

## Simulation of Working Processes in the Water-Tube Boiler Furnace with the Purpose of Reducing Emissions of Nitrogen Oxides

Redko A.A.,<sup>1</sup> Davidenko A.V.,<sup>1</sup> Pavlovskiy S.V.,<sup>1</sup> Kulikova N.V.,<sup>1</sup> Pavlovskaya A.A.,<sup>1</sup>  
Redko I.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kharkiv National University of Construction and Architecture,  
<sup>2</sup>Kharkiv National University of Urban Economy by O.M. Beketov  
Kharkiv, Ukraine.

**Abstract.** A significant number of domestic and industrial boilers are in operation in Ukraine. Nitrogen oxides are the most dangerous among all combustion products that pollute the atmosphere, therefore, one should take some measures for decreasing the formation of nitrogen oxides during combustion. The studies were carried out at the boilers of low power (100 kW) with a tubular radiator and an open end. The studies in the furnaces of industrial steam boilers having a tubular radiator with a closed end have not been done. The numerical study results of the gaseous fuel combustion processes in the furnace of a DE-10/14 steam water-tube boiler are presented. The fuel-air mixture is formed by premixing the 15% part of the air with a primary burner twist factor  $n=2.4$  and a secondary burner twist factor  $n=1.6$ , and an air excess factor  $\alpha_b=10$ . As a result of the studies, the temperature and velocity distributions of gases in the combustion chamber, the density of heat flows on the screen tubular surfaces, and the concentrations of the combustion components were determined. Flue gas recirculation in the volume of 80-100% is provided, and the reversible movement of combustion products towards the combustion front provides a reduction in the concentration of nitrogen oxides up to 123-125 mg/m<sup>3</sup> at the furnace outlet. Disadvantages are the following: the formation of stagnant zones near the end of the secondary radiator. The optimum diameter of the tubular radiator equals to two burners diameters and tubular radiator is located at a distance of one meter from the burner cutoff.

**Keywords:** water-tube boiler; furnace; nitrogen oxides; secondary emitter; numerical investigation.

### Simularea proceselor de lucru în focarul cazanului de abur cu tuburi de apă pentru a reduce emisiile de oxid de azot

<sup>1</sup> Rediko A.A., <sup>1</sup> Davidenko A.V., <sup>1</sup> Pavlovskii S.V., <sup>1</sup> Kulikova N.V., <sup>1</sup> Pavlovskaya A.A., <sup>2</sup> Rediko I.A.

<sup>1</sup>Departamentul alimentarea cu căldură și gaze, ventilare și utilizare a resurselor energetice secundare,  
Universitatea Națională de Construcție și Arhitectură din Kharkiv

<sup>2</sup>Departamentul exploatarea sistemelor de gaze și căldură

<sup>2</sup>Universitatea Națională de Servicii Municipale Kharkiv în numele lui A.M. Beketova  
Harkiv, Ucraina

**Rezumat.** Sunt prezentate rezultatele investigației numerice a proceselor de ardere a combustibilului gazos în focarul cazanului de abur cu tuburi cu apă de tipul DE-10/14. Dispozitivul cu arzătoare de tip ГМГ-7 cu capacitatea arderii a 728 m<sup>3</sup>/h asigură o flacără lungă și lată în regim de vârtej a gazelor naturale. Amestecul aer-combustibil este format prin preamestecarea cotei de 15% a aerului, cu valoarea coeficientului primar de răsucire a arzătorului  $n = 2.4$ , și cu valoarea coeficientul secundar de răsucire în arzător  $n = 1.6$ , având valoarea coeficientului excesul de aer egal cu 1.10. Ca rezultat al investigațiilor s-au determinat distribuțiile vitezei și temperaturii gazului în volumul focarului, densitatea componentelor, fluxurile de căldură de pe suprafața ecranului tubular, concentrația componentelor de combustie. Rezultatele cercetărilor numerice arată, că plasarea emițătorului secundar asigură o repartiție mai uniformă a temperaturii de-a lungul focarului și o temperatură mai scăzută în spațiul focarului, deplasarea reversibilă a produselor de ardere către frontul de combustie asigură diminuarea concentrația de oxizi de azot până la 123-125 mg/m<sup>3</sup> la ieșirea din focarul cazanului.

**Cuvinte-cheie:** cazan cu tub de apă, focar, oxidul de azot, emițătorul secundar, studii numerice.

### Моделирование рабочих процессов в топке парового водотрубного котла с целью снижения выбросов оксида азота

<sup>1</sup>Редько А.А., <sup>1</sup>Давиденко А.В., <sup>1</sup>Павловский С.В., <sup>1</sup>Куликова Н.В., <sup>1</sup>Павловская А.А., <sup>2</sup>Редько И.А.

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова  
Харьков, Украина

**Аннотация.** Приведены результаты численного исследования процессов сжигания газообразного топлива в топке парового водотрубного котла DE-10/14. Горелочное устройство ГМГ-7

производительностью 728 м<sup>3</sup>/ч природного газа обеспечивает вихревой короткий и широкий факел. Топливоздушная смесь образуется путём предварительного смешения 15% части воздуха, с первичным коэффициентом крутки горелки  $n=2,4$ , и вторичным коэффициенте крутки горелки  $n=1,6$ , и коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_b=1,10$ . В результате исследований определены распределения температуры и скорости газов в топочном объёме, плотности тепловых потоков на экранные трубчатые поверхности, концентрации компонентов горения. Результаты численного исследования показывают, что размещение вторичного излучателя обеспечивает более равномерное температурное поле по длине топки и более низкое значение температуры в объёме топке, а реверсивное движение продуктов сгорания к фронту горения обеспечивает снижение концентрации оксидов азота до 123-125 мг/м<sup>3</sup> на выходе из топки.

**Ключевые слова:** водотрубный котёл, топка, оксид азота, вторичный излучатель, численные исследования.

**Условные обозначения.**

Условные обозначения	Описание	Условные обозначения	Описание
1	2	3	4
$u_i, u_j$	составляющие вектора скорости в направлении соответствующих осей декартовых координат $x_i, x_j$	$M_l$	молекулярная масса компонента $l$
$\rho$	плотность	$\Delta H_c$	теплота сгорания топлива
$Y_l$	массовая доля химического компонента $l$	$N$	количество компонентов в смеси
$\mu$	коэффициент динамической вязкости	$p$	давление
$D$	коэффициент диффузии	$g_j$	компонент ускорения свободного падения в направлении оси $x_j$
$\omega_l = v_l M_l w$	исходный член, описывающий прибыль (убыль) компонента $l$ в результате химических реакций	$S_c = \mu / D_p$	число Шмидта
$w$	скорость реакции горения топлива	$h_l^0$	удельная энтальпия химического компонента $l$ при стандартной температуре $T^0$
1	2	3	4
$\omega_T = \Delta H_c w$	исходный член, описывающий тепловыделение в результате химических реакций	$\tau_w$	напряжение трения на стенке
$v_l$	стехиометрический коэффициент компонента $l$	$u_P$	расстояние точки P от стенки
$T^0$	стандартная температура	$Pr$	молекулярное число Прандтля
$c_{p,l}$	удельная изобарная теплоемкость химического компонента $l$	$Pr_T$	турбулентное число Прандтля
$Pr = \mu c_p / \lambda$	число Прандтля	$T_w$	температура стенки
$\lambda$	коэффициент теплопроводности	$T_P$	осредненная температура газа в точке P

$q_i^R$	составляющая плотности потока излучения в направлении оси $x_i$	$q_w$	удельный тепловой поток через стенку
$\beta_0 = k_a + \sigma_s$	объемный коэффициент затухания	$n$	локальная координата, нормаль к стенке
$k_a$	объемный коэффициент поглощения	$S_c$	молекулярное число Шмидта
$\sigma_s$	объемный коэффициент рассеяния	$S_{cm}$	турбулентное число Шмидта
$I$	интенсивность излучения	$Y_{IP}$	массовая доля химического компонента $l$ в точке P
$\vec{r}$	радиус-вектор произвольного луча в угловом направлении распространения излучения $\vec{S}$ ;	$Y_{Iw}$	массовая доля химического компонента $l$ на стенке
$\omega_0 = \sigma_s / \beta_0$	альбедо рассеяния	$\alpha$	коэффициент теплоотдачи
$I_b = \sigma T^4 / \pi$	интенсивность излучения абсолютно черного тела	$J_{Iw}$	диффузный поток химического компонента $l$ на стенке
$\sigma$	постоянная Стефана – Больцмана	$T_\infty$	температура среды
$\Omega'$	единичный вектор телесного угла, характеризующий направление распространения теплового излучения вследствие рассеяния фотонов $\vec{S}'$	$\epsilon_\infty$	коэффициент излучения среды
$I_T$	интенсивность турбулентности	$c_\mu$	эмпирический коэффициент
$K$	постоянная Кармана	$R$	универсальная газовая постоянная
$E$	эмпирическая постоянная	$T$	статическая температура
$U_P$	осредненная скорость газа в точке P (находится в центре пристеночной расчётной ячейке)	$M_i$	молекулярная масса химического компонента $i$
$k_P$	кинетическая энергия турбулентности в точке P		

## Введение

При сжигании органического топлива в котлах наибольший вред окружающей среде наносят оксиды азота. В настоящее время разработаны различные методы снижения выбросов  $NO_x$ . Внедрение данных методов позволяет снизить выбросы  $NO_x$  на 20-70%. Однако, опыт внедрения экологических технологических мероприятий показывает, что устаревшие конструкции котлов не обеспечивают оптимального сочетания условий для снижения  $NO_x$  и полного сжигания топлива. При этом, наблюдается снижение КПД котла за счёт увеличения

недожога и температуры уходящих газов, уменьшение надёжности котлов и сужение диапазона регулирования.

Использование технологических мероприятий, таких как ступенчатое сжигание, рециркуляция продуктов сгорания, впрыск воды на действующих котлах требуют значительного объёма реконструкций. Актуальными являются технологические мероприятия, позволяющие снизить эмиссию  $NO_x$  и при этом повысить КПД котла.

## I.

### I. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В [1-7, 30] исследовались различные методы снижения выбросов оксидов азота в топливоиспользующих агрегатах в энергетике и промышленности, в котельных и технологических установках.

В работах [7, 19] выполнены исследования процессов образования  $\text{NO}_x$  в жаротрубных котлах. В работе [6] выполнялось моделирование котла НИИИСТУ-5 и обосновано использование блочной горелки ГБГМ-0,85НД со струйной стабилизацией пламени и плавным регулированием мощности. В работе [19] показано, что в топке жаротрубного котла мощностью 100 кВт с вторичным излучателем возможно снижение  $\text{NO}_x$  до значения  $80 \text{ мг/м}^3$ . В работе [7] установлены опытные значения доли рециркуляции продуктов сгорания для котла ДКВР-4/13 с двумя горелками ГМГ-2, что обеспечило на выходе из топки котла снижение концентрации  $\text{NO}_x$  до значения  $166 \text{ мг/м}^3$ .

Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  методом рециркуляции продуктов сгорания на котлах ТГМ-84, КВГМ-180, ДЕ-25/14Г, ДКВР-10/13, ДКВР-4/13 исследовалось в работах [10, 11, 13, 28, 29].

Исследование эффективности методов снижения оксидов азота путём проведения натурных огневых теплотехнических и экологических испытаний затратные и трудоёмкие. [11, 12]. При этом топочные устройства котельных установок

характеризуются разнообразием аэродинамических схем (встречная компоновка вихревых и прямоточных горелок, тангенциальная компоновка, циклонные и кольцевые топки, топки с плоскофакельными горелками и др.), геометрией и объёмом топок, что затрудняет экспериментальное моделирование. Поэтому в настоящее время при исследовании процессов сжигания топлив широко используются численные методы моделирования и компьютерные технологии [6-10, 12, 13, 19-22].

Разработка численных методов и моделей основывается на теоретических исследованиях физико-химических процессов сжигания топлив [14-16]. Достаточно полные сведения по химической кинетике процессов горения отсутствуют, и поэтому применяются приближенные постановки. Поиск методов снижения выбросов оксида азота продолжается, что и определяет актуальность настоящего исследования.

### II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выполнение численного исследования процессов сжигания газообразного топлива в топке водогрейного парового котла с вторичным трубчатым тупиковым излучателем для оценки снижения выбросов оксидов азота.

### III. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

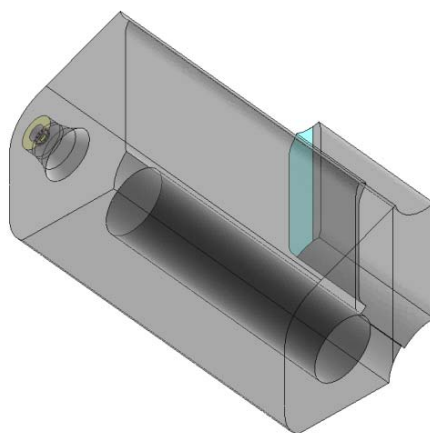


Рис. 1. Общий вид геометрической модели котла ДЕ-10/14.

Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ с горелочным устройством ГМГ-7, предназначенный для производства, насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225°C с абсолютным давлением 14 кгс/см<sup>2</sup>, номинальной производительностью 10 т/ч.

В топке по оси горелки размещен трубчатый тупиковый излучатель. Диаметр вторичного излучателя в расчётах изменялся от 840 мм до 1260 мм, выходной диаметр горелки составляет 420 мм. Вторичный излучатель считали теплопроводной стенкой.

Считали, что средняя температура питательной воды 125°C, коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам экранных труб  $\alpha=5000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C), коэффициент излучения поверхности экранных труб 0,85, коэффициент излучения поверхности амбразуры и футеровки 0,8.

В основу расчётов положена математическая модель лучисто-конвективного теплообмена в газовом тракте котла, с учётом гравитации, и с пренебрежением сжимаемостью топочных газов. Система записана в стационарной форме осредненных за Рейнольдсом дифференциальных уравнений (1) - (5): неразрывности, сохранения массовых долей химических компонентов смеси, сохранения импульса и сохранения энергии соответственно, и интегро-дифференциальное уравнение (5) переноса излучения [20-23]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\rho u_i \frac{\partial Y_l}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y_l}{\partial x_i} + \omega_l, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$l = 1 \dots N; \sum_{l=1}^N Y_l = 1 \quad (2)$$

$$\rho u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j, \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3$$

$$i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\rho u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_i} - \frac{\partial q_i^R}{\partial x_i} + \omega_T$$

$$i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + I(\vec{r}, \vec{s}) =$$

$$= (1 - \omega_0) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega' \quad (5)$$

$$h = \sum_l Y_l h_l - \text{удельная энтальпия}$$

многокомпонентной смеси;

$$h_l = h_l^0 + \int_{T^0}^T c_{pl}(T) dT - \text{удельная энтальпия}$$

химического компонента  $l$ .

**Граничные условия.** Систему приведенных выше уравнений (1) - (5) дополняли соответствующими граничными условиями для независимых переменных.

На входных границах  $\Gamma_{вх}$  расчетной области задавали направления течений метана и воздуха, их массовые расхода, температуры, массовые доли химических компонентов, параметры турбулентности:

$$G(x_i) = G_0; T^*(x_i) = T_0^*; Y_l(x_i) = Y_{l0}; I_m(x_i) = I_{m0};$$

$$k(x_i) = \frac{3}{2} (u I_m)^2; \varepsilon(x_i) = \rho c_\mu \frac{k^2}{\mu}, x_i \in \Gamma_{вх}, i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

На выходной границе  $\Gamma_{вых}$  задавали нулевое избыточное статическое давление, для других независимых переменных принимали «мягкие» граничные условия:

$$\frac{\partial u(x_i)}{\partial n} = 0, \frac{\partial h(x_i)}{\partial n} = 0, \frac{\partial Y_l(x_i)}{\partial n} = 0,$$

$$\frac{\partial k(x_i)}{\partial n} = 0, \frac{\partial \varepsilon(x_i)}{\partial n} = 0,$$

$$x_i \in \Gamma_{вых}, i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Для описания турбулентного пограничного слоя возле поверхностей твердых тел использовано функции стенки - набор полуэмпирических функций, связывающих значения независимых переменных в центре пристеночной расчетной ячейки со значениями

соответствующих переменных на стенке и опирающихся на допущения Лаундера и Сполдинга [33].

Закон стенки для осредненной скорости имеет вид:

$$U^* = \begin{cases} y^* & \text{при } y^* \leq 11,225 \\ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) & \text{при } y^* > 11,225 \end{cases} \quad (8)$$

Безразмерные параметры  $U^*$  и  $y^*$  определены выражениями:

$$U^* = \frac{U_p c_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (9)$$

$$y^* = \frac{\rho c_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (10)$$

Закон стенки для температуры имеет вид:

$$T^* = \begin{cases} Pr y^* & \text{при } y^* \leq y_t^* \\ Pr \left[ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) + P \right] & \text{при } y^* > y_t^* \end{cases} \quad (11)$$

где величину  $P$  рассчитывали по формуле:

$$P = 9,24 \left[ \left( \frac{Pr}{Pr_t} \right)^{3/4} - 1 \right] \left( 1 + 0,28 e^{-0,007 Pr / Pr_t} \right) \quad (12)$$

Безразмерный параметр  $T^*$  определено выражением:

$$T^* = \frac{(T_w - T_p) \rho c_p c_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{q_w} \quad (13)$$

Безразмерную толщину теплового подслоя  $y_t^*$  рассчитано как значение, при котором линейный и логарифмический законы пересекаются, что соответствует молекулярному числу Прандтля газа.

Уравнение переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  решали по всей расчетной области, включая пристеночные ячейки. Граничное условие для  $k$  на стене имеет вид:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (14)$$

Генерацию кинетической энергии турбулентности  $G$  и скорость ее диссипации  $\varepsilon$ , в пристеночных ячейках рассчитывали на основе гипотезы о локальном равновесии. При этом предположении генерацию кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации считали одинаковыми. В результате  $\varepsilon$  определяли по формуле:

$$\varepsilon_p = \frac{c_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{K y_p} \quad (15)$$

Предполагая, что перенос вещества происходит аналогично переносу теплоты, получаем закон стенки для массовых долей химических компонентов вида:

$$Y^* = \begin{cases} Sc y^* & \text{при } y^* \leq y_c^* \\ Sc_t \left[ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) + P_c \right] & \text{при } y^* > y_c^* \end{cases} \quad (16)$$

Безразмерный параметр  $Y^*$  определено выражением:

$$Y^* = \frac{(Y_{tw} - Y_{tp}) \rho c_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{J_{tw}} \quad (17)$$

Величины  $P$  и  $y_c^*$  рассчитывали аналогично величинам  $P_t$  и  $y_t^*$  с той разницей, что числа Прандтля заменяли соответствующими числами Шмидта.

На поверхностях твердых тел задавали граничные условия теплообмена:

- первого рода ( $T_w = \text{const}$ );
- второго рода ( $q_w = \text{const}$ );
- третьего рода.

$$q_w = \alpha (T_w - T_\infty) \quad (18)$$

– комбинированные радиационно-конвективные:

$$q_w = \alpha (T_w - T_\infty) + \varepsilon_\infty \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (19)$$

Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова-Прандтля:

$$\mu_m = c_\mu \rho \varepsilon^{k^2} \quad (20)$$

Связь между термодинамическими переменными  $p$ ,  $T$  и  $\rho$  устанавливается уравнением состояния смеси идеальных газов:

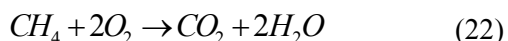
$$p = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad (21)$$

О процессах течения, горения, эмиссии оксидов азота и сложного теплообмена в газовом тракте котла приняты следующие основные допущения:

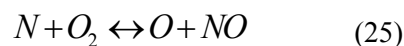
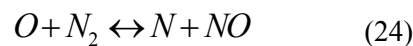
– газообразная среда в газовом тракте котла является многокомпонентной химически реагирующей смесью термически совершенных газов, входящих в состав топлива (метана), воздуха (кислорода и азота), продуктов полного сгорания (диоксида углерода и водяного пара), оксида азота (NO);

– теплофизические свойства газовой смеси зависят от концентрации базовых компонентов ( $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) и температуры;

– сгорание метана описывается одностадийной необратимой брутто-реакцией:



– монооксид азота создается по классическому термическому механизму Я. Б. Зельдовича [14]:



– течение газа трехмерное, турбулентное, квазистационарное, существенно дозвуковое;

– влияние вязкого нагрева, термо-, баро- и самодиффузии пренебрежимо мало;

– влияние монооксида азота на течение и теплообмен пренебрежимо мало; тепловое излучение квазистационарное, когерентное, изотропное, монохромное.

Решение уравнений (1)-(5) выполнено методом контрольного объема и обеспечивалось с помощью модифицированного программного комплекса разработанного совместно с НАУ «ХАИ» [34]. Расчётная сетка топки показана на рис. 2.

В результате дискретизации геометрического объема получается некоторое количество контрольных объемов (расчётных ячеек)  $N_V$  с соответствующим количеством граней  $N_F$ , в том числе граничных граней  $N_{F,b}$ , которые принадлежат границе расчётной области.

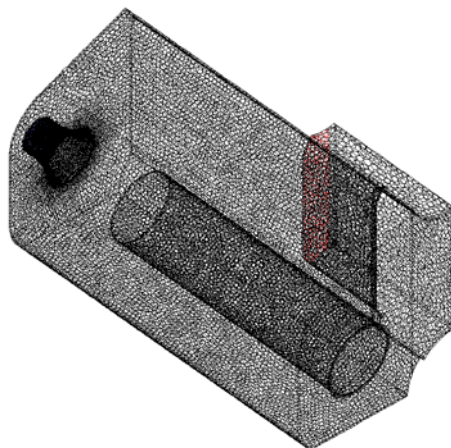


Рис. 2. Расчётная сетка топки котла, вторичного излучателя и горелки.

В центрах расчётных ячеек рассчитываются все интересующие характеристики топочной среды. В центрах граничных граней рассчитываются температура стенки внутри и снаружи топки, а также плотности радиационного и конвективного потоков на стенку.  $N_V=452\ 533$ ;  $N_F=2\ 985\ 607$ ;  $N_{F,b}$ -не контролируется.

Уменьшение погрешности результатов расчёта достигалось путём увеличения количества конечных элементов-ячеек. Относительные невязки по массе менее  $1 \cdot 10^{-4}$ , по энергии менее  $1 \cdot 10^{-6}$ ; абсолютные дисбалансы по массе  $6 \cdot 10^{-5}$  кг/с, по теплу 0,4 кВт.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Полученные расчётные данные определяющие значения температуры топочных газов, концентрации топлива и кислорода позволили оценить образование

$NO_x$  в локальных зонах топки и на выходе из топки котла. Результаты расчёта полей концентрации оксидов азота приведены на рис. 3.

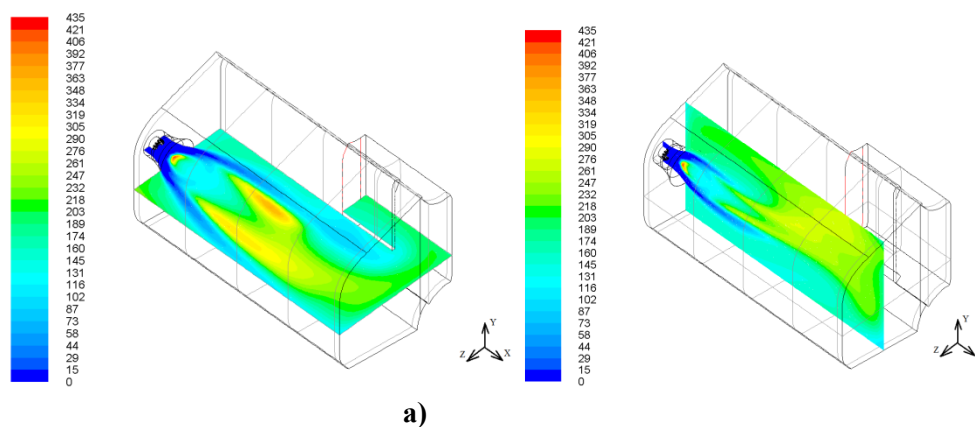


Рис. 3. Поля концентрации оксидов азота: а) – в горизонтальной плоскости; б) – в вертикальной плоскости.

Основная масса оксидов азота образуется в области высокой температуры факела горения (более  $1500^{\circ}C$ ), а в дальнейшем под действием вихревого газового потока  $NO_x$  перемещается по всему объёму топки. Вблизи зоны дожигания топлива при температуре  $900-920^{\circ}C$  наблюдаются высокие значения концентрации  $NO_x$ , составляющие  $350\text{ мг/м}^3$ , но эти зоны небольшие по объёму. В топочном объёме область с максимальной генерацией  $NO_x$  наблюдается на оси горелки на расстоянии 1,5-2,5 м от среза горелки, а в диаметре зона дожигания достигает 1,2-1,5 м.

В вертикальном разрезе топки концентрация  $NO_x$  увеличивается в верхней зоне топки и составляет  $230-290\text{ мг/м}^3$ , а в нижней зоне – около  $100-110\text{ мг/м}^3$ . Вблизи боковых экранных поверхностей концентрация  $NO_x$  ниже ( $100-130\text{ мг/м}^3$ ), чем на оси топки ( $250-360\text{ мг/м}^3$ ). Процессы сжигания топлива характеризуются также

данными по концентрации кислорода в топочном объёме. Зона горения топлива с первичным воздухом составляет около 0,5 м от среза горелки. Зона выгорания кислорода составляет 2,5-3 м от среза горелки. Вблизи боковых поверхностей концентрация кислорода составляет 3-5%. В левой боковой поверхности топки (по ходу движения газов) концентрация кислорода выше (5-7%), чем вблизи правой боковой поверхности (1,5-2%), т.к. вихревое движение топочных газов правостороннее и по ходу движения газов концентрация кислорода уменьшается. В верхней зоне топки концентрация кислорода ниже (0,7-1,4%), чем в нижней части топки (5-7%), что и определило образование  $NO_x$ .

Как видно из распределения температуры газов касания факелом задней и боковой стенок котла и затягивания факела в конвективный пучок не наблюдается. Не наблюдается также симметрия факела



относительно оси котла. Концентрация  $\text{NO}_x$  на выходе из топки составляет  $178 \text{ мг/м}^3$ , а концентрация кислорода  $\text{O}_2$  составляет

$2,8 \text{ мг/м}^3$ . Результаты расчёта параметров топки с вторичным излучателем приведены на рис 4.

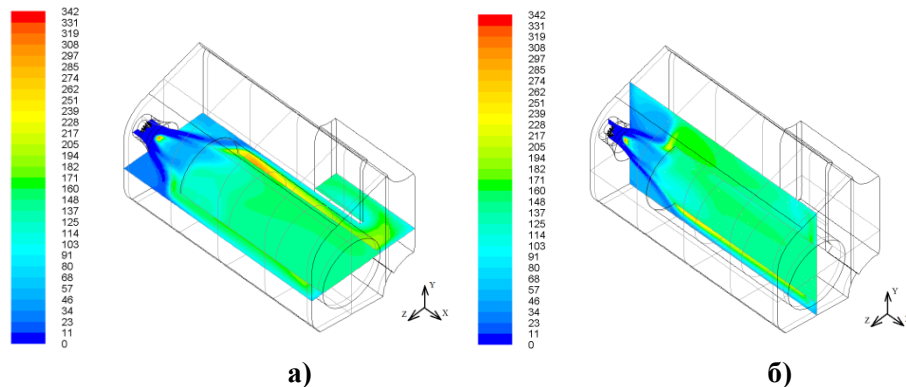


Рис. 4. Значение концентрации  $\text{NO}_x$  в топке с вторичным излучателем: а) – в горизонтальной плоскости; б) – в вертикальной плоскости.

Анализируя образование  $\text{NO}_x$  в топке видно, что концентрация  $\text{NO}_x$  составляет: в нижней части топки – от 40 до  $200 \text{ мг/м}^3$ , а в верхней части топки – от 100 до  $150 \text{ мг/м}^3$ . По глубине топки с вторичным излучателем концентрация  $\text{NO}_x$  изменяется от  $60\text{-}80 \text{ мг/м}^3$  до  $130\text{-}180 \text{ мг/м}^3$ . На выходе из топки среднее значение концентрации  $\text{NO}_x$  составляет  $125 \text{ мг/м}^3$  из-за смешивания топочных газов.

Наибольшая концентрация кислорода (около 8-10%) наблюдается вблизи входа газов в излучатель на расстоянии около 0,5 м от среза горелки, а также вблизи боковых

поверхностей. Внутри вторичного излучателя концентрация кислорода составляет 0-0,6%. При этом на выходе из топки концентрация кислорода составляет около 2-4%. Вблизи левой боковой поверхности котла концентрация кислорода составляет 0,6-3%, а вблизи правой боковой поверхности концентрация кислорода (4-6%). Вблизи левой боковой поверхности образуется зона с обратными токами газов, а на выходе из неё концентрация кислорода снижается до 0,7-1,4% (рис. 5).

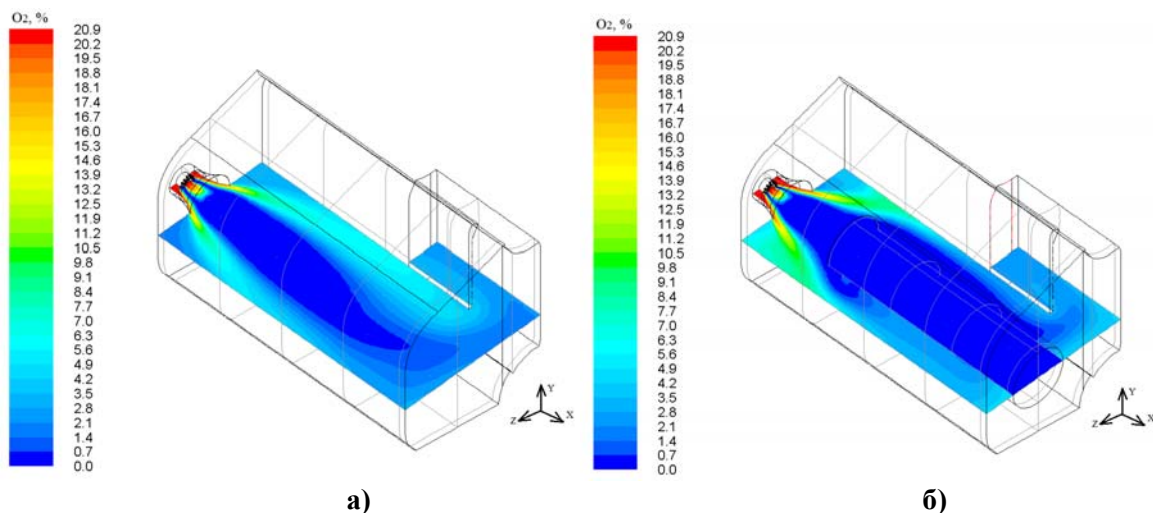


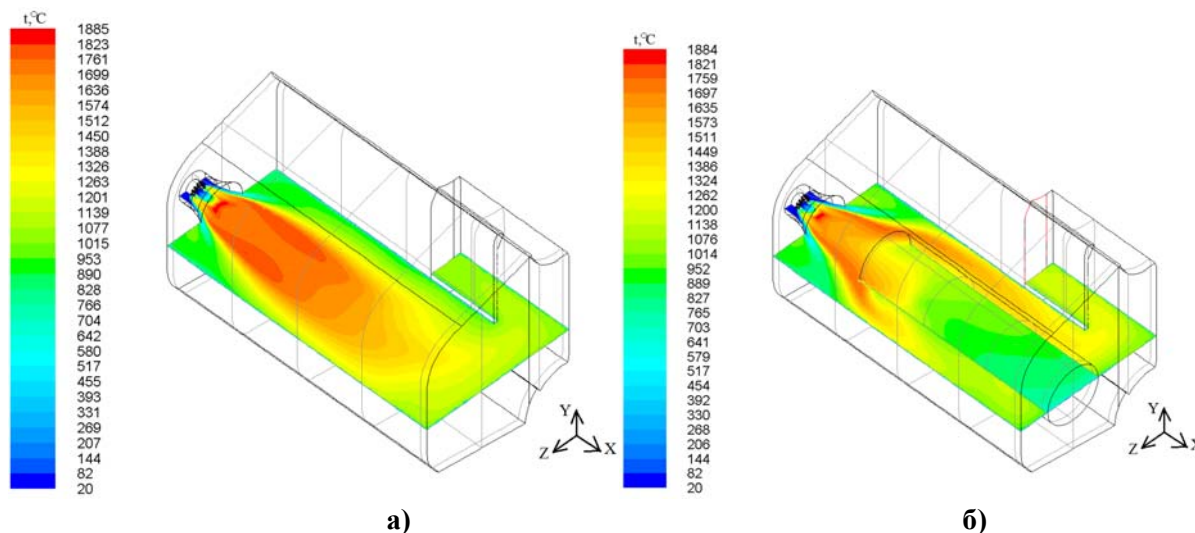
Рис. 5. Распределение концентрации кислорода в топке котла: а) – без вторичного излучателя, б) – с вторичным излучателем.

Анализируя поле температур в топочном объёме можно видеть, что температура поверхности вторичного излучателя по длине

изменяется от  $950\text{-}1000^\circ\text{C}$  до  $750\text{-}830^\circ\text{C}$ . Большая часть поверхности излучателя (более 2 м длины), имеет температуру выше

900°C. При этом температура газов в топочном объеме изменяется незначительно от 1150°C до 1000°C. Вблизи левой боковой

поверхности топки температура газов выше (до 1500°C), чем вблизи правой (1200-1300°C) (рис. 6).

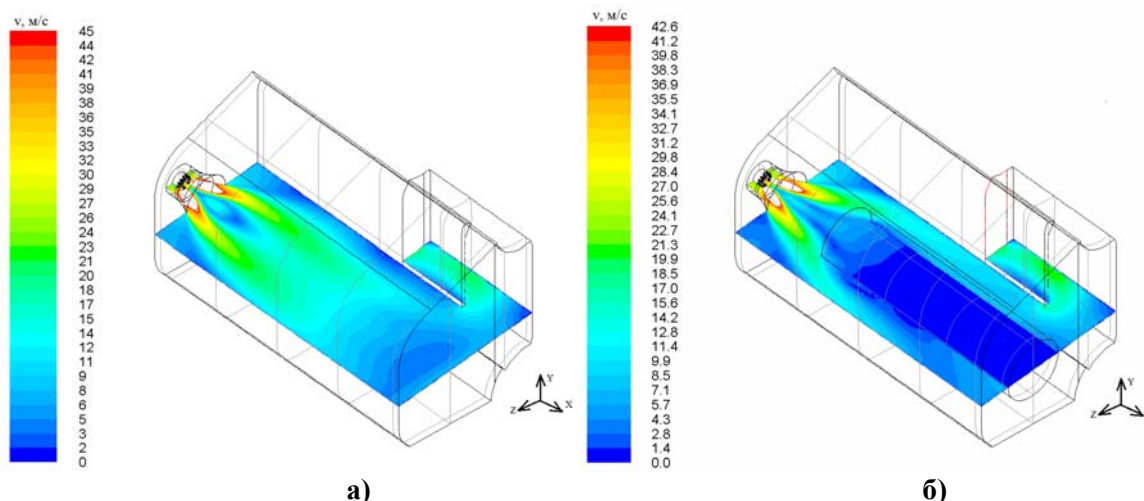


**Рис. 6. Распределение температуры газового потока в топке: а) – без вторичного излучателя, б) – с вторичным излучателем.**

В нижней области топки температура газов выше (1200-1400°C), чем в верхней области топки (1000-1100°C), что и определяет образование  $\text{NO}_x$  в объеме топки.

При размещении вторичного трубчатого излучателя с заглушенным торцом в топке, наблюдается реверсивное движение топочных газов, характерные профили

скоростей и температур. В приосевой области закрученной струи появляются зоны с разрежением, что вызывает обратные токи рециркуляции. Скорость газов внутри излучателя составляет 1,5-2 м/с. Газы выходят из вторичного излучателя и обтекают его снаружи, со скоростью 10-12 м/с (рис.7).



**Рис. 7. Распределение скорости топочных газов: а) – без вторичного излучателя, б) – с вторичным излучателем.**

## V. ВЫВОДЫ

Результаты численного исследования показали, что модернизация водотрубного парового котла ДЕ-10/14 путём размещения тупикового трубчатого вторичного излучателя в топке водотрубного котла, обеспечивает рециркуляцию топочных газов в объёме 80-100%, а также дожигание топлива и снижение вредных выбросов оксидов азота до 125 мг/м<sup>3</sup> на выходе из топки котла. При этом установлено, что оптимальный диаметр трубчатого излучателя составляет  $2D_{гор}$  (два диаметра выходного патрубка горелки), и размещён вторичный излучатель на расстоянии одного метра от среза горелки, длиной 3,5 м. Увеличение диаметра излучателя до  $3D_{гор}$ , не обеспечивает дальнейшего снижения концентрации оксидов азота. Размещение в топке вторичного излучателя обеспечивает также повышение эффективности лучистого переноса теплоты и кинетических процессов в химически реагирующих газоздушных смесях, полноту сжигания топлива. По данным численного моделирования концентрация кислорода на выходе из топки составляет 1,5-2,5%, что при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_v=1,1$  указывает на полное сгорание топлива в топке котла.

## Литература (References)

- [1] Varlamov G.B., Lyubchik G.M. Malyarenko V.A. *Teploenergetychni ustanovky ta ekologichni aspekty vyrobnytsva energii*
- [2] [Thermal Engineering Installations and Ecological Aspects of Energy Generation]. Kiev, 2003. 232 p.
- [3] Gubinsky V.M. *Metallurgicheskie pechi* [Metallurgical Furnaces]. Dnepropetrovsk, 2006. 85p.
- [4] Sigal I.Ya. *Zashchita vozdušnogo basseina pri szhyganii topliva* [Protection of Air Basin during Fuel Combustion]. Leningrad, 1988. 312 p.
- [5] Denisov V.V., Denisova I.A., Gutenev V.V., Fesenko L.N. *Osnovy inzhenernoi ekologii* [Fundamentals of Environmental Engineering]. Moskva, 2013. 624p.
- [6] Roslyakov P.V., Pleshakov K.A., Ionin I.L. Optimalnye usloviyy dlya szhyganiya topliva s kontroliruemym khimicheskim nedojyogom [The Optimal Conditions for the Fuel Combustion with Controlled Chemical Incomplete Combustion]. *Teploenergetika*, 2010, no. 4, pp. 17-22 (in Russian).
- [7] Dolinsky A.A., Khalatov A.A., Kobzar S.G., Nazarenko O.A., Meshcheryakov A.A. Ispol'zovanie kompyu'ternogo modelirovaniya pri malozatratnoi modernizatsii kotla NIISTU-5 [Using Computer Simulation at Low-Cost Modernization of NIISTU-5 Boiler]. *Industrial Thermal Engineering*, 2007, Vol. 29, no. 5, pp. 80-91(in Russian).
- [8] Khalatov A.A., Kobzar S.G. Komp'yuternye tekhnologii v modernizatsii kotlov i kamer sgoraniya [Computer Technologies in the Modernization of Boilers and Combustion Chambers]. *Aqua-Therm*. 2007, no. 1, pp. 12-15(in Russian).
- [9] Ustimenko B.P., Dzhakubov K.B., Krol V.O. *Chislennoe modelirovanie aerodynamiki i goreniya v topochnykh tekhnologicheskikh ustroystvakh* [Numerical Simulation of Aerodynamics and Combustion in Technological Flue Devices]. Alma-Ata, 1986. 224 p. (in Russian).
- [10] Alekseenko S.V., Gusev I.N., Eroshenko V.M., Rabovsky V.B. Chislennoe i eksperimentalnoe modelirovanieturbulentnykh techeniiv topochnykh kamerakh [Numerical and Experimental Modeling of Turbulent Flows in the Combustion Chambers]. *J. Engineering Physics*. 1990, Vol.5. no. 6, pp. 948-955(in Russian).
- [11] Askarova A.S., Karpenko E.I., Loktionova I.V., Messerle V.E., and Ustimenko A.V. Optimization of the combustion of power-station technologies. *Thermal Engineering*, Vol.51, no. 6, pp. 488-493, 2004. (references)
- [12] Shchelokov V.I., Ladynichev V.V., Liseikin I.D., Todorovich A.V. Modernizatsiya vodogreinykh vodotrubnykh kotlov tipa PTVM i KVGМ [Modernization of PTVM Hot-Water and Water-Tube Boilers]. *Thermal Supply News*, 2004, no. 5 (45) (in Russian).
- [13] Ustimenko B. P., Aliyarov B.K., Abubakirov E.K. *Ognevoe modelirovanie pyleugol'nykh topok* [Fire Simulation of Pulvarized-Coal Furnaces]. Alma-Ata, 1982. 201 p.
- [14] Askarova A.S., Bolegenova S. A., Maksimov V.Yu. [Study of Harmful Substance Formation in the BKZ-75 Combustion Chamber at Shakhtinskaya Heat Power Station]. *VIII Vserossiiskaya konf. "Gorenie tverdogo topliva"* [VIII All-Russian Conf. "The Burning of Solid Fuel"], Novosibirsk, 2012, pp. 9.1-9.4. (In Russian).
- [15] Zeldovich Ya. B. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical Theory of Combustion and Explosion]. Moskva, 1980. 478 p.

- [16] Gosmen A.D., Pan V.M. Ranchel A.K., Spalding D.B., Wolfstein M. *Chislennye issledovaniya techenii vyazkoi zhydkosti* [Numerical Methods for Studying Viscous Liquid Flows]. Moskva, 1972. 320 p.
- [17] Gupta A., Lilly L., Sayred H. *Zakruchennyye potoki* [Swirling Flows]. Moskva, 1987. 588 p.
- [18] New Solutions. Modernization of Water-Tube Boilers. <http://www.weishaupt.kiev.ua>.
- [19] Taylasheva T.S. Analiz opyta ekspluatatsii kotlov tipa DKVR [Analysis of DKVR-type Boiler Operation Experience]. *Bulletin of Science*. 2014, no. 3 (13). pp. 11-15. (In Russian).
- [20] Basok B.I., Demchenko V.G., Martynenko M.P. Chislennoe modelirovanie protsessov aerodinamiki v topke vodogreynogo kotla s vtorichnym izluchatelem [Numerical Simulation of Aerodynamic Processes in the Furnace of the Hot-Water Boiler with a Secondary Radiator]. *Industrial Heating Engineering*. 2006, no. 1, pp.17-22 (In Russian).
- [21] German M.L., Borodulya V.A., Nogotov. E.F, Palchenok G.I. [Engineering Calculation Method of Temperature Mode in Fire-Tube Boilers with a Dead-End Furnace]. *Trudy IV mezhdunarodnogo foruma* [Proceedings of IV Minsk Int. Offline], Minsk, 2000, Vol.2, pp. 21-30. (In Russian).
- [22] Khaustov S.A., Zavorin A.S., Fissenko R.N. Chislennoe issledovanie protsessov v zharotrubnoi topke s reversivnym fakelom [Numerical Investigation of Processes in the Fire-Tube Furnace with the Reversible Torch]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, Vol. 322, no. 4, pp. 43-47. (In Russian).
- [23] Mikhaylov A.G. Metody rascheta teploobmena v topkakh kotlov [Methods for Calculating Heat Transfer in Boiler Furnaces]. *Omsk Scientific Bulletin*, 2008, no. 3 (70), pp. 81-84p. (In Russian).

**Сведения об авторах.**



**Редько Андрей Александрович**  
Доктор технических наук, профессор каф. ТГВ и ТВЕР, ХНУСА. Область научных интересов: использование возобновляемых источников энергии, низкопотенциальной энергии, теплообмен, термодинамика.  
E-mail: [andrey.ua-mail@mail.ru](mailto:andrey.ua-mail@mail.ru)



**Павловский Сергей Валерьевич**  
технических наук. Научные интересы: низкопотенциальная энергетика, рациональное использование продуктов сгорания котлов, геотермальная энергия, теплообмен, термодинамика.  
E-mail: [pavlovskiy\\_s@mail.ru](mailto:pavlovskiy_s@mail.ru)



**Давиденко Анастасия Вячеславовна**, аспирант каф. ТГВ и ТВЕР, ХНУСА. Область научных интересов: оптимизация и моделирование сжигания газа в паровых котлах, теплообмен, неравновесная термодинамика.  
E-mail: [anastasiya.tasse@gmail.com](mailto:anastasiya.tasse@gmail.com)



**Куликова Наталья Валерьевна**, кандидат технических наук, ассистент, каф. ТГВ и ТВЕР, ХНУСА. Область научных интересов: установки для рекуперации тепловой энергии, геотермальная энергия, тепло-массообмен, термодинамика.  
E-mail: [natikkulikova@rambler.ru](mailto:natikkulikova@rambler.ru)



**Редько Игорь Александрович**  
Кандидат технических наук, доцент каф. эксплуатации газовых и тепловых систем, ХНУГХ им. А.М. Бекетова. Область научных интересов: геотермальная энергетика, эффективное сжигание низкосортных топлив,  
E-mail: [germes\\_s@mail.ru](mailto:germes_s@mail.ru)



**Павловская Анна Александровна**  
каф. ТГВ и ТВЕР, ХНУСА. Область научных интересов: эффективность теплообмена в жаротрубных котлах, моделирование процессов горения.  
E-mail: [anna\\_on@mail.ru](mailto:anna_on@mail.ru)