



УДК 504.06:621.181

*А.А. Тринченко*

## **ВНЕДРЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВИХРЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

*А.А. Trinchenko*

### **ADOPTION OF LOW-TEMPERATURE SWIRL COMBUSTION TECHNOLOGY IN POWER BOILERS AS A WAY FOR IMPROVING THEIR ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS**

Разработана математическая модель горения твердого топлива в энергетическом котле при внедрении низкотемпературного вихревого способа сжигания, генерации и преобразования в топочном процессе оксидов азота и серы. Разработана методика количественной оценки уровня выбросов, выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными после реконструкции на новую технологию котла БКЗ-220–9,8 Новомосковской ГРЭС.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОТЕЛ; ТОПОЧНАЯ КАМЕРА; ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО; ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ОКСИДЫ АЗОТА; ОКСИДЫ СЕРЫ; СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ.

The article deals with the results of developing the mathematical model of solid fuel combustion in the power boiler by adopting the method of low-temperature swirl combustion, generation and conversion in the combustion process of nitrogen and sulfur oxides. The quantitative evaluation procedure is developed. It is carried out the comparison of calculation results with experimental data obtained after the reconstruction of the new technology BKZ-220-9,8 of Novomoskovskaya TPP.

POWER BOILER; FURNACE; SOLID FUEL; COMBUSTION PROCESS; MATHEMATICAL MODEL; NITROGEN OXIDES; SULFUR OXIDES; REDUCTION OF HARMFUL EMISSIONS.

Экономика России снова предъявляет к электроэнергетике повышенный спрос. В соответствии с утвержденными решением правительства РФ «Объемами электропотребления в России» среднегодовой прирост данного показателя в 2016–2020 годах согласно базовому варианту прогноза составит около 4 % (для сравнения: среднегодовой прирост объема электропотребления в начале 2000-х годов был менее 2 %). Для достижения обозначенных показателей электроэнергетика должна обеспечить вводы новых генерирующих мощностей в значительном объеме. В настоящее время и в перспективе основу энергетики России бу-

дут составлять тепловые электростанции, что подтверждается плановыми данными ввода новых генерирующих мощностей до 2020 года по видам электростанций. При этом в структуре генерирующих мощностей ТЭС до 2020 года планируется рост доли угольных энергоблоков за счет снижения доли газовых.

Сжигание органического топлива для выработки тепловой и электрической энергии сопровождается загрязнением атмосферы городов и промышленных центров оксидами азота и серы [1, 2, 3], в то время как действующие нормативы [4] жестко ограничивают выбросы энергетическими котлами этих загрязнителей.

Альтернативой широко используемой в настоящее время схеме прямого факела служит низкотемпературная вихревая (НТВ) технология сжигания органических топлив, разработанная в конце 1960-х годов коллективом кафедры реактор- и парогенераторостроения ЛПИ под руководством профессора В.В. Померанцева. Ее использование позволяет добиться снижения генерации вредных веществ (на 20–30 % — концентрации оксидов азота, на 15–30 % — концентрации оксидов серы) в уходящих газах котлов по сравнению с пылеугольным факелом.

Цель настоящей работы — разработка алгоритма, методики и математической модели расчета процесса горения с учетом генерации и преобразования вредных веществ, оценка ожидаемого уровня загрязнителей в уходящих газах для повышения экологических показателей котлов при внедрении НТВ-технологии в энергетике.

Преимущества НТВ-технологии позволили использовать ее при реконструкции котла БКЗ-220–9,8 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС (паропроизводительность —  $D_n = 61$  кг/с, давление острого пара —  $p_{пе} = 9,8$  МПа, температура перегрева —  $t_{пе} = 783$  К, тепловая мощность —  $Q_k = 152$  МВт), работающего на подмосковном буром угле. Бурый уголь подмосковного бассейна, поступающие на НГРЭС, относятся к группе Б2 — с массовой долей рабочей влаги  $W_r' = 30–40$  %. Топливо поступает в основном с шахт «Подмосковная» и «Бельковская»; при этом теплотехнические характеристики угля могут значительно различаться, что вызывает целый ряд проблем в работе котельно-топочного оборудования. Кроме того, проблемы эксплуатации котлов осложнены высоким уровнем выбросов оксидов азота (ввиду высокой температуры факела) и оксидов серы (из-за повышенного содержания серы (~ 2 %) в подмосковном угле).

Реконструкция котла БКЗ-220–9,8 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС на низкотемпературную вихревую технологию предусматривала обеспечение устойчивой работы на подмосковном буром угле (табл. 1) без подсветки факела резервным топливом во всем рабочем диапазоне нагрузок, ликвидацию шлакования, обеспечение высоких технико-экономических показателей с одновременным снижением выбросов

оксидов азота и серы, что определило необходимость их достоверного прогноза.

Модель процесса горения подмосковного бурого угля в НТВ-топке котла БКЗ-220–9,8 ст. № 15 НГРЭС (рис. 1) построена с учетом основных положений, изложенных в [5, 6]: сложной аэродинамики НТВ-топки; стадийного процесса горения частиц топлива полифракционного состава, их возможного разрушения под воздействием высоких температур и ударных напряжений; генерации и разложения оксидов азота в процессе многократной циркуляции; реагирования образовавшихся оксидов серы с CaO и MgO (компонентами золы топлива).

Динамика развития горелочных струй котла БКЗ-220–9,8 НГРЭС (система круглых струй в сносящем потоке) рассчитывалась путем решения системы параметрических уравнений вида

$$\begin{cases} x = [R(\varphi) + r(\varphi) \cos(\psi)] \cos(\varphi); \\ y = [R(\varphi) + r(\varphi) \cos(\psi)] \sin(\varphi); \\ z = r(\varphi) \sin(\psi), \end{cases} \quad (2)$$

где  $x, y, z$  — координаты точек поверхности струи;  $\varphi$  — угол поворота струи (для котла БКЗ-220–9,8 (ст. № 15) НГРЭС:  $0 \leq \varphi \leq 0,8\pi$ );  $\psi$  — полярный угол границ струи (для круглых струй:  $0 \leq \psi \leq 2\pi$ ).

Переменный в зависимости от глубины проникновения радиус оси струи (траектория струи) описывается зависимостью

$$R(\varphi) = k_s e^{-\varphi/2}, \quad (3)$$

где  $k_s = f(l)$  — коэффициент, характеризующий глубину проникновения системы струй, находится из рекомендуемого в [7] для струй круглого сечения выражения

$$\frac{l}{d_0} = k_s \frac{W_0}{W_{II}} \sqrt{\frac{\rho_0(273/T_0)}{\rho_{II}(273/T_{II})}} \sin \alpha. \quad (4)$$

Траектория системы круглых струй в поперечном потоке рассчитывается по зависимости Ю.В. Иванова

$$\frac{ay}{d_0} = 195 \left( \frac{\rho_c(273/T_c)W_c^2}{\rho_0(273/T_0)W_0^2} \right)^{1,3} \left( \frac{ax}{d_0} \right)^3 + \frac{ax}{d_0} \operatorname{ctg} \alpha, \quad (5)$$

где  $d_0$  — начальный диаметр струи (диаметр сопла (горелки));  $\alpha$  — угол атаки;  $x$  — расстояние от

Теплотехнические характеристики подмосковного угля, принятые для расчетов

Наименование характеристики и ед. измерения	Значения характеристик в расчетных вариантах		
	Основной	Ухудшенный (шахта Бельковская)	Улучшенный (шахта Подмосковная)
Элементарный состав топлива на рабочую массу:			
влага $W_t^r$ , %	28,9	27,0	31,0
зола $A^r$ , %	34,6	41,9	21,4
сера (пиритная + органическая) $S^r$ , %	1,9(1,1+0,8)	2,0	3,0
Углерод $C^r$ , %	23,3	20,9	31,9
Водород $H^r$ , %	2,0	1,6	2,4
Азот $N^r$ , %	0,4	0,4	0,7
Кислород $O^r$ , %	8,9	6,2	9,6
ВСЕГО %	100	100	100
Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , ккал/кг	1997	1787	2797
кДж/кг	8361	7482	11710
Зольность в расчете на сухую массу $A^d$ , %	48,7	57,4	31,0
Приведенные характеристики:			
влажность $W_{пр}^r$ , %кг/МДж	3,46	3,61	2,65
зольность $A_{пр}^r$ , %кг/МДж	4,14	5,60	1,83
сера $S_{пр}^r$ , %кг/МДж	0,227	0,267	0,256
Теоретически необходимое количество воздуха $V^0$ , м <sup>3</sup> /кг	2,37	2,14	3,27
Объемы продуктов сгорания (при $\alpha = 1$ ) $V_r^0$ , м <sup>3</sup> /кг, в том числе:	2,94	2,64	3,9
трехатомных газов $V_{RO_2}$ , м <sup>3</sup> /кг	0,45	0,4	0,62
азота $V_{N_2}$ , м <sup>3</sup> /кг	1,88	1,69	2,6
водяных паров $V_{H_2O}$ , м <sup>3</sup> /кг	0,62	0,55	0,71
Выход летучих на сухое беззольное состояние $V^{daf}$ , %	55	—	—
Коэффициент размолоспособности $K_{ло}$ ,	1,8	—	—

среза сопла;  $a$  — коэффициент неравномерности поля скоростей на выходе из сопла (для круглой струи  $a = 0,07-0,08$ ). Уравнение (5) справедливо при  $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$  и при  $0,00145 \leq \rho_c W_c^2 / \rho_0 W_0^2 \leq 0,08$ .

Местоположение множества точек  $r(\varphi)$ , описывающих границы струи в произвольном сечении (перпендикулярном к оси струи), находится из выражения

$$r(\varphi) = de^{-\varphi/2}, \quad (6)$$

где  $d = f(x)$  — изменение диаметра струи в зависимости от ее длины.

Анализ результатов расчета динамики развития системы горелочных струй показал, что

после разворота горелочные струи практически полностью сливаются (рис. 2), что дает возможность прямооточную часть факела рассматривать как единый восходящий поток.

Разбиение топки на ряд характерных зон (струя нижнего дутья, круглые горелочные струи, нижняя вихревая зона, прямооточная часть факела) позволило получить аэродинамическую картину течения газовых потоков в НТВ-топке котла БКЗ-220 ст. № 15 Новомосковской ГРЭС (рис. 3).

Расчеты траекторий движения реагирующих частиц производились путем численного решения уравнения движения, записанного в проекциях на оси декартовой системы координат,

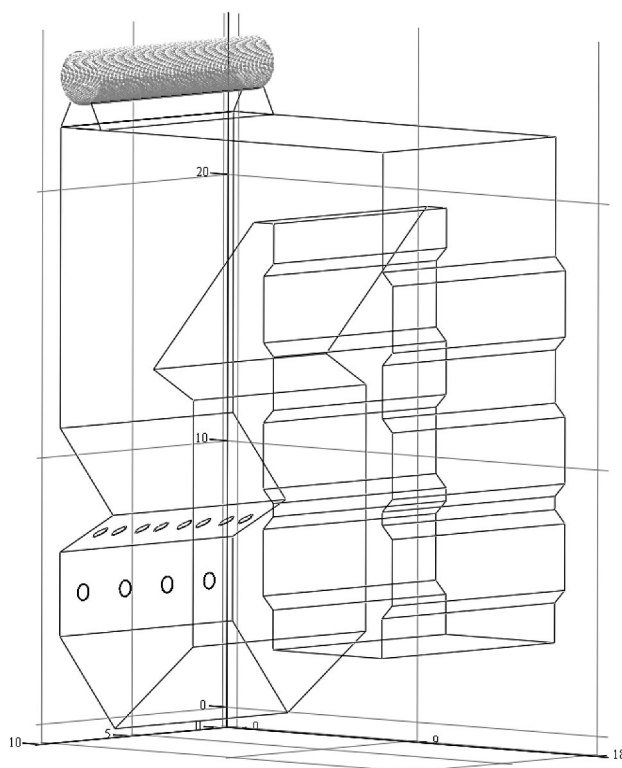


Рис. 1. Расчетная модель котла БКЗ-220-9,8  
(ст. № 15) Новомосковской ГРЭС

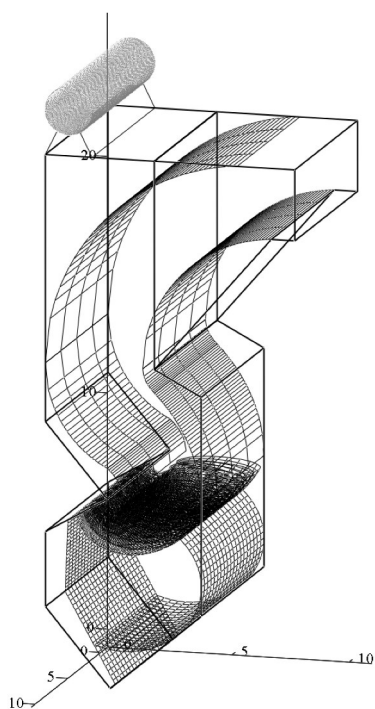


Рис. 2. Аэродинамическая модель  
топки котла БКЗ-220 (ст. №15)  
Новомосковской ГРЭС

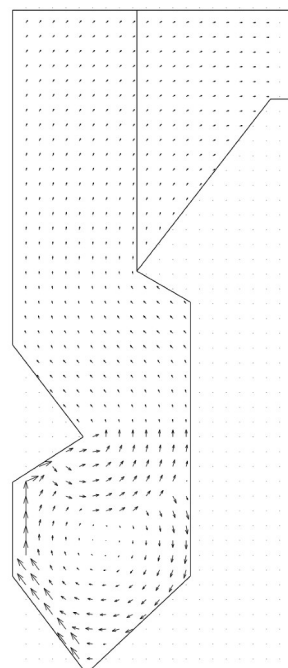


Рис. 3. Векторное поле скоростей  
в НТВ-топке котла БКЗ-220  
(ст. №15) Новомосковской ГРЭС

которое учитывает действие на частицу двух основных сил — силы тяжести и силы аэродинамического сопротивления:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{d\tau} = \frac{cf\rho_r}{2}(W_x - V_x) \times \\ \quad \times \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2}; \\ m \frac{dV_y}{d\tau} = \frac{cf\rho_r}{2}(W_y - V_y) \times \\ \quad \times \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2}; \\ m \frac{dV_z}{d\tau} = \frac{cf\rho_r}{2}(W_z - V_z) \times \\ \quad \times \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2} - mg, \end{cases} \quad (7)$$

где  $V$  и  $W$  — скорости частицы и газового потока;  $c = f(\text{Re})$  — коэффициент сопротивления горящих частиц;  $m, f$  — соответственно масса и площадь миделева сечения частицы;  $\rho_r$  — плотность газового потока.

Обработка рассеивочной кривой расчетного топлива для гранулометрического состава  $R_{90} = 70 \%$ ,  $R_{1000} = 10 \%$  позволила получить (в расчете на 1 кг) размеры частиц, их количество, массу и начальную площадь поверхности для каждой из десяти расчетных фракций. Диаметр самой крупной частицы  $(\delta_{01})_{10}$ , определенный из соотношения  $\delta_{01} = (6,9/b)^{1/n}$  (где  $b$  и  $n$  — опытные коэффициенты, характеризующие соответственно тонкость помола и равномерность зернового состава [7]), составил  $2,15 \cdot 10^{-3}$  м.

Температуры в НТВ-топке котла БКЗ-220–9,8 НГРЭС получены путем позонного теплового расчета [8].

Модель процесса горения основана на диффузионно-кинетической теории, учитывает генерацию и разложение оксидов азота, генерацию и преобразование оксидов серы, позволяет проводить количественные оценки выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  при работе котлов. Для решения задачи применены понятия «приведенной пленки» ( $\Delta/\delta = 1/(\text{Nu}_D - 2)$ ), безразмерной координаты ( $\xi = x/\Delta$ ), критерия Семенова ( $\text{Se} = (k_4 \cdot \Delta/D)^{0,5}$ ); диффузионно-химического критерия ( $N_i = k_i/\alpha_D$ ), зависимости Аррениуса для констант скоростей реакций ( $k_i = k_{0i} \exp(-E_i/RT)$ ), «полюса» с координатами  $k^* = 100$  м/с,  $T^* = 2600$  К, энергии активации. При этом сделаны следующие допущения: стефановский поток не ока-

зывает существенного влияния на толщину приведенной пленки; приведенная пленка рассматривается как плоская, термодиффузия по ее толщине отсутствует; скорость гомогенных реакций и коэффициент диффузии рассчитываются по средней температуре приведенной пленки; для диффузии в многокомпонентной газовой смеси принят средний коэффициент диффузии; температура частицы принята равной температуре потока.

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

$$\begin{cases} dG_j = -(D/RT)(d^2 p_j / dx^2) dx; \\ G_j = (\alpha_D / RT)(p_j - p_{j0}); \\ dG_i / d\tau = C_i k_i \end{cases} \quad (8)$$

с учетом окислительных и восстановительных реакций, идущих на поверхности частиц, и гомогенных реакций, протекающих в пределах пограничного слоя. Результат решения системы (8) — выражение для потока углерода, кмоль/м<sup>2</sup>·с, исчезающего с поверхности частиц:

$$G_c = \frac{\alpha_D}{RT} \left( \frac{N_3}{1 + N_3} p_{\text{CO}_2\Delta} + \frac{N_{3'}}{1 + N_{3'}} \times \right. \\ \left. \times (p_{\text{O}_2\Delta} + 0,5 p_{\text{H}_2\text{O}\Delta}) + \frac{N_5}{1 + N_5} p_{\text{NO}\Delta} \right). \quad (9)$$

Убыль массы и размера частиц определяются из зависимостей

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{dm_{\text{wг}}}{d\tau} + \frac{dm_{\text{лет}}}{d\tau} + \frac{dm_c}{d\tau}, \text{ кг/с}; \quad (10)$$

$$\frac{dm_c}{d\tau} = -G_c M_c \pi \delta^2, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}; \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{2M_c}{\rho_{\text{ч}}} G_c, \text{ м/с}, \quad (12)$$

где  $M_c = 12$  кг/кмоль — молярная масса углерода;  $m = \pi/6 \delta_{\text{ЭКВ}}^3$ ;  $\rho$  — масса сферической частицы, кг;  $f_{\text{пов}} = \pi \delta_{\text{ЭКВ}}^2$  — площадь наружной поверхности, м<sup>2</sup>.

Сепарация горящих топливных частиц в НТВ-топке отражена на рис. 4. Мелкие частицы, попадая в топочную камеру, сразу направляются в прямооточную часть факела, где сгорают практически мгновенно. Крупные частицы попада-

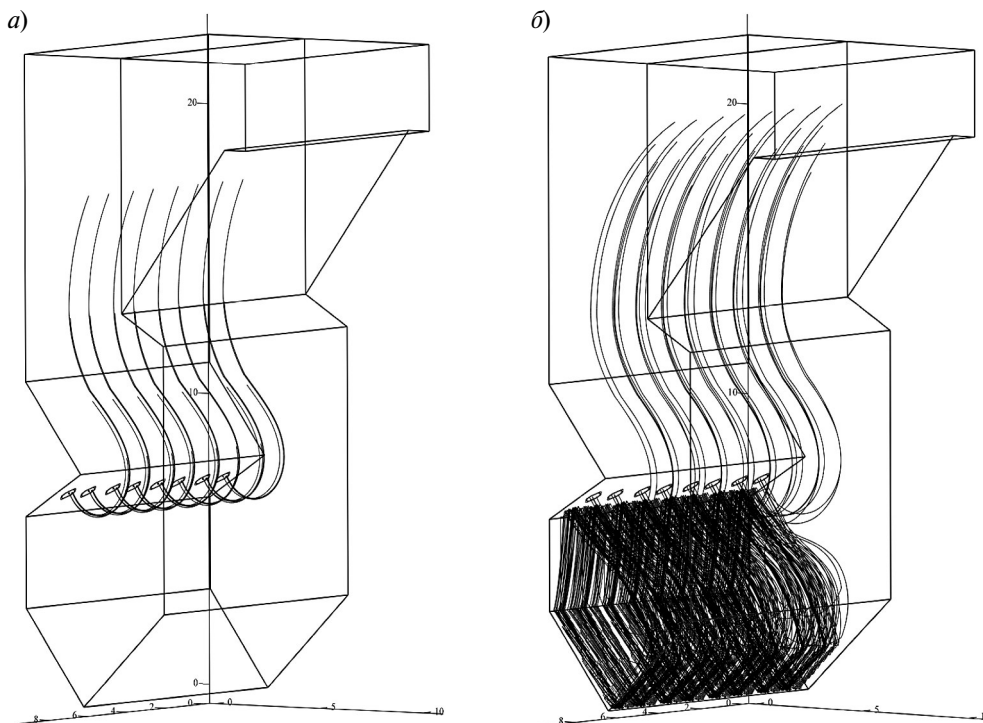


Рис. 4. Сепарация реагирующих топливных частиц и их выгорание в НТВ-топке котла БКЗ-220 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС:

*a* — мелкие частицы ( $\delta = 3,1 \cdot 10^{-5} - 4,56 \cdot 10^{-4}$  м); *б* — крупные частицы ( $\delta = 6,52 \cdot 10^{-4} - 2,15 \cdot 10^{-3}$  м)

ют в нижнюю вихревую зону, где циркулируют и выгорают до того момента, пока не будут вынесены в верхнюю часть топки. Разрушения топливных частиц (в виду их относительно небольшого размера  $\delta_{01\max} = 2,15 \cdot 10^{-3}$  м) при ударе о поверхности нагрева топки не происходит.

Для нахождения полей концентраций оксидов азота и оксидов серы топочная камера разбита на элементарные ячейки размером  $0,2 \times 0,2 \times 0,2$  м. Генерация загрязнителей в элементарных ячейках топки определена путем суммирования количества NO и SO<sub>2</sub>, выделившихся в этих ячейках за время пребывания в них реагирующих частиц (рис. 5). Это позволило получить источниковые члены и численно решить дифференциальное уравнение массообмена (схема «против потока» [9]) при наличии источникового члена:

$$dm_i / d\tau = D\nabla^2 m_i. \quad (13)$$

Количество «топливных» оксидов азота ( $T_{\max} < 1600$  К), выделяющихся в элементарной ячейке, получено из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{dN_{2i}}{d\tau_i} = k_{01} e^{-E_1/RT_i} \frac{1}{T_i} [N_i]^2; \\ \frac{dNO_{xi}}{d\tau_i} = k_{02} e^{-E_2/RT_i} \frac{1}{T_i} [O_2]_i^{1,8} [N]_i. \end{cases} \quad (14)$$

Энергии активации  $E_1 = 4,2$  МДж/моль и  $E_2 = 31,2$  МДж/моль в системе (14) приняты по справочным данным [10], а предэкспоненциальные множители  $k_{01}$  и  $k_{02}$  — по [11].

Количество оксидов серы, выделяющихся в элементарной ячейке, получено из выражения

$$G_{SO_2} = (G_C S^{daf}) / (V100), \quad (15)$$

где  $G_{SO_2}$  — мощность источника SO<sub>2</sub>, кг/м<sup>3</sup>·с;  $G_C$  — скорость выгорания углерода кокса, кг/с;  $S^{daf}$  — содержание серы в сухой беззольной массе топлива, %;  $V$  — расчетный объем ячейки, м<sup>3</sup>.

Зоны интенсивной генерации оксидов азота в НТВ-топке котла БКЗ-220–9,8 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС показаны на рис. 5, *a*. Значительная генерация NO наблюдается на уровне горелок (при выгорании мелких частиц топлива) и в нижней вихревой зоне (НВЗ) топки (на фрон-

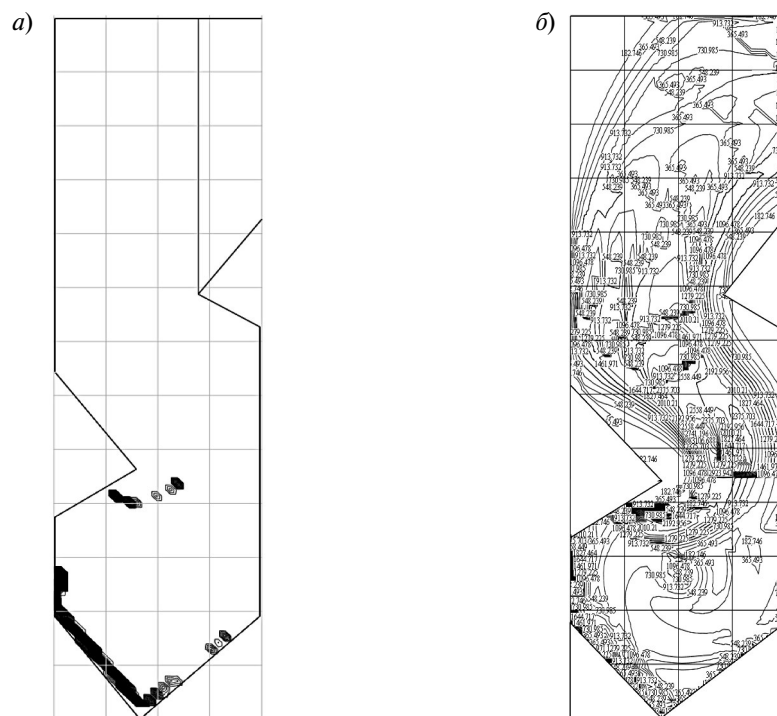
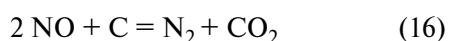


Рис. 5. Результаты расчетного определения концентрации оксидов азота в НТВ-топке котла БКЗ-220 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС:

*а* — зоны интенсивной генерации оксидов азота; *б* — расчетное поле концентрации NO (с учетом разложения на коксовых частицах)

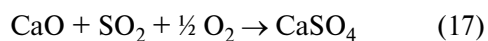
товом скате холодной воронки при сгорании крупных частиц, которые удерживаются на этом скате струей воздуха нижнего дутья).

Реагирование образовавшихся NO с углеродом кокса по реакции [12, 13]



приводит к снижению их концентрации в топке и, как следствие, к уменьшению содержания NO в уходящих газах. Расчетное поле концентраций оксидов азота с учетом их разложения на коксовых частицах показано на рис. 5, б. К выходу из топки усредненная концентрация оксидов азота в дымовых газах составляет 180–240 мг/нм<sup>3</sup>, что примерно на 30 % ниже, чем у соседних пылеугольных котлов.

Интенсивная генерация оксидов серы происходит в нижней вихревой зоне топки при выгорании основной массы углерода кокса (рис. 6, а). Реагирование SO<sub>2</sub> с CaO золы топлива в НВЗ НТВ-топки по реакции [14]



приводит к снижению концентрации SO<sub>2</sub> в уходящих газах (рис. 6, б).

Таким образом, результатами расчетных исследований по разработанной методике подтверждено, что при реконструкции котла БКЗ-220–9,8 Новомосковской ГРЭС (ст. № 15) с переводом на низкотемпературную вихревую технологию следует ожидать при сжигании подмосковных бурых углей снижения выбросов оксидов азота (на 25–30 %) и оксидов серы (на 30–40 %) по сравнению с традиционным пылеугольным сжиганием.

Организация НТВ топочного процесса в котле БКЗ-220–100 (ст. № 15) НГРЭС (рис. 7, а) осуществлена путем реконструкции топочной камеры (рис. 7, б) для организации вихревой аэродинамики (позволяющей обеспечить сжигание грубобразмолотого топлива при его многократной циркуляции) и реконструкции пылеприготовительной установки (чтобы углубить помол). В нижнем аэродинамическом выступе топки установлены восемь прямооточных ромбо-

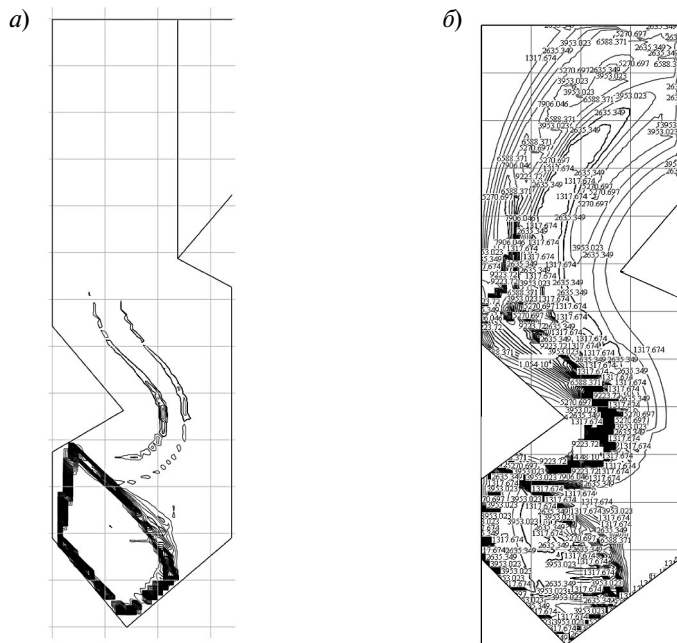


Рис. 6. Результаты расчетного определения концентрации оксидов серы в НТВ-топке котла БКЗ-220 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС:

*a* — зоны интенсивной генерации оксидов серы; *б* — расчетное поле концентрации SO<sub>2</sub> (с учетом реагирования с CaO золы топлива)

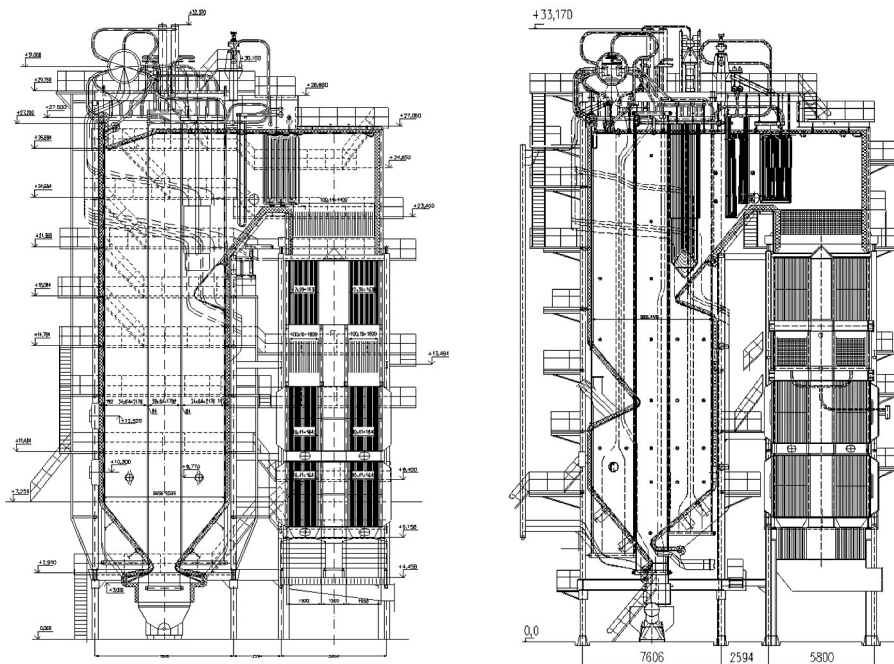


Рис. 7. Котел БКЗ-220–9,8 (ст. №15) Новомосковской ГРЭС:

*a* — до реконструкции; *б* — после реконструкции



образных горелок твердого топлива, наклон у которых к горизонту оси составляет  $45^\circ$ . Под твердотопливными горелками на вертикальном участке фронтального экрана установлены четыре газовые горелки ГМПВ-13, одновременно используемые для растопки. Топочная камера котла полностью заменена на газоплотную. На котле ст. № 15 также реализованы мероприятия, позволившие ликвидировать зависание топлива в бункерах и обеспечить его бесперебойный транспорт к мельницам.

Основные результаты реконструкции, проверенные в период пусконаладочных работ и режимно-наладочных испытаний, проведенных согласно [15, 16], следующие:

Котел устойчиво, при отсутствии шлакования работает на подмосковном буром угле без подсветки факела в диапазоне нагрузок  $D = (0,57-1,0)D_n$ , обеспечивая температуры перегрева в требуемых пределах —  $(785 \pm 5)$  К. Бесшлаковочная мощность котла увеличилась с  $0,73D_n$  до номинальной.

КПД (брутто) котла увеличился на 2–4 % до уровня  $\eta_k = 89-91$  % (при значениях  $q_4 = 1-1,5$  % ниже нормативных).

Концентрации оксидов азота в уходящих газах (приведенные к нормальным условиям и  $\alpha = 1,4$ ) при работе на угле составили 200–250 мг/нм<sup>3</sup>, оксида углерода — не более 150 мг/нм<sup>3</sup>, что удовлетворяет современным нормативам. Степень связывания оксидов серы в котле за счет основных оксидов собственной золы топлива составила 40–45 %.

Таким образом, разработанные методика, математическая модель, алгоритм и компьютерная программа расчета процесса горения позволили достоверно спрогнозировать экологические показатели котла БКЗ-220–9,8, а его реконструкция с переводом на низкотемпературную вихревую технологию — обеспечить эффективное высокоэкономичное сжигание подмосковного бурого угля с полной ликвидацией шлакования, увеличить КПД котла, значительно улучшить экологические и экономические показатели его работы.

По результатам НТВ-сжигания подмосковного угля в реконструированном котле БКЗ-220–100 (ст. № 15) НГРЭС, ОАО «Тулэнерго» принято решение о переводе еще двух котлов (ст. №№ 13 и 14) на новую технологию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль. / Пер. с англ. под ред. А.Ф. Туболкина. Л.: Химия, 1989. 288 с.
2. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд. в 2-х ч. Ч. 1 / Пер. с англ. под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. М.: Металлургия, 1988. 760 с.
3. Росляков П.В., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Система непрерывного мониторинга и контроля вредных выбросов ТЭС в атмосферу. М.: МЭИ, 2000. 158 с.
4. ГОСТ Р 50831–95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.
5. 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.
6. Шестаков С.М. Низкотемпературная вихревая технология сжигания дробленого топлива в котлах как метод защиты окружающей среды: Дис. ...док. техн. наук / СПб.: СПбГТУ, 1999. 437 с.
7. 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.
8. Померанцев В.В., Шестаков С.М., Воронков В.В., Поляков В.В., Апасов В.Л. Расчет суммарного теплообмена в топке котла, работающего по схеме низкотемпературного вихревого сжигания немолотого топлива // Известия вузов. Энергетика, 1981. №3. С. 37–42.
9. Патанкар М. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
10. Бабий В.И., Куваев В.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
11. Кондратьев В.Н. Константы скорости газозольных реакций: Справочник. М.: Наука, 1971. 306 с.
12. Никитина О.В., Гусева В.И., Омельченко Ю.М. Результаты лабораторных и стендовых испытаний разложения дымовых газов оксидов азота и авторского надзора за проектированием ОПУ // Техническая справка ЭНИН. 1988. №3. 24 с.
13. Никитина О.В. Адсорбционные методы подавления оксидов азота и серы. В кн.: Защита окружающей среды и процессы горения твердого топлива. М.: Изд-во ЭНИН. 1981. С. 20–31.

14. **Silcox G.D., Slaughter D.M., Pershing D.W.** High Temperature Sulfation Studies in an Isothermal Reactor: a Comparison of Theory and Experiment // 20 th Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburg, The Combustion Institute. 1984. P. 1357–1364.

15. РД 153–34.1–26.303–98. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок.

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

## REFERENCES

1. **Bretshnayder B., Kurfyurst I.** Okhrana vozdushnogo basseyna ot zagryazneniy: tekhnologiya i kontrol. / Per. s angl. pod red. A.F. Tubolkina. L.: Khimiya, 1989. 288 s. (rus.)

2. Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy: Sprav. izd.: V 2-kh ch. Ch. 1 / Per. s angl. pod red. Kalverta S., Ingunda G.M. M.: Metallurgiya, 1988. 760 s. (rus.)

3. **Roslyakov P.V., Ionkin I.L., Yegorova L.Ye.** Sistema nepreryvnogo monitoringa i kontrolya vrednykh vybrosov TES v atmosferu. M.: Izd-vo MEI, 2000. 158 s. (rus.)

4. **GOST R 50831–95.** Ustanovki kotelnyye. Teplomekhanicheskoye oborudovaniye. Obschkiye tekhnicheskiye trebovaniya. (rus.)

5. **Trinchenko A.A., Shestakov S.M.** Povysheniye ekologicheskikh pokazateley nizkotemperaturnykh vikhrevykh topok za schet razlozheniya oksidov azota na koksovykh chastitsakh. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2008. № 2 (54). S. 149–156. (rus.)

6. **Shestakov S.M.** Nizkotemperaturnaya vikhrevaya tekhnologiya szhiganiya drobnogo topliva v kotlakh kak metod zashchity okruzhayushchey sredy: Dis. ...dok. tekhn. nauk / SPb.: SPbGTU, 1999. 437 s. (rus.)

7. **Pomerantsev V.V., Arefyev K.M., Akhmedov D.B. [i dr.]**. Osnovy prakticheskoy teorii gorenija: Uchebnoye posobiye dlya vuzov / Pod red. V.V. Pomerantseva. 2-ye izd., pererab. i dop. L.: Energoatomizdat, 1986. 312 s. (rus.)

8. **Pomerantsev V.V., Shestakov S.M., Voronkov V.V., Polyakov V.V., Apasov V.L.** Raschet summarnogo teploobmena v topke kotla, rabotayushchego po skheme niz-

kotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiya nemolotogo topliva. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 1981. №3. S. 37–42. (rus.)

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

10. **Babiy V.I., Kuvayev V.F.** Goreniye ugolnoy pyli i raschet pyleugolnogo fakela. M.: Energoatomizdat, 1986. 208 s. (rus.)

11. **Kondratyev V.N.** Konstanty skorosti gazofaznykh reaktsiy. Spravochnik. M.: Nauka, 1971. 306 s. (rus.)

12. **Nikitina O.V., Guseva V.I., Omelchenko Yu.M.** Rezultaty laboratornykh i stendovykh ispytaniy razlozheniya dymovykh gazov oksidov azota i avtorskogo nadzora za proyektirovaniyem OPU. *Tekhnicheskaya spravka. ENIN*. 1988. №3. 24 s. (rus.)

13. **Nikitina O.V.** Adsorbtsionnyye metody podavleniya oksidov azota i sery. V kn.: Zashchita okruzhayushchey sredy i protsessy gorenija tverdogo topliva. M.: Izh-vo ENIN, 1981. S. 20–31. (rus.)

14. **Silcox G.D., Slaughter D.M., Pershing D.W.** High Temperature Sulfation Studies in an Isothermal Reactor: a Comparison of Theory and Experiment. *20 th Symp. (Int.) on Combustion*. Pittsburg, The Combustion Institute. 1984. P. 1357–1364. (rus.)

15. РД 153–34.1–26.303–98. Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu ekspluatatsionnykh ispytaniy kotelnykh ustanovok. (rus.)

16. **Trembovlya V.I., Finger Ye.D., Avdeyeva A.A.** Teplotekhnicheskiye ispytaniya kotelnykh ustanovok. M.: Energiya, 1977. 296 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ТРИНЧЕНКО Алексей Александрович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: trinchenko@mail.ru

## AUTHOR

**TRINCHENKO Aleksei A.** — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: trinchenko@mail.ru