

УДК 621.039.6; 536.46; 533.6; 532.517.4

## **Уменьшение выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ с применением технологии «Overfire Air»\***

**А.С. Аскарлова<sup>1</sup>, В.Е. Мессерле<sup>2</sup>, А.Б. Устименко<sup>3</sup>, С.А. Болегенова<sup>1</sup>,  
С.А. Болегенова<sup>1</sup>, В.Ю. Максимов<sup>1</sup>, А.Б. Ергалиева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

<sup>2</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>3</sup>*Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан*

E-mail: Aliya.Askarova@kaznu.kz, maximov.v@mail.ru

Проведены вычислительные эксперименты с применением технологии «Overfire Air» (OFA) при горении пылеугольного факела в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ 2, результаты которых показывают возможность достичь снижения эмиссии вредных оксидов азота  $\text{NO}_x$  и минимизировать потери энергии. Приведены результаты вычислительных экспериментов по влиянию подачи дополнительного воздуха на основные характеристики тепломассопереноса. Проведено сравнение с базовым режимом горения твердого топлива, когда подача дополнительного воздуха отсутствует (OFA = 0 %).

**Ключевые слова:** тепломассоперенос, горение, острое дутье, вычислительный эксперимент.

Доля энергетических предприятий в общем объеме загрязнения окружающей среды продуктами сгорания топлива велика. Наибольший вред экологии наносят предприятия теплоэнергетики, черной и цветной металлургии, нефтегазовой отрасли и машиностроения. В Казахстане в атмосферу выбрасываются такие вещества как оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, пыль, свинец, диоксид серы и т.д., которые наносят существенный вред живым организмам [1–2].

В связи с тем, что одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха вредными газовыми и пылевыми выбросами являются теплоэлектростанции, работающие на твердом топливе, становится актуальной разработкой технологий сжигания топлива с минимальными выбросами  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  и золы частиц. Каменные угли Казахстана являются хорошим малосернистым энергетическим топливом, и при рациональной организации топочного процесса вред, наносимый окружающей среде, может быть сведен к минимуму.

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № 0113РК00499).

© Аскарлова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Ергалиева А.Б., 2016

Проблема минимизации выброса вредных веществ в атмосферу энергетическими предприятиями может быть решена только на основе физического, математического и химического моделирования. В этой связи численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов для детального анализа сложных физических и химических явлений, происходящих в топочной камере. Использование высокопроизводительного оборудования с применением современных программных комплексов позволяет решать эти задачи для конкретных энергетических установок (ТЭС, ГРЭС и т.д.) и для любого энергетического топлива [3–12].

Метод OFA, или, как его еще называют, метод «острого дутья» [13–15], включает в себя подачу всего объема воздуха для горения (первичного и вторичного) в два этапа: 70–90 % воздуха подается в горелки, а остальное его количество подается в топочное устройство над горелкой по технологии острого дутья (рис. 1). При смешивании в горелке топлива с контролируемым потоком воздуха создается относительно низкотемпературная обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения в нижней части топочного устройства, которая помогает снизить образование  $\text{NO}_x$  из азота, содержащегося в топливе (топливные  $\text{NO}_x$ ).

Подача воздуха методом острого дутья происходит над зоной основного горения и направлена в несколько воздушных каналов, расположенных на передней и задней стенках камеры сгорания над верхним уровнем горелок для обеспечения более полного сгорания топлива. Относительно низкая температура в обогащенной кислородом зоне дожигания обуславливает пониженное образование  $\text{NO}_x$  из воздуха (термические  $\text{NO}_x$ ) [14].

На рис. 2 представлены аэродинамические особенности возможных методов организации процесса горения с использованием OFA-технологии в камере сгорания с тангенциальной схемой подачи топлива и окислителя. Видно, что преимущество этого метода заключается в возможности обеспечения минимальных затрат для широкого выбора компоновки инжектирующих источников при реорганизации существующего режима.

Численное моделирование процесса сжигания твердого топлива в пылеугольном состоянии проводилось на основе нелинейных дифференциальных уравнений, записанных с учетом химических реакций и состоящих из уравнений неразрывности и движения вязкой среды, уравнений распространения тепла и диффузии для компонентов реагирующей смеси и продуктов реакции с учетом теплового излучения и многофазности среды, уравнений  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, а также уравнения состояния и уравнений химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества [7, 10–11, 16–27].

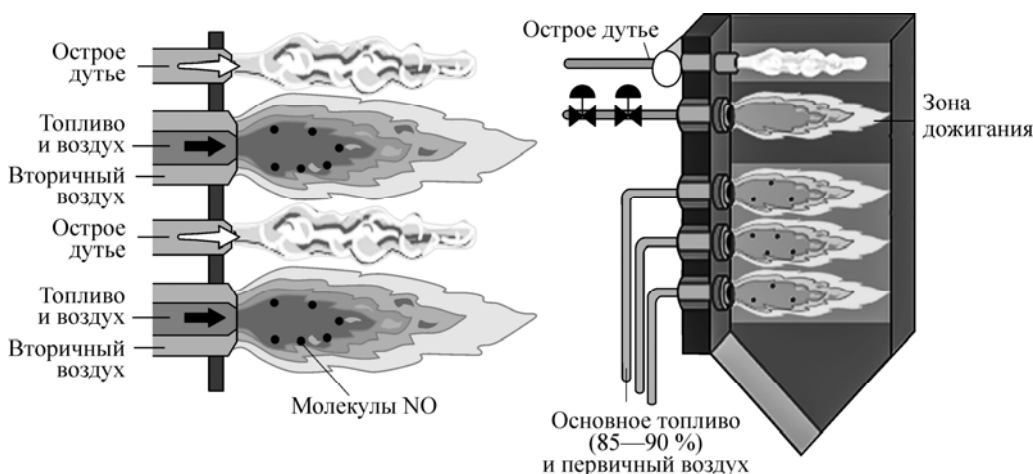


Рис. 1. Различные варианты компоновки OFA-инжекторов.

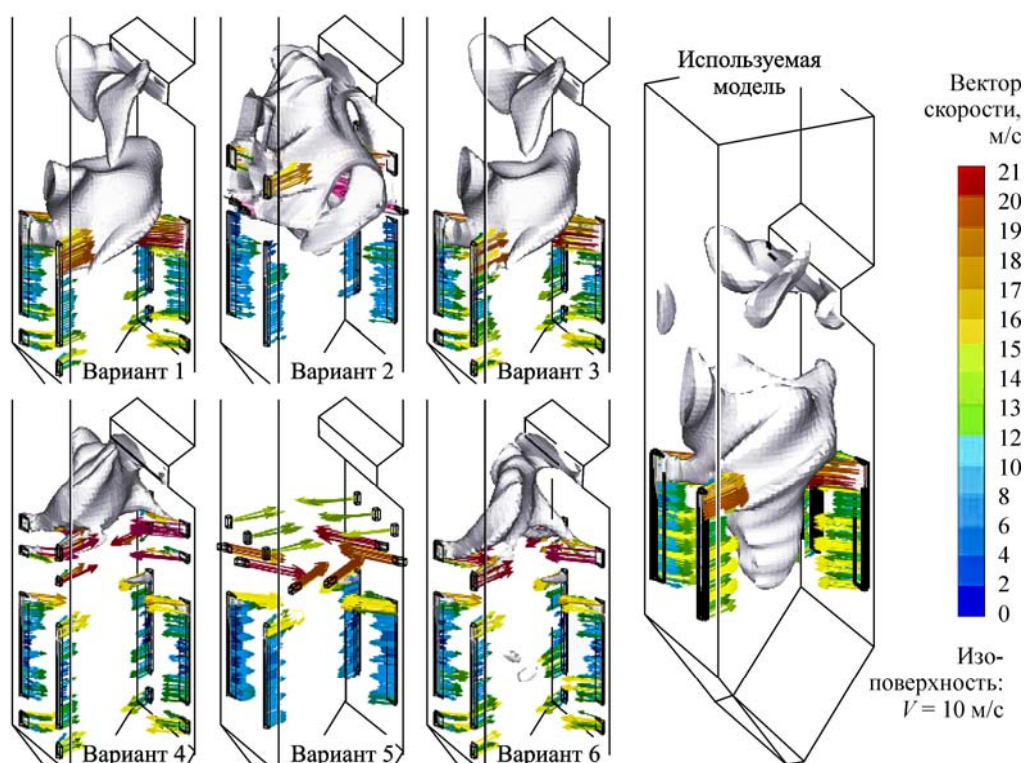


Рис. 2. Аэродинамическая картина введения в камеру сгорания воздушных дополнительных потоков по методу Overfire Air.

Первичные инжектируемые потоки представляют собой воздух (примерно 70–90 % от общего базового объема воздуха), который подается в камеру сгорания в смеси с твердым топливом при относительно невысокой температуре (порядка 400–600 К). При этом удается достичь образования в области горелок богатой топливом зоны с пониженным содержанием кислорода, что способствует умеренному образованию топливных  $\text{NO}_x$ .

Вторичные инжектируемые потоки (примерно 10–30 % от общего базового объема воздуха) вводятся дополнительно выше зоны сгорания через специальные инжекторы с воздушными портами, которые устанавливаются в плоскости выше основных горелок. Местоположение таких дополнительных инжекторов зависит от конфигурации камер сгорания. В этой области основной процесс горения практически завершается. Следовательно, относительно низкая температура в области вторичного инжектирования ограничивает образование термических  $\text{NO}_x$ .

Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния ОФА-технологии была выбрана действующая камера сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ 2, а в качестве топлива — экибастузский уголь. Камера сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭС 2 имеет расчетную паропроизводительность 160 т/ч, при давлении 9,8 МПа и температуре перегрева пара 540 °С. Тепловая мощность котла составляет 124,4 МВт. По боковым сторонам топочной камеры расположены четыре блока прямоточных щелевых горелок, которые направлены по касательной к центральной условной окружности. Для реализации ОФА-технологии было выбрано два режима, а именно, когда 10 % и 20 % общего объема воздуха подается через инжекторы в верхней части камеры сгорания.

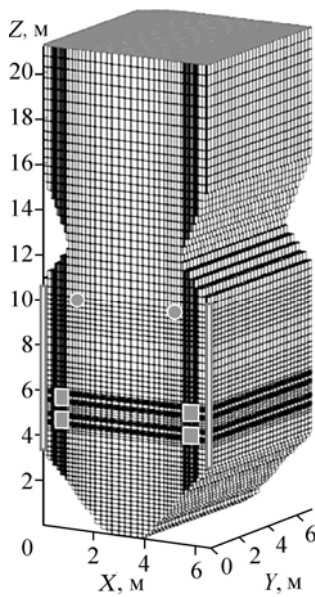


Рис. 3. Общий вид топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ 2 и разбивка ее на контрольные объемы.

В общем случае для проведения вычислительного эксперимента вся расчетная область делится разностной сеткой на дискретные точки или объемы, непрерывное поле переменных заменяется дискретными значениями в узлах сетки, а производные, входящие в дифференциальные уравнения, заменяются их приближенными выражениями через разности значений функций в узлах сетки. В настоящей работе для решения поставленной задачи применялся метод контрольного объема [4, 6, 16–17]. Размер разностной сетки составлял  $60 \times 75 \times 120$  (что соответствует 540000 расчетных ячеек).

На рис. 3 показан общий вид топочной камеры, на рис. 4 приведена схема течения в области топлива (а) и в области инжектирования воздуха по технологии острого дутья (б) в поперечном сечении камеры сгорания. На рис. 5 приведена схема компоновки горелочных устройств по тангенциальной схеме подачи аэрозольной смеси в топочную камеру, а также показана высота, на которой установлены инжекторы OFA с распределением вектора полной скорости в сечении YZ.

Расчетные характеристики всех параметров, необходимых для проведения вычислительных экспериментов по сжиганию угольной пыли в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-2, сведены в таблицу.

На рис. 6–11 представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния OFA инжекторов на температурные и концентрационные характеристики топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ.

Применение OFA-технологии вызывает снижение концентрации кислорода в области наиболее интенсивного горения (рис. 6), что приводит к повышению температуры пламени в этой области (рис. 7) и снижению общего коэффициента избытка воздуха в этой зоне. В результате повышения температуры снижается уровень выбросов от неполного сгорания, увеличивается скорость элементарных реакций и повышается качество смешения, что сокращает время пребывания, необходимое для смешения топливного газа

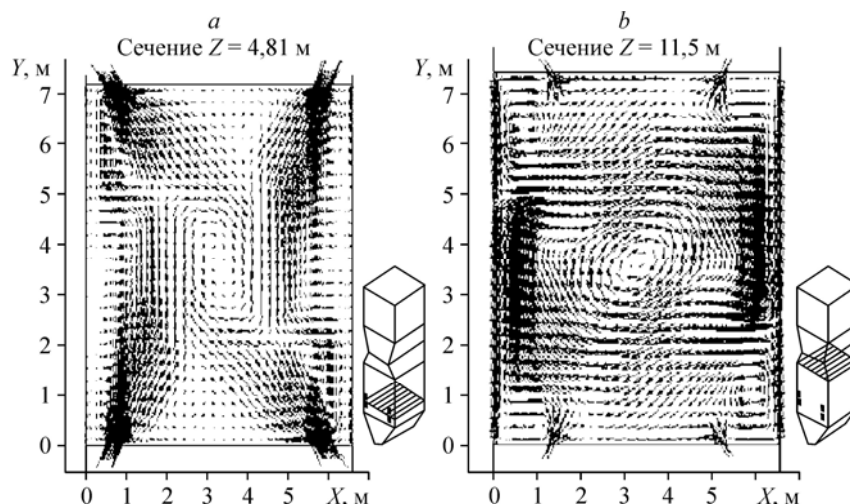


Рис. 4. Поле скоростей в области расположения горелочных устройств (а) и в области OFA-инжекторов (б).

Таблица

Расчетные характеристики котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ

Наименование, характеристики, размерность	Обозначение	Величина
Расход топлива на котел, т/ч	$B$	30
Расход топлива на горелку, т/ч	$B^f = B/Z$	3,787
Теплота сгорания, МДж/кг	$Q_H^p$	12,2
Выход летучих, %	$V^f$	32
Диаметр угольных частиц, м·10 <sup>6</sup>	$d^{\text{part}}$	60
Коэффициент избытка воздуха на выходе	$\alpha_r$	1,27
Коэффициент избытка воздуха в горелках	$\alpha_r$	0,68
Присосы воздуха в топку	$\Delta\alpha$	0,59
Температура аэросмеси, °С	$T_a$	250
Температура вторичного воздуха, °С	$T_2$	380
Температура третичного воздуха, °С	$T_3$	380
Тип используемых горелок	Щелевые	
Количество горелок, шт	$n_B$	8
Количество ярусов, шт	$N$	2
Высота топки, м	$z(H)$	21
Ширина топки, м	$Y$	6,565
Глубина топки, м	$X$	7,168
Скорость первичного воздуха, (аэросмеси), м/с	$W_1$	25
Скорость вторичного воздуха, м/с	$W_2$	40
Расход вторичного воздуха, нм <sup>3</sup> /ч	–	6000
Коэффициент избытка вторичного воздуха	–	0,38
Расход первичного воздуха, нм <sup>3</sup> /ч	–	4850

и вторичного воздуха горения. Однако это не приводит к автоматическому снижению уровня выбросов  $\text{NO}_x$ . Эффективное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  может быть обеспечено на следующей стадии, когда воздух инжектируется через OFA.

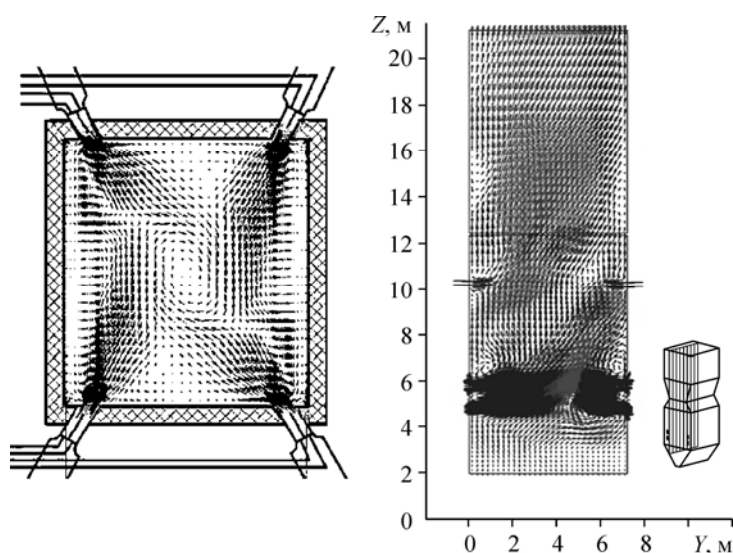


Рис. 5. Схема компоновки горелочных устройств и инжекторов OFA в топочной камере котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ.

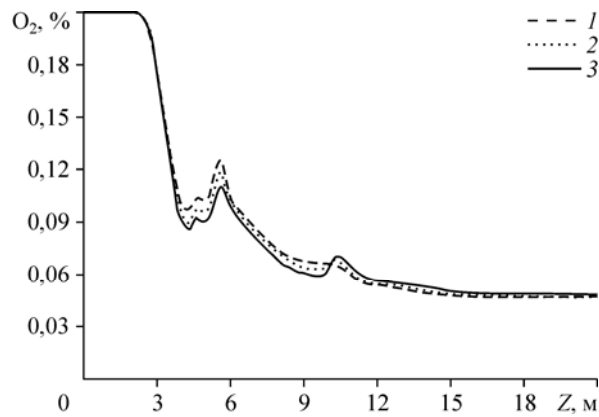


Рис. 6.

Распределение концентрации кислорода по высоте топочной камеры. OFA = 0 (1), 10 (2), 20 (3) %.

OFA-инжекторы выгоднее всего размещать в области, расположенной выше основной зоны горения, на максимально возможно большем расстоянии от самой узкой части камер сгорания. При введении дополнительного кислорода воздуха через OFA-инжекторы наблюдается дальнейшее окисление CO, движущегося в направлении к выходу, и таким образом происходит преобразование CO в  $CO_2$ . Расположение инжекторов OFA в области, находящейся выше основной зоны горения, позволяет интенсифицировать смешивание OFA-воздуха с CO в общем потоке горючих газов. А это, в свою очередь, позволяет максимально возможно преобразовать CO в  $CO_2$  прежде, чем существенная часть CO выйдет из топочной камеры (рис. 8, 9).

Результаты сравнения базового режима работы камеры с режимом, когда включаются дополнительные OFA-инжекторы, проиллюстрированы на рис. 10–11. Они показывают, что наиболее высокие концентрации  $NO_x$  наблюдаются в более низкой части топочной камеры, что характерно для всех видов топок. Однако в отличие от базового режима, когда имеют место высокие концентрации  $NO_x$  на выходе из камеры сгорания, при организации OFA-систем отмечается существенное снижение оксидов азота по мере приближения к выходу.

Особенно резкий скачок наблюдается для концентрации NO именно в области расположения инжекторов ( $z = 10,15$  м). На это влияют два фактора. Во-первых, сжигание угля

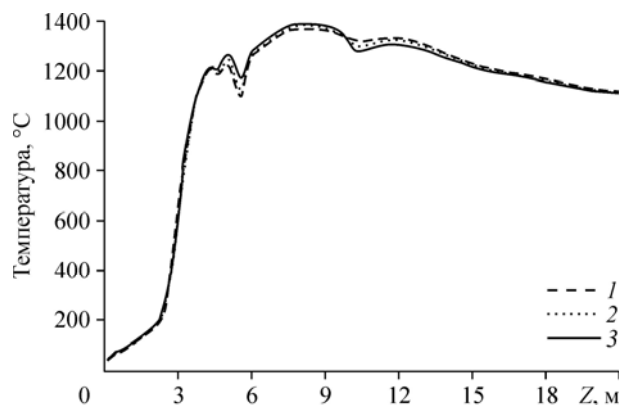


Рис. 7. Влияние OFA-инжекторов на распределение температуры по высоте топочной камеры БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ 2. OFA = 0 (1), 10 (2), 20 (3) %.

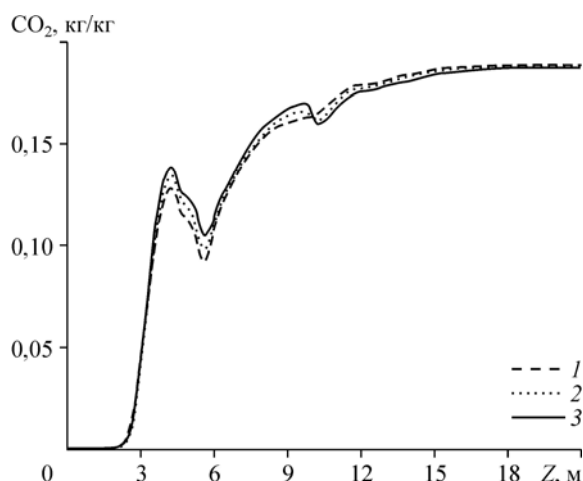


Рис. 8. Распределение концентрации диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) по высоте топочной камеры. OFA = 0 (1), 10 (2), 20 (3) %.

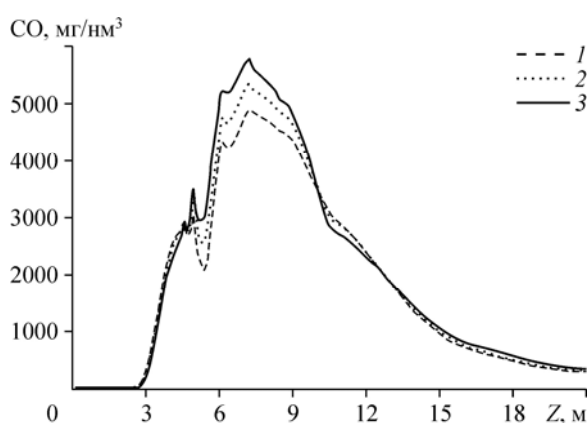
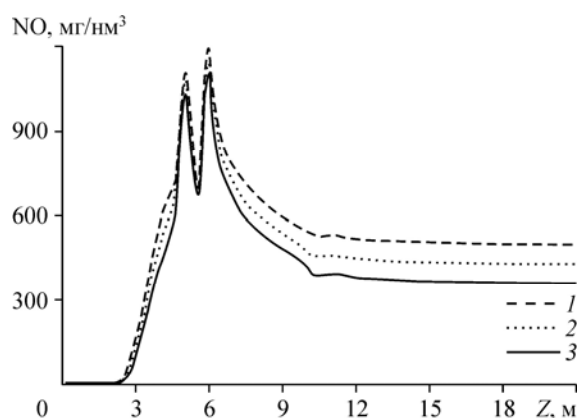


Рис. 9. Распределение концентрации оксида углерода ( $\text{CO}$ ) по высоте топочной камеры. OFA = 0 (1), 10 (2), 20 (3) %.

в области установки горелочных устройств имеет место при относительном дефиците окислителя и повышенном содержании топлива, т.е. когда происходит горение богатой топливом аэросмеси. При этом в данной зоне уменьшается образование топливных  $\text{NO}_x$ . Во-вторых, в области инжекторов OFA имеют место процессы дожигания аэросмеси и летучих веществ. В этой области происходит завершение процесса горения при наблюдающемся увеличении объема пламени и при относительно низкой температуре вследствие подачи дополнительного количества кислорода из воздуха. Таким образом, относительно низкая температура горения в области инжекторов OFA ограничивает образование термических  $\text{NO}_x$ .

Рис. 10. Распределение концентрации окиси азота ( $\text{NO}$ ) по высоте топочной камеры.

OFA = 0 (1), 10 (2), 20 (3) %.



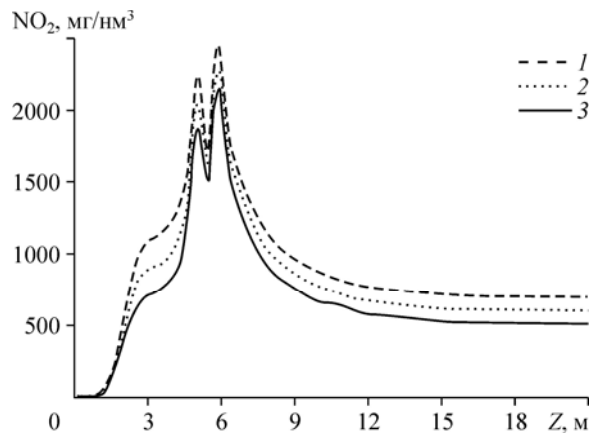


Рис. 11. Распределение концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) по высоте топочной камеры. OFA = 0 (1), 10 (2), 20 (3) %.

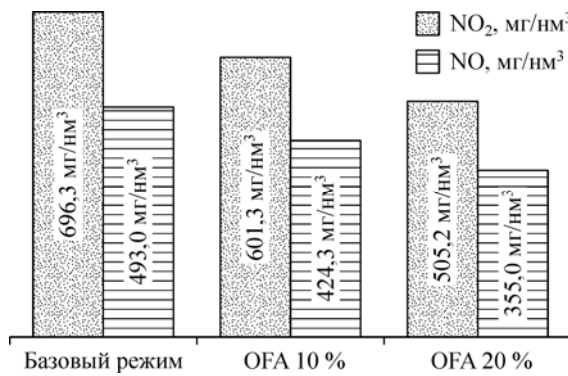


Рис. 12. Влияние OFA на выбросы оксидов азота NO и  $\text{NO}_2$  на выходе из камеры сгорания БКЗ-160.

Комбинация этих двух эффектов и приводит к существенному снижению концентрации  $\text{NO}_x$  на выходе из топочных камер.

На рис. 12–13 приведена диаграмма результатов численных исследований по организации процесса горения твердого топлива с учетом технологии OFA и показано снижение в связи с ее использованием концентрации оксидов азота на 27 % при максимальной доле дополнительного воздуха (OFA = 20 %) по сравнению с базовым режимом сжигания топлива (OFA = 0 %).

Результаты проведенного численного моделирования процесса горения пылеугольного факела в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ 2 с применением



Рис. 13. Влияние OFA на температуру на выходе из камеры сгорания и на потери тепла с недожогом.



метода «Overfire Air» позволяют предложить теплоэнергетикам новейшие технологии чистого сжигания угля и снижения вредных выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

Вычислительные эксперименты по сжиганию экибастузского угля проведены для топочной камеры с тангенциальной подачей топлива на примере модели котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ 2. Однако метод «Overfire Air», рассмотренный в работе, можно использовать при проведении подобных вычислительных экспериментов на любых действующих топочных устройствах мощных энергоблоков. Это позволяет эффективно управлять процессами горения топлива в реальных энергетических установках с необходимым воздействием на различные его параметры, отыскивать наилучшие конструктивные и компоновочные решения по горелочным устройствам, создавать оптимальные способы сжигания высокозольного угля, минимизировать вредные пылегазовые выбросы в атмосферу.

### Список литературы

1. **Алияров Б.К.** Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях. Алматы: Гылым, 1996. 272 с.
2. **Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К.** Огневое моделирование пылеугольных топок. Алма-Ата: Наука, 1982. 212 с.
3. **Leithner R., Müller H.** CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conf. on Computational Fluid and Solid Mechanics. Cambridge, 2003. 172 p.
4. **Leithner R.** Numerical simulation. Computational fluid dynamics CFD: Course of lecture. Braunschweig, 2006. 52 p.
5. **Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M., Safarik P.** Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers // J. Thermal Sci. 2015. Vol. 24, No. 3. P. 275–282.
6. **Müller H.** Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. 1992. Vol. 6, No. 268. 158 p.
7. **Аскарлова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болеженова С.А., Максимов В.Ю.** Численное моделирование процесса горения угля, инициируемого плазменным источником // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 779–786.
8. **Аскарлова А.С., Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б.** Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 467–476.
9. **Болеженова С.А., Аскарлова А.С., Мессерле В.Е., Максимов В.Ю., Габитова З.Х.** Численное моделирование горения пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического котла // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 3. С. 467–474.
10. **Askarova A.S., Bolegenova S., Maximov V., Bekmukhamet A., Ospanova Sh.** Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // Procedia Engng. 2012. Vol. 42. P. 1365–1374.
11. **Askarova A.S., Bolegenova S., Maximov V., Bekmukhamet A.** Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber // Proc. Engng. 2012. Vol. 42. P. 1259–1265.
12. **Askarova A.S., Karpenko E.I., Lavrishcheva Y.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B.** Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2007. Vol. 35, No. 6. P. 1607–1616.
13. **Серант Ф.А., Гордеев В.В., Саломасов Ю.М., Конышкин В.Ф. и др.** Двухступенчатое сжигание высокозольного экибастузского угля на модернизированном котле ПК-39-2М энергоблока 325 МВт (ст. № 2) электростанции АО «ЕЭК» г. Аксу Казахстан // XIII Всеросс. междуна. конф. «Горение твердого топлива», 13–16 ноября 2012. Новосибирск, 2012. С. 92.1–92.9.
14. **Hunt T., Muzio L., Smith R., Hanley T.J.** Integrating low- $\text{NO}_x$  burners, overfire air, and selective non-catalytic reduction on a utility coal-fired boiler // Environmental Progress. 1995. Vol. 14, No. 2. P. 115–120.
15. **Kuang M., Li Zh., Jing X., Zeng X. et al.** Characterization of combustion and  $\text{NO}_x$  emissions with respect to overfire air damper opening in a down-fired pulverized-coal furnace // Energy Fuels. 2013. Vol. 27, No. 9. P. 5518–5526.
16. **Askarova A., Karpenko E., Messerle V. et al.** Plasma enhancement of combustion of solid fuels // J. High of Energy Chemistry. 2006. Vol. 40, No. 2. P. 111–118.
17. **Leithner R.** Energy conversion processes with intrinsic  $\text{CO}_2$  separation // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2005. Vol. 18. P. 135–145.
18. **Карпенко Е.И., Карпенко Ю.Е., Мессерле В.Е., Устименко А.Б.** Использование плазменно-топливных систем на пылеугольных ТЭС Евразии // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 10–14.
19. **Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Bekmukhamet A., Maximov V., Beketayeva M.T.** Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // Int. J. Mech. 2013. Vol. 7. P. 343–352.

20. **Askarova A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V., Beketayeva M., Ospanova Sh., Gabitova Z.K.** Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 9. P. 39–50.
21. **Askarova A., Gorokhovski M., Chtab-Desportes A., Voloshina I. et al.** Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // 6th Intern. Symp. on Multiphase Flow. Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conf. Proceedings. 2010. Vol. 1207. P. 66–73.
22. **Askarova A.S., Buchmann M.A.** Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal // 18th Dutch-German Conf. on Flames, Germany, 1997. Vol. 1313. P. 241–244.
23. **Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А., Бекетаева М.Т., Габитова З.Х.** Вычислительный метод исследования горения твердого топлива в камерах сгорания ТЭЦ // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 5. С. 792–798.
24. **Vockrodt S., Leithner R., Schiller A., et al.** Firing technique measures for increased efficiency and minimization of toxic emissions in Kasakh coal firing // 19th German Conf. on Flames, Germany, 1999. Vol. 1492. P. 93–97.
25. **Askarova A.S., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Maximov V., Ospanova Sh., Gabitova Z.K.** Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber // Int. J. Mech. 2014. Vol. 8. P. 112–122.
26. **Askarova A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Ospanova Sh., Gabitova Z.** Using 3D modeling technology for investigation of conventional combustion mode of BKZ-420-140-7c combustion chamber // J. Engng and Appl. Sci. 2014. Vol. 9, No. 1. P. 24–28.
27. **Askarova, A.S., Karpenko, E.I., Karpenko, Yu.E. et al.** Mathematical modeling of the processes of solid fuel ignition and combustion at combustors of the power boilers // 7-th Int. Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Theory and Practice of Energetic Materials. China, 2007. Vol. 7. P. 672–683.

*Статья поступила в редакцию 30 января 2015 г.,  
после доработки — 17 июля 2015 г.*