseyna pri szhiganii topliva. [Protection of the air basin from fuel combustion.] Leningrad: Nedra, 1988. 312 p. (rus)

12. **Kotler V.R.** Oksidy azota v dymovykh gazakh kotlov. [Nitrogen oxides in flue gases of boilers.] Moscow: Energoatomizdat, 1987. 144 p. (rus)

13. **Patankar M.** Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. [Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics.] Moscow: Energoatomizdat, 1984. 150 p. (rus)

14. **RD 153-34.1-26.303-98.** Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu ekspluatatsionnykh ispytaniy kotelnykh ustanovok [Methodological guidelines for conducting performance tests of boiler installations.] Moscow: ORGRES, 2000. 18 s. (rus)

15. **Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeev A.A.** Teplotekhnicheskiye ispytaniya kotelnykh ustanovok. [Thermal testing of boiler installations.] Moscow: Energy, 1977. 296 p. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ТРИНЧЕНКО Алексей Александрович – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: trinchenko@mail.ru

TRINCHENKO Aleksei A. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: trinchenko@mail.ru

ПАРАМОНОВ Александр Павлович – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: paramon@mail.ru

PARAMONOV Aleksandr P. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: paramon@mail.ru