

DOI: 10.1872/JEST.230206

УДК 621.181:622.612

*А.А. Тринченко, А.П. Парамонов*

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

## **ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕООРУЖЕНИЕ КОТЛА БКЗ-210–140–13,8 НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВИХРЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ**

В энергетике выполнение ужесточающихся нормативных требований к уровню выбросов загрязняющих веществ при использовании органического топлива как основного источника тепла требует постоянного совершенствования котельно-топочной техники и энергетического оборудования в целом. В работе приведены результаты численного исследования процессов горения, генерации и преобразования газовых загрязнителей, имеющего целью теоретическое обоснование и промышленную проверку возможности создания многотопливного низкотемпературного вихревого топочного устройства, удовлетворяющего современным требованиям природоохранного законодательства. Разработаны методика, алгоритм и компьютерная программа расчета, на их основе выполнена количественная оценка уровня выбросов оксидов азота при техническом перевооружении котла БКЗ-210–140ф Кировской ТЭЦ-4 и проведено сравнение с опытными данными, полученными после реконструкции. Расчетными и промышленными исследованиями доказана возможность создания и эффективной работы многотопливной низкотемпературной вихревой топки.

ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ; ЭНЕРГЕТИКА; ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕООРУЖЕНИЕ; ТОПЛИВО; ТОПОЧНАЯ КАМЕРА; ГОРЕНИЕ; ГАЗООБРАЗНЫЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

*Ссылка при цитировании:*

А.А. Тринченко, А.П. Парамонов. Техническое перевооружение котла бкз-210–140–13,8 на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 62–74. DOI: 10.1872/JEST.230206

*A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov*

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

## **TECHNICAL RE-EQUIPMENT OF THE BKZ-210–140–13,8 BOILER ON THE BASIS OF LOW-TEMPERATURE VORTEX COMBUSTION TECHNOLOGY**

Compliance with increasingly stringent regulatory requirements for the level of pollutant emissions from fossil fuels as a source of heat source in power engineering requires constant improvement of boiler-furnace equipment and energy equipment in general. The paper presents the results of a numerical study of the process of combustion, generation and conversion of gas pollutants for the theoretical justification and industrial verification of the possibility of creating a multi-fuel low-temperature swirl furnace that meets the requirements of environmental legislation. On the basis of the developed methods, algorithms and computer methods, a quantitative assessment of nitrogen oxide emissions during the technical re-equipment of the BKZ-210–140f boiler at the Kirov TPP-4 was performed, and their comparison with the experimental data obtained after the reconstruction was carried out. Calculated and industrial studies have proved that is possible to create and efficiently operate a multi-fuel low-temperature swirl furnace.

ENVIRONMENT PROTECTION; ENERGETICS; TECHNICAL RE-EQUIPMENT; FUEL; COMBUSTION CHAMBER; COMBUSTION; GASEOUS POLLUTANTS; NUMERICAL SIMULATION; MATHEMATICAL MODEL.

*Citation:*

A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov, Technical re-equipment of the BKZ-210–140–13,8 boiler on the basis of low-temperature vortex combustion technology, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 62–74, DOI: 10.1872/JEST.230206

**Введение**

В энергетике использование органического топлива как основного источника тепла требует постоянного совершенствования котельно-топочной техники и энергетического оборудования в целом. Выполнение ужесточающихся нормативных требований к уровню выбросов загрязняющих веществ<sup>1</sup> становится не возможным без внедрения новых технологий, позволяющих улучшить топочный процесс и оптимизировать его показатели и характеристики [1]<sup>2</sup>.

Низкотемпературная вихревая (НТВ) технология сжигания, разработанная в ЛПИ под руководством профессора В.В. Померанцева [2], на протяжении последних 40 лет прошла апробацию при сжигании широкой гаммы топлив (торф, лигниты, бурые угли, сланцы) [3–6] и в настоящее время зарекомендовала себя как одна из современных и перспективных для внедрения в энергетике.

Отличительная особенность низкотемпературного вихревого сжигания — малая чувствительность к изменению качества топлива и его состава [6], что увеличивает преимущества НТВ-технологии, а в ряде случаев становится определяющим при выборе способа реконструкции энергетических объектов.

Цель настоящей работы — численное исследование процесса горения, генерации и преобразования газовых загрязнителей для теоретического обоснования и промышленной проверки возможности создания многотопливного низкотемпературного вихревого топочного устройства, которое удовлетворяло бы современным требованиям энергетической отрасли и природоохранного законодательства.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50831–95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М., 1995.

<sup>2</sup> Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ 13.11.2009 № 1715-р.

**Объект и методы исследования**

Основанием для проведения исследований стало задание на техническое перевооружение котла БКЗ-210–140–13,8ф (БКЗ-210) Кировской ТЭЦ-4. Паровой котел БКЗ-210 (ст. № 9, заводской № 839) изготовлен на Барнаульском котельном заводе в 1967 году. Котел вертикально-водотрубный, однобарабанный, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, с твердым шлакоудалением, с уравновешенной тягой, имеет следующие расчетные параметры: паропроизводительность —  $D_{\text{пп}} = 210$  т/ч; давление перегретого пара —  $p_{\text{пп}} = 13,8$  МПа; температура перегретого пара —  $t_{\text{пп}} = 813$  К (540 °С). Номинальная тепловая мощность котла составляет  $Q = 143$  МВт = 123 Гкал/ч. Расчетное топливо — фрезерный торф, в связи с ограничениями поставок которого в котлах также сжигается кузнецкий каменный уголь марок Г и Д (табл. 1) и природный газ следующего состава, %:

Наименование	Значение
Метан $\text{CH}_4$ .....	98,82
Этан $\text{C}_2\text{H}_6$ .....	0,18
Пропан $\text{C}_3\text{H}_8$ .....	0,04
Углекислый газ $\text{CO}_2$ .....	0,1
Азот $\text{N}_2$ .....	0,81
Кислород $\text{O}_2$ .....	0
Бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$ .....	0,05
Удельная теплота сгорания на сухую массу (низшая), кДж/нм <sup>3</sup> .....	33462

Анализ работы котла БКЗ-210 (ст. № 9) Кировской ТЭЦ-4 выявил следующие основные недостатки:

1. Работа котлов на каменном угле ограничена шлакованием поверхностей нагрева. Наработка в бесшлаковочном режиме составляет от 20 до 30 суток в зависимости от качества угля. Максимальная нагрузка по условиям шлакования составляет не более 185 т/ч.

2. На твердом топливе (уголь и торф) котел работает с крайне низкими экономическими показателями. КПД (брутто) на каменном угле составляет 72–82 %, на торфе — 84–86 %. Расход резервного топлива при работе на фрезерном

Таблица 1

Расчетные характеристики кузнецкого каменного угля марок Г, Д и фрезерного торфа

Table 1

Calculated characteristics of Kuznetskiy coal grades G, D and milled peat

Наименование составляющих топлива	Обозначение	Размерность	Расчетные характеристики	
			Кузнецкий уголь	Фрезерный торф
Влага	$W_t^r$	%	11,2–22,3	55,1
Зола	$A^r$	%	13,2–22,3	6,6
Сера	$S^r$	%	0,2–0,4	0,1
Углерод	$C^r$	%	43,3–59,4	21,7
Водород	$H^r$	%	3,1–4,3	2,3
Азот	$N^r$	%	1,4–1,9	1,0
Кислород	$O^r$	%	7,2–9,8	13,2
Низшая теплота сгорания	$Q_i^r$	ккал/кг	4119–5643	1750
		кДж/кг	17245–23626	7327
Зольность на сухую массу	$A^d$	%	14,9–28,7	14,7

торфе достигает 20–30 % (по теплу). При работе на газе КПД (брутто) составляет 92–94 %.

3. Концентрация оксидов азота при сжигании каменного угля достигает 1500 мг/нм<sup>3</sup>, при сжигании торфа — до 700 мг/нм<sup>3</sup>, что значительно выше нормативных показателей. При работе на газе выбросы NO<sub>x</sub> достигают 370 мг/нм<sup>3</sup>.

Задача создать многотопливную топку определила выбор низкотемпературной вихревой технологии<sup>3,4</sup>, возможность использования которой на реконструируемом котле должна быть подтверждена результатами расчетов и численного моделирования.

Основные мероприятия при техническом перевооружении котла состояли в следующем. Топочная камера выполнена газоплотной (ширина и глубина топki по осям труб составляет соответственно 9536 и 6656 мм) из труб диаметром 60×5 мм с шагом 80 мм. Объем топочной камеры — 1011 м<sup>3</sup>. Площадь радиационных поверхностей нагрева составляет 655 м<sup>2</sup>, конвективных поверхностей — 31,6 м<sup>2</sup>. В нижней части

топки фронтальной и задней экраны образуют скаты «холодной» воронки, которые перекрывают ее устье в плане, при этом оставляя проход (по высоте) для выхода шлака из топki. В средней части топki (на отметке +12,0 м) в панели фронтальной стены установлены в один ярус по высоте 6 пылеугольных горелок, направленных вниз под углом 45° к горизонту, крайние из которых развернуты на угол 5° к оси топki. Горелка образована двумя каналами; по центру подается аэрозоль из молотковой мельницы, по образующей — вторичный воздух. Сечение для прохода аэрозоли каждой горелки составляет 0,22 м<sup>2</sup>, для прохода вторичного воздуха — 0,136 м<sup>2</sup>. На вертикальном участке боковой стены топki (между скатом холодной воронки и аэродинамическим выступом, на отметках +8,750 и +10,900 м) в два яруса установлены 4 газомазутные прямоточно-вихревые горелки типа ГМПВ-45 (900/540). Газомазутные горелки оборудованы защитно-запальными устройствами (ЗЗУ) и фотодатчиками для индивидуального контроля факела горелки. В устье холодной воронки установлена система нижнего дутья, состоящая из двух ярусов сопел — верхнего и нижнего, а на задней стене топki, по ее высоте на отметках +8,472, +13,764 и +17,266 м установлены сопла третичного дутья, равномерно разме-

<sup>3</sup> Патент РФ № 2253801. Вихревая топка / Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Приоритет 10.06.2005.

<sup>4</sup> Патент Евразийский № 008691. Вихревая топка / Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Приоритет 29.06.2007.

щенные по ширине котла. Для улучшения схода топлива реконструированы выходные части бункеров сырого угля, скребковые питатели заменены на двухступенчатые двухшнековые с регулируемой частотой вращения. Выполнена новая обмуровка и тепловая изоляция. Общий вид котельной установки после технического перевооружения показан на рис. 1, а технические характеристики котла приведены в табл. 2.

Одним из основных требований к результатам технического перевооружения, наряду с ликвидацией перечисленных ограничений, было обеспечение нормативных требований по выбросам оксидов азота<sup>5</sup> при работе на трех ви-

<sup>5</sup> ГОСТ Р 50831–95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М., 1995.

дах топлива (каменном угле, торфе и природном газе), что потребовало проведения модельных исследований их генерации и преобразования в топочном процессе проектируемого котла.

#### Моделирование объекта исследования, результаты расчета, их анализ и обсуждение

Математическая модель котла БКЗ-210 (НТВ) ст. № 9 Кировской ТЭЦ-4 (рис. 2) учитывает заложенные проектные решения и дает возможность их изменения для оптимизации конструктивных характеристик и режимных параметров работы.

Модель топочного процесса основана на диффузионно-кинетической теории горения [7], учитывает генерацию и преобразование

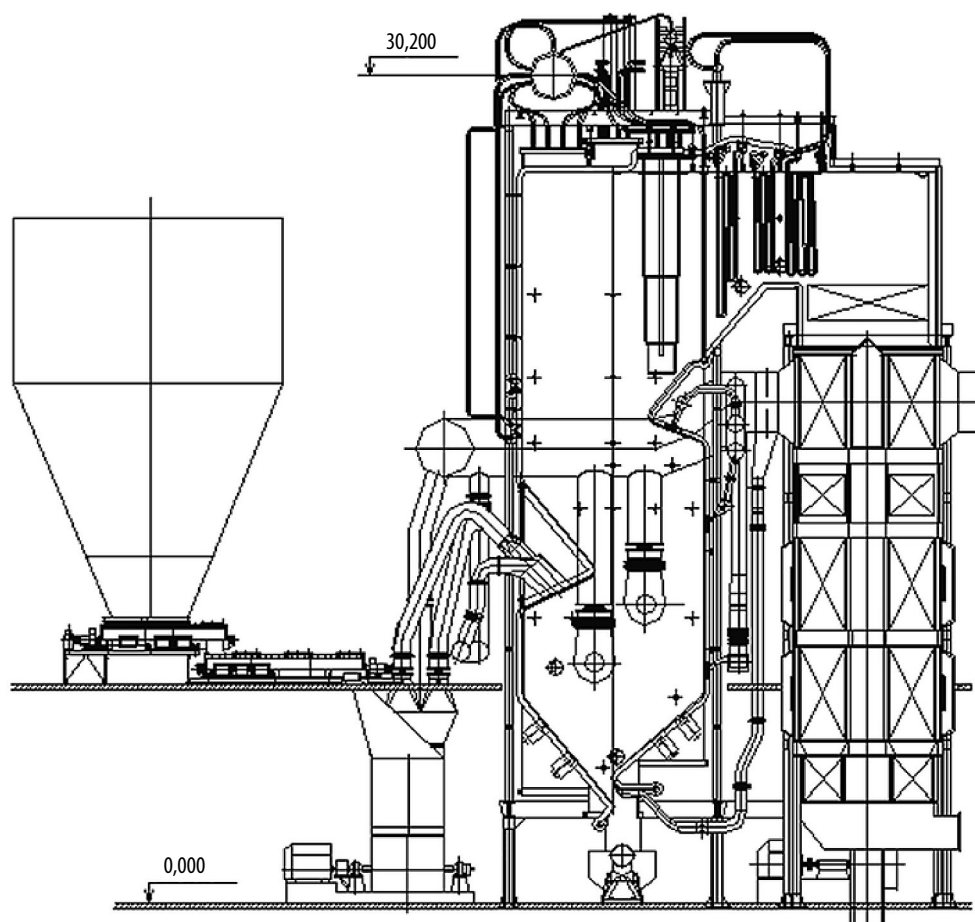


Рис. 1. Общий вид котельной установки БКЗ-210–13,8 Кировской ТЭЦ-4 после технического перевооружения на НТВ-технологии сжигания

Fig. 1. General view of the boiler plant BKZ-210–13.8 Kirov TPP-4 After technical re-equipment for NTV combustion technology

Таблица 2

Технические характеристики котла БКЗ-210 после технического перевооружения

Table 2

Technical characteristics of the boiler BKZ-210 after technical re-equipment

Вид топлива	Нагрузка котла		Расход топлива (расчетный), $V_p$ нм <sup>3</sup> /ч (т/ч)	Давление пара на выходе из котла, $P_{пп}$ , кг/см <sup>2</sup>	Температура, °С			КПД котла (брутто), %
	относительная $D/D_{ном} \times 100, \%$	абсолютная $D$ , т/ч			пара на выходе из котла, $t_{пп}$	воды на входе в котел $t_{пв}$	уходящих газов $\theta''_{ух}$	
Газ	119	250	19,3	140	540	230	118	94,8
	71	150	11,5	140	540	230	109	95,2
Уголь	119	250	31,2	140	540	230	134	92,4
	60	125	15,7	140	540	230	117	91,9
Фрез. торф	100	210	78,0	140	540	230	156	88,2
	60	125	46,3	140	540	230	139	88,5

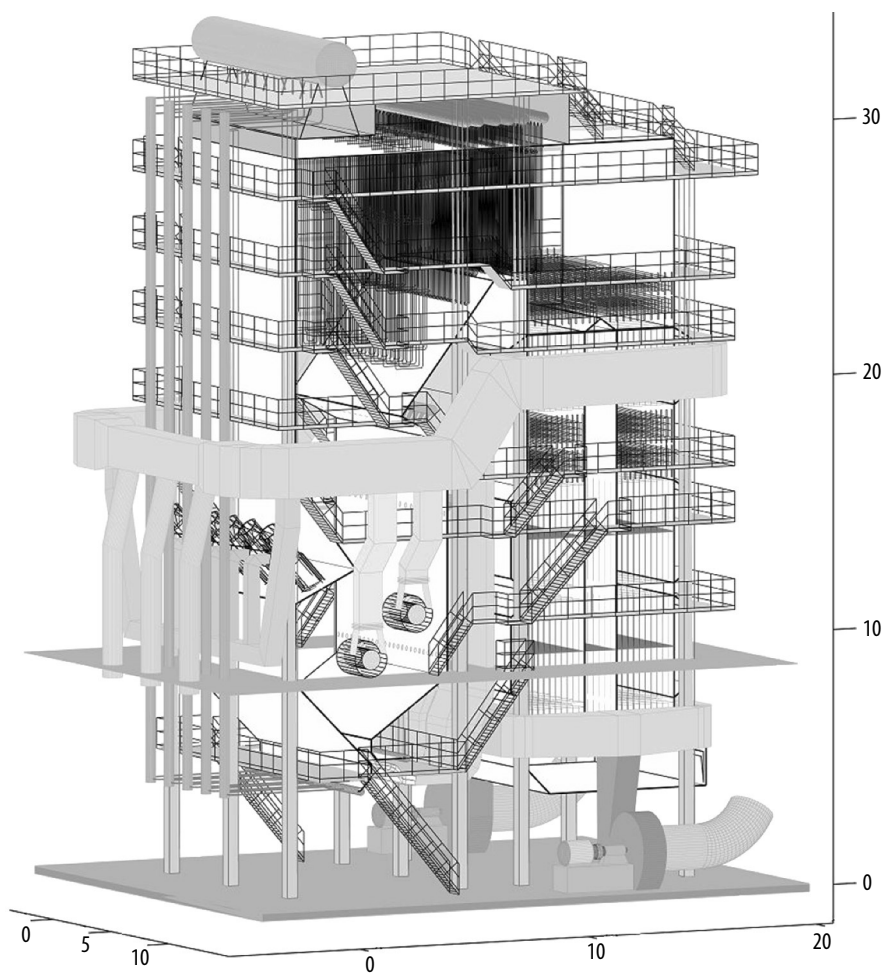


Рис. 2. Модель котла БКЗ-210 (НТВ) Кировской ТЭЦ-4 с низкотемпературной вихревой технологией сжигания

Fig. 2. Model of boiler BKZ-210 (LTS) of Kirov CHPP-4 with low-temperature swirl combustion technology

газообразных загрязнителей [8, 9], имеет возможность изменения качественных (вид и состав твердого топлива, его помол и пр.) и количественных характеристик процесса (расход топлива, скорости горелочного воздуха, воздуха нижнего и третичного дутья и пр.) и позволяет проводить количественные оценки выбросов газообразных загрязнителей при работе котла.

Нормативные показатели по выбросам оксидов азота при сжигании природного газа были гарантированы производителем газомазутных горелок ГМПВ-45, ввиду чего расчеты генерации оксидов азота для этого топлива не проводились.

Расчеты процесса горения в НТВ топке котла БКЗ-210 Кировской ТЭЦ-4 проведены для кузнецкого угля и фрезерного торфа, характеристики которых принимались средними по данным табл. 2. Размеры топливных частиц, их число на 1 кг расчетного топлива, масса в пределах каждой фракции и площадь начальной поверхности реагирования находились путем обработки гранулометрических характеристик исходных топлив — кузнецкого угля ( $R_{100} = 30 \%$ ,  $R_{500} = 1 \%$ ) и фрезерного торфа ( $R_{100} = 50 \%$ ,  $R_{1000} = 15 \%$ ). Расчетный размер самой мелкой частицы кузнецкого угля составил  $\delta_{\min} = 40,6$  мкм, самой крупной частицы —  $\delta_{\max} = 780$  мкм; для фрезерного торфа — соответственно  $\delta_{\min} = 380$  мкм и  $\delta_{\max} = 7,6$  мм.

Анализ гранулометрических характеристик проектных топлив показал, что при использовании кузнецкого угля ввиду его низкой реакционной способности предусматривается к сжиганию тонкая пыль с равномерным помолом: показатель полидисперсности  $n$  (0,8–1,6) составляет 0,834, а коэффициент  $b$ , характеризующий тонкость помола (изменяется от 0,004 (грубая пыль) до 0,04 (тонкая пыль)), — 0,026. В случае сжигания высокорекреакционного фрезерного торфа проектом предусмотрен крайне неравномерный и грубый помол топлива ( $n = 0,437$ ;  $b = 0,093$ ), который пылью не является.

Для проведения расчетов топочная камера разбивалась на элементарные ячейки [10], в узловых точках которых находились векторы скорости газоздушных потоков. Полученная аэродинамическая картина течений (рис. 3) использовалась для нахождения траекторий движения (рис. 4) и расчетов выгорания реагирующих топливных частиц с одновременным определе-

нием результирующей концентрации оксидов азота, образовавшихся в процессе горения и разлагающихся на поверхности горящего углерода в процессе многократной циркуляции в нижней вихревой зоне (НВЗ) НТВ топки.

Сравнивались расчетные траектории движения с экспериментальными, которые получены на котле БКЗ-210 Тюменской ТЭЦ (ст. № 12) с НТВ топкой путем их овиднения горящими опилками, смоченными в керосине (представлено на рис. 5 в одинаковом для наблюдателя ракурсе). Они хорошо совпадали как на начальном участке развития горелочной струи, так и в объеме низкотемпературной вихревой топки. Применительно к исследуемым расщепочным характеристикам время горения самой маленькой частицы кузнецкого угля составляло  $\sim 0,7$  с, а время полного сгорания частицы максимального размера находилось в пределах 19 с; для фрезерного торфа эти величины равны соответственно  $\sim 0,4$  и 8 с.

Организация ступенчатого подвода к топливу окислителя (горелочный воздух, нижнее и третичное дутье) затягивает процесс воспламенения, снижает локальные максимумы температур в топке, тормозит генерацию оксидов азота и в значительной мере способствует их снижению. Одновременно наличие ступенчатого подвода воздуха положительно сказывается на аэродинамической структуре газотопливных потоков и работе топочной камеры в целом. Двухсопловая схема нижнего дутья обеспечивает сепарацию топливных частиц в потоке вдоль фронтального ската топочной воронки. Верхнее сопло отбивает относительно мелкие (для рассматриваемой тонины помола) частицы ( $\delta_{\text{частиц}} < 250\text{--}280$  мкм), которые проходят вдоль ската, не касаясь топочных экранов (рис. 6, а), а крупные частицы ( $\delta_{\text{частиц}} > 300$  мкм) движутся вдоль ската (рис. 6, б) с меньшей скоростью под воздействием струи потока из основного сопла (провала частиц в шлаковый комод не происходит). Такая организация системы нижнего дутья значительно снижает вероятность возникновения эрозионного износа вплоть до полной его ликвидации. Третичное дутье нижнего яруса отклоняет поток частиц от заднего экрана топки, направляя его вдоль ската топочной воронки (рис. 6, а, б).

Третичное дутье среднего и верхнего ярусов служит для дожигания продуктов неполного горения путем интенсификации массообменных

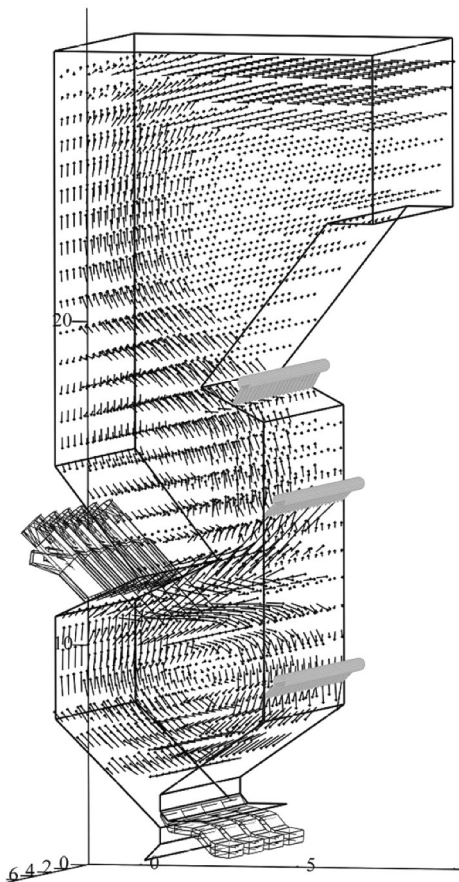


Рис. 3. Векторы скорости газозвудушных потоков в объеме НТВ-топки котла БКЗ-210

Fig. 3. Velocity vectors of gas-air flows at the volume of NTV-furnaces of the boiler BKZ-210

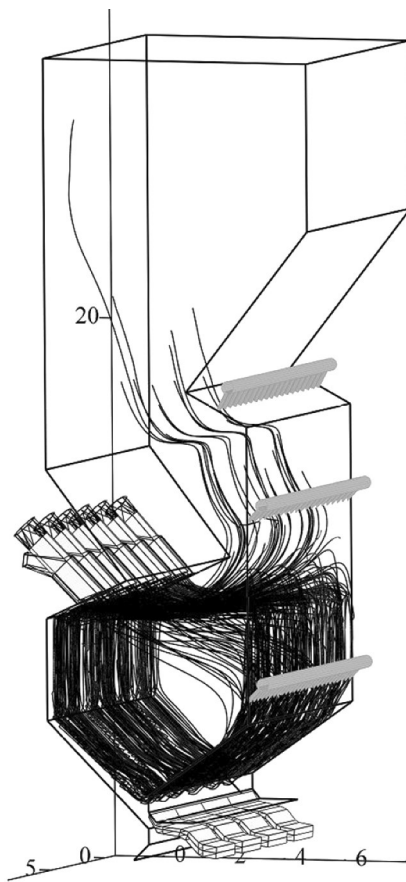


Рис. 4. Расчетные траектории движения реагирующих частиц кузнецкого угля в НТВ-топке котла БКЗ-210

Fig. 4. Calculated particle tracks of Kuznetskiy coal in the NTV furnace of the boiler BKZ-210

процессов, одновременно отклоняя поток движущихся частиц соответственно от заднего экрана (в верхней его части) и верхнего аэродинамического выступа, препятствуя удару частиц о трубную поверхность (см. рис. 4).

Для анализа расчетных результатов по ширине топочной камеры выбрано элементарное сечение, проходящее через ось горелки (рис. 7), применительно к которому (после усреднения по глубине топки) показаны концентрации оксидов азота (рис. 8).

В нижней части топочной воронки концентрации оксидов азота достигают  $1000\text{--}1300\text{ мг/м}^3$  с максимумом вблизи струи нижнего дутья. В сечении, проведенном через вершины скатов нижней вихревой зоны, концентрация  $\text{NO}_x$  снижается практически в два раза (до уровня

$500\text{--}700\text{ мг/м}^3$ ) при смещении максимума в область горелочной струи. В верхней части топки, на прямом ее участке, уровень концентрации оксидов азота составляет  $350\text{--}600\text{ мг/м}^3$  (в среднем  $400\text{--}500\text{ мг/м}^3$ ).

Расчеты итоговых концентраций оксидов азота при сжигании фрезерного торфа показали, что в целом их профили повторяют полученные применительно к сжиганию кузнецкого угля, имеют схожую неравномерность по глубине топки и к выходу из нее находятся на уровне  $350\text{--}450\text{ мг/м}^3$ .

Таким образом, после технического перевооружения котла БКЗ-210 Кировской ТЭЦ-4 (ст. № 9) на низкотемпературную вихревую технологию сжигания следует ожидать уменьшения выбросов оксидов азота и выполнения требований нормативных документов.

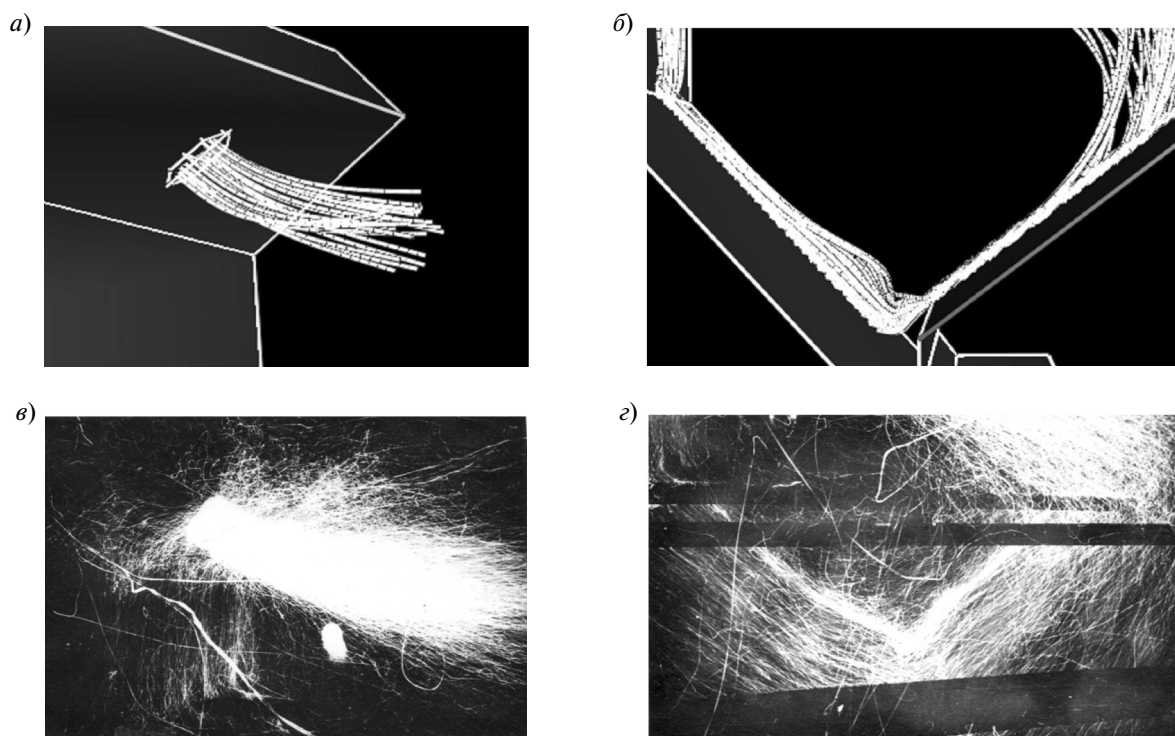


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных траекторий движения частиц в НТВ топке котла БКЗ-210: *а, б* — расчетные траектории частиц (котел БКЗ-210 Кировской ТЭЦ-4); *в, з* — экспериментальные траектории частиц (котел БКЗ-210 Тюменской ТЭЦ), овиднение потоков горящими опилками, смоченными в керосине; *а, в* — развитие горелочной струи на начальном участке; *б, з* — движение в НВЗ НТВ топки

Fig. 5. Comparison of calculated and experimental particle tracks in the NTV furnace of the boiler BKZ-210: *a, б* — calculated particle tracks (boiler BKZ-210 of Kirov TPP-4); *в, з* — experimental particle tracks (boiler BKZ-210 of Tyumen CHP), indication of the flows is organized with burning sawdust soaked in kerosene; *a, в* — development of a burner jet at the initial section; *б, з* — movement at the LSZ of LTS furnace

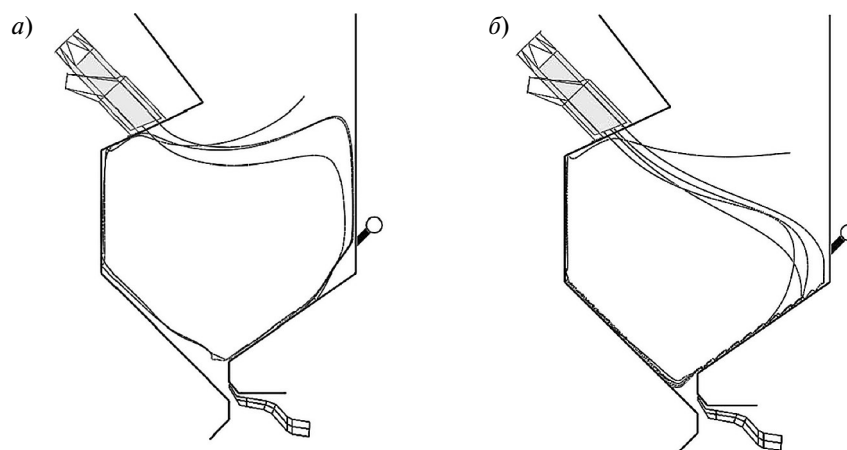


Рис. 6. Влияние системы нижнего дутья и третичного воздуха нижнего яруса на траектории движения реагирующих топливных частиц: *а* —  $\delta_{\text{частиц}} < 250-280 \mu\text{м}$ ; *б* —  $\delta_{\text{частиц}} > 300 \mu\text{м}$

Fig. 6. Influence of the lower blast system and tertiary air of the lower tier on the particle tracks of reacting fuel particles: *a* — particle diameter  $< 250-280 \mu\text{м}$ ; *б* — particle diameter  $> 300 \mu\text{м}$



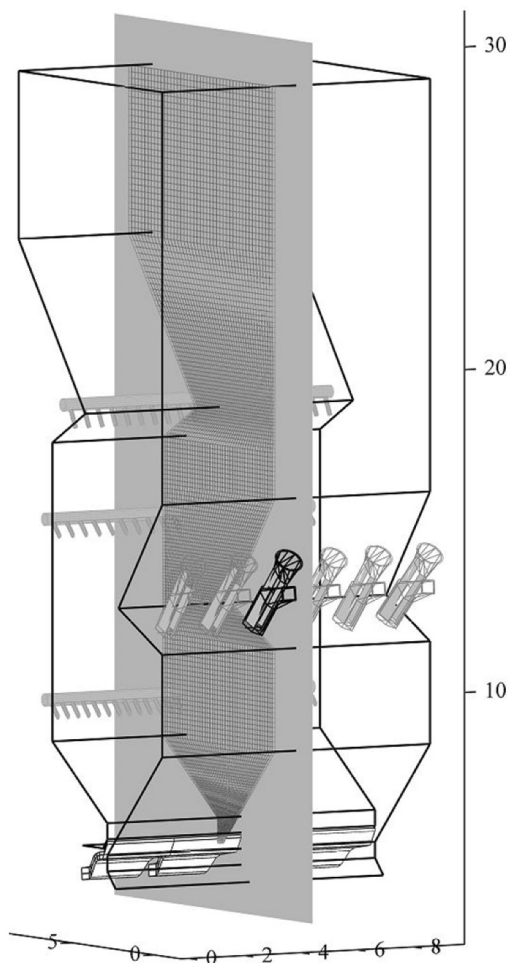


Рис. 7. Плоскость элементарного сечения топки котла БКЗ-210

Fig. 7. Elementary section plane of boiler BKZ-210 furnace

### Результаты работы

Результаты технического перевооружения после проведения пусконаладочных работ, режимно-наладочных и тепловых испытаний<sup>6</sup> на котле БКЗ-210 ст. № 9 [11] таковы:

При работе на газе в рабочем диапазоне нагрузок (120–250 т/ч, то есть 57–120 % от номинальной) обеспечиваются следующие показатели. КПД (брутто) котла находится практически на постоянном уровне — 95 % — и изменяется в узком диапазоне — 94,8–95,2 % (рис. 9, а). По-

<sup>6</sup> РД 153-34.1-26.303-98. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок. М.: ОРГРЭС, 2000. 18 с.

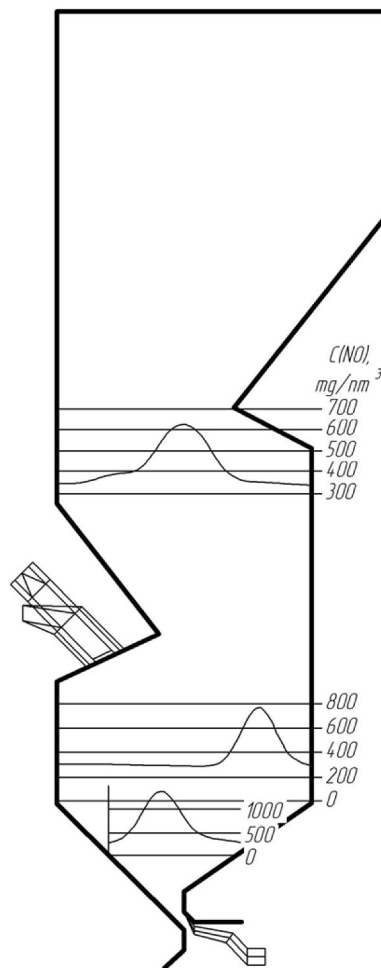


Рис. 8. Концентрации оксидов азота при сжигании кузнецкого каменного угля

Fig. 8. Concentrations of nitrogen oxides during combustion of Kuznetskiy coal

тери тепла с уходящими газами ( $q_2$ ) с ростом нагрузки увеличиваются от 3,5 % (при  $D_{\text{нп}} = 120$  т/ч) до 4,5 % (при  $D_{\text{нп}} = 250$  т/ч). Потери тепла с химическим недожогом ( $q_3$ ) составляют незначительную величину (менее 0,01 %) и не учитываются при составлении теплового баланса. Потери тепла от наружного охлаждения ( $q_5$ ) с ростом нагрузки уменьшаются от 1,14 % (при  $D_{\text{нп}} = 120$  т/ч) до 0,45 % (при  $D_{\text{нп}} = 250$  т/ч). Анализ результатов испытаний котла после технического перевооружения показал, что при работе на природном газе за счет организации его ступенчато-вихревого сжигания в топке котла в совокупности с использованием сертифицированных низкоэмиссионных горелок выбросы

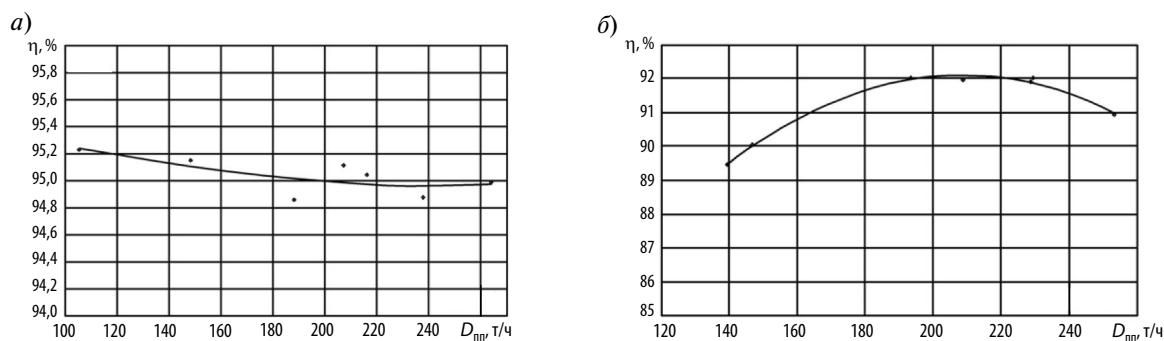


Рис. 9. Зависимость КПД брутто котла ( $\eta$ ) от нагрузки ( $D_{pp}$ ): *a* — при работе на природном газе; *б* — при работе на кузнецком угле

Fig. 9. Dependence of gross boiler efficiency ( $\eta$ ) on load ( $D_{pp}$ ): *a* — when working on natural gas; *б* — when working on Kuznetsk coal

оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) изменяются в диапазоне 110–125 мг/нм<sup>3</sup> (при  $\alpha = 1,4$ ) и не превышают действующего норматива 125 мг/нм<sup>3</sup> (рис. 10, *a*).

При работе на кузнецком угле в рабочем диапазоне нагрузок  $D = 140\text{--}250$  т/ч  $(0,66\text{--}1,2) \times D_{\text{ном}}$  обеспечиваются следующие показатели. КПД (брутто) котла с ростом нагрузки изменяется от 89,35 % (при  $D_{pp} = 140$  т/ч) до 91,0 % (при  $D_{pp} = 250$  т/ч) с максимальным значением 91,99 % при номинальной нагрузке котла 210 т/ч (рис. 9, *б*). Потери тепла с уходящими газами ( $q_2$ ) с ростом нагрузки уменьшаются от 7,26 % (при  $D_{pp} = 120$  т/ч) до 5,3 % (при  $D_{pp} = 210$  т/ч) и затем возрастают до 7,2 % (при  $D_{pp} = 250$  т/ч). Потери тепла с химическим недожогом ( $q_3$ ) составляют незначительную величину (менее 0,01 %). Потери тепла с механическим недожогом ( $q_4$ ) с ростом нагрузки уменьшаются от 2,5 % (при  $D_{pp} = 140$  т/ч) до 1,3 % (при  $D_{pp} = 250$  т/ч). Потери

тепла от наружного охлаждения ( $q_5$ ) с ростом нагрузки уменьшаются от 0,86 % (при  $D_{pp} = 140$  т/ч) до 0,47 % (при  $D_{pp} = 250$  т/ч). Потери тепла с физическим теплом шлака ( $q_6$ ) отсутствуют. Концентрация оксидов азота на выходе из котла находится в пределах 350–500 мг/нм<sup>3</sup> (рис. 10, *б*), что в среднем удовлетворяет требованиям нормативных документов и хорошо согласуется с данными расчетного исследования.

При работе на фрезерном торфе в рабочем диапазоне нагрузок  $D = 140\text{--}210$  т/ч  $(0,66\text{--}1,0) \times D_{\text{ном}}$  обеспечиваются следующие показатели. КПД (брутто) котла с ростом нагрузки изменяется от 89,80 % (при  $D_{pp} = 140$  т/ч) до 90,3 % (при  $D_{pp} = 210$  т/ч) с максимальным значением 90,44 % при нагрузке 185 т/ч. Потери тепла с уходящими газами ( $q_2$ ) возрастают с ростом нагрузки от 7,02 % (при  $D_{pp} = 140$  т/ч) до 8,03 % (при  $D_{pp} = 210$  т/ч). Потери тепла с химическим недо-

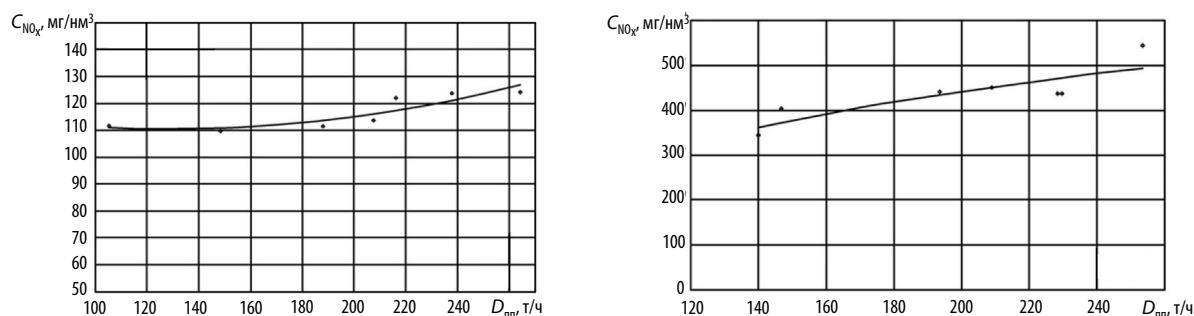


Рис. 10. Содержание оксидов азота в уходящих газах в зависимости от нагрузки: *a* — при работе на природном газе; *б* — при работе на кузнецком угле

Fig. 10. Content of nitrogen oxides in flue gases depending on the load: *a* — when working on natural gas; *б* — when working on Kuznetsk coal

жом ( $q_3$ ) составляют незначительную величину (менее 0,01 %) и не учитываются при составлении теплового баланса. Потери тепла с механическим недожогом ( $q_4$ ) с ростом нагрузки уменьшаются от 2,15 % (при  $D_{пп} = 140$  т/ч) до 0,95 % (при  $D_{пп} = 210$  т/ч). Потери тепла от наружного охлаждения ( $q_5$ ) с ростом нагрузки уменьшаются от 0,87 % (при  $D_{пп} = 140$  т/ч) до 0,59 % (при  $D_{пп} = 210$  т/ч). Потери тепла с физическим теплом шлака ( $q_6$ ) отсутствуют. Содержание оксидов азота в уходящих газах находится на уровне 450–550 мг/нм<sup>3</sup> (норматива при сжигании торфа ГОСТ Р50831–95 не предусматривает), что несколько превышает этот показатель по сравнению с кузнечным углем. По всей видимости, несмотря на несколько меньшее содержание

азота в торфе, разложение оксидов азота на угле-роде кокса также присутствует в меньшей мере из-за низкого содержания в торфе углерода.

Основные технико-экономические показатели работы котла БКЗ-210 ст. № 9 Кировской ТЭЦ-4 после технического перевооружения приведены в табл. 3, а сопоставление экологических показателей котла до и после технического перевооружения приведено в табл. 4.

### Выводы

При работе на кузнечном угле и фрезерном торфе организация низкотемпературного вихревого сжигания твердого топлива в условиях многократной циркуляции топливных частиц и ступенчатого подвода окислителя позволила

Таблица 3

**Технико-экономические показатели работы котла БКЗ-210 ст. № 9 Кировской ТЭЦ-4 после технического перевооружения**

Table 3

**Technical and economic parameters of the boiler BKZ-210 St. No 9 of Kirov TPP-4 after technical re-equipment**

Топливо	Рабочий диапазон нагрузок $D_{пп}$ , т/ч	КПД котла (брутто) $\eta$ , %	Потери тепла, %				
			с уходящими газами	с хим. недожогом	с мех. недожогом	от наружного охлаждения	с физическим теплом шлака
Природный газ	120–250	94,7–95,2	3,63–4,62	0	0	0,45–1,14	0
Кузнечный уголь	140–250	89,35–91,99	5,51–7,26	0	1,29–2,54	0,47–0,86	0
Фрезерный торф	140–210	89,78–90,44	7,02–8,03	0	0,95–2,15	0,59–0,87	0

Таблица 4

**Экологические показатели котла БКЗ-210 ст. № 9 Кировской ТЭЦ-4 до и после технического перевооружения**

Table 4

**Ecological indicators of the boiler BKZ-210 St. No 9 of Kirov TPP-4 before and after technical re-equipment**

Топливо	Содержание оксидов азота $C(NO_x)$ , мг/нм <sup>3</sup> при $\alpha = 1,4$		
	До технического перевооружения	После технического перевооружения	Нормативные требования [1]
Кузнечный уголь Г,Д	до 1500	350–500	470
Фрезерный торф	до 700	450–550	—
Природный газ	300–370	110–125	125



обеспечить низкий уровень температур в топке и, как следствие, значительно уменьшить генерацию топливных оксидов азота, а также интенсифицировать в нижней вихревой зоне (за счет выгорания в ней основной массы топлива) реагирование образовавшихся  $\text{NO}_x$  с углеродом кокса, что в совокупности снизило выбросы

оксидов азота до 350–500 мг/нм<sup>3</sup> при работе на угле и до 450–550 мг/нм<sup>3</sup> при работе на торфе.

Учитывая положительный опыт технического перевооружения котла БКЗ-210 ст. № 9 на низкотемпературную вихревую технологию сжигания, на Кировской ТЭЦ-4 намечено внедрение этой технологии на аналогичном котле ст. № 8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тумановский А.Г., Шварц А.Л., Мещеряков В.Г., Толчинский Е.Н. Основные направления совершенствования котельной техники при техническом перевооружении угольных ТЭС // Теплоэнергетика. 2000. № 8. С. 3–8.
2. 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.
3. Шестаков С.М. Комплексное исследование топки с многократной циркуляцией частиц и пониженными выбросами вредных веществ // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. С. 142–158.
4. Рундыгин Ю.А., Шестаков С.М., Ахмедов Д.Б. Освоение и исследование котла БКЗ-420–140–9 с вихревой топкой ЛПИ // Теплоэнергетика. 1989. № 1. С. 12–16.
5. Grigoryev K.A., Roundyguine Yu.A., Skuditskii V.E., Anoshin R.G., Paramonov A.P., Trichenko 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.
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.
7. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
8. 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.
9. 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.
10. Патанкар М. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
11. 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.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**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

**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

## REFERENCES

1. Tumanovskiy A.G., Shvarts A.L., Meshcheryakov V.G., Tolchinskiy Ye.N. Osnovnyye napravleniya sovershenstvovaniya kotelnoy tekhniki pri tekhnicheskom perevooruzhenii ugolnykh TES. *Teploenergetika*. 2000. № 8. S. 3–8. (rus.)
2. 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 Politekhn. un-ta, 2006. S. 133–149. (rus.)

3. **Shestakov S.M.** Kompleksnoye issledovaniye topki s mnogokratnoy tsirkulyatsiyey chastits i ponizhennymi vybrosami vrednykh veshchestv. *Problemy ekonomii toplivno-energeticheskikh resursov na prompredpriyatiyakh i TES*. SPb.: SPbGTU, 1999. S. 142–158. (rus.)

4. **Rundygin Yu.A., Shestakov S.M., Akhmedov D.B.** Osvoyeniye i issledovaniye kotla BKZ-420–140–9 s vikhrevooy topkoy LPI. *Teploenergetika*. 1989. № 1. S. 12–16. (rus.)

5. **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.

6. **Trinchenko A.A., Paramonov A.P.** Vnedreniye nizkotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiya dlya energeticheskogo ispolzovaniya kamennykh ugley [The introduction of low-temperature vortex combustion for energy use coals]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2015. № 4 (231). S. 72–81. (rus.)

7. **Pomerantsev V.V., Arefyev K.M., Akhmedov D.B.** Osnovy prakticheskoy teorii goreniya. L.: Energoatomizdat, 1986. 312 s. (rus.)

8. **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 low-temperature vortex furnaces due to the decomposition of nitrogen oxides in the coke particles]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2008. № 2 (54). S. 149–156. (rus.)

9. **Trinchenko A.A.** Vnedreniye nizkotemperaturnoy vikhrevooy tekhnologii szhiganiya v energeticheskikh kotlakh kak sposob povysheniya ikh ekologicheskikh pokazateley [The introduction of low-temperature swirl combustion technology in power boilers as a way to improve their environmental performance]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2014. № 4 (207). S. 61–70. (rus.)

10. **Patankar M.** Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. M.: Energoatomizdat, 1984. 150 s. (rus.)

11. **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.)

#### AUTHORS

**TRINCHENKO Aleksei A.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: trinchenko@mail.ru

**PARAMONOV Aleksandr P.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: paramon@mail.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 08.11.2016.**