

Снижение накипеобразования в паровых котлах./ Антоненко С.Е. // Вестник ДонНАБА. – Вып. 2003-4 (41) – Макеевка, 2003. – С.18–22. 10. Лукьянов А.В., Найманов А.Я., Антоненко С.Е. Экспериментальные исследования накипеобразования в паровом котле при подпитке электрохимически умягченной водой / Лукьянов А.В., Найманов А.Я., Антоненко С.Е. // Вестник ДонНАСА. – Вып. 2011-5 (91) – Макеевка, 2011. – С.23–30.

УДК 536.46:532.517.4

А.С. Аскарова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов, А. Бекмухамет
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики
при физико-техническом факультете КазНУ им. Аль-Фараби

УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ КОТЛА БКЗ - 160 АЛМАТИНСКОЙ ТЭЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ “OVERFIRE AIR”

© Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А., 2013

Наведено результати обчислювальних експериментів з використанням технології “Overfire Air” при горінні у топці котла БКЗ-160 на Алматинській ТЕС, що дозволило зменшити шкідливі викиди диоксиду вуглецю, оксиду та диоксиду азоту, і відповідно мінімізувати втрати енергії. Вказані результати експериментів з впливу додаткового подавання повітря на показники тепломасоперенесення. Виконане порівняння з базовим режимом горіння твердого палива.

Ключові слова: моделювання, шкідливі викиди, технологія “Overfire Air”.

Проведены вычислительные эксперименты с применением технологии “Overfire Air” при горении пылеугольного факела в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭС, которые позволяют достичь снижения вредных выбросов диоксида углерода CO_2 , оксида NO и диоксида азота NO_2 , и минимизировать потери энергии. Приведены результаты вычислительных экспериментов по влиянию подачи дополнительного воздуха (OFA-технология) на основные характеристики тепломассопереноса. Проведено сравнение с базовым режимом горения твердого топлива, когда подача дополнительного воздуха отсутствует (OFA=0%).

Ключевые слова: моделирование, вредные выбросы, технология “Overfire Air”.

Введение

Участие энергетических предприятий в загрязнении окружающей среды продуктами сгорания топлива велико. Это, прежде всего, электростанции, работающие на твердом топливе и являющиеся основным источником загрязнения воздуха. В атмосферу Казахстана выбрасываются такие вещества как оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, пыль, свинец, диоксид серы и т.д., которые наносят существенный вред человеческому организму [1].

В связи с тем, что одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха вредными газовыми и пылевыми выбросами являются электростанции, работающие на твердом топливе, становится актуальной разработка технологий сжигания с минимальными выбросами NO_x , 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.

Проблема выброса вредных веществ в атмосферу, посредством энергетических предприятий, 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 современных супер-ЭВМ (SUN) позволяет решать эти задачи для конкретных энергетических установок (ТЭС, ГРЭС и т.д.) и для любого энергетического топлива [2].

Разработанный метод 3D моделирования был применен для проведения компьютерных экспериментов по применению новейших технологий “Overfire air - OFA” для снижения выбросов оксидов азота.

Метод OFA, или как его еще называют “метод острого дутья” [3], 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 “острое дутье” (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 NO_x из азота, содержащегося в топливе (топливные NO_x).

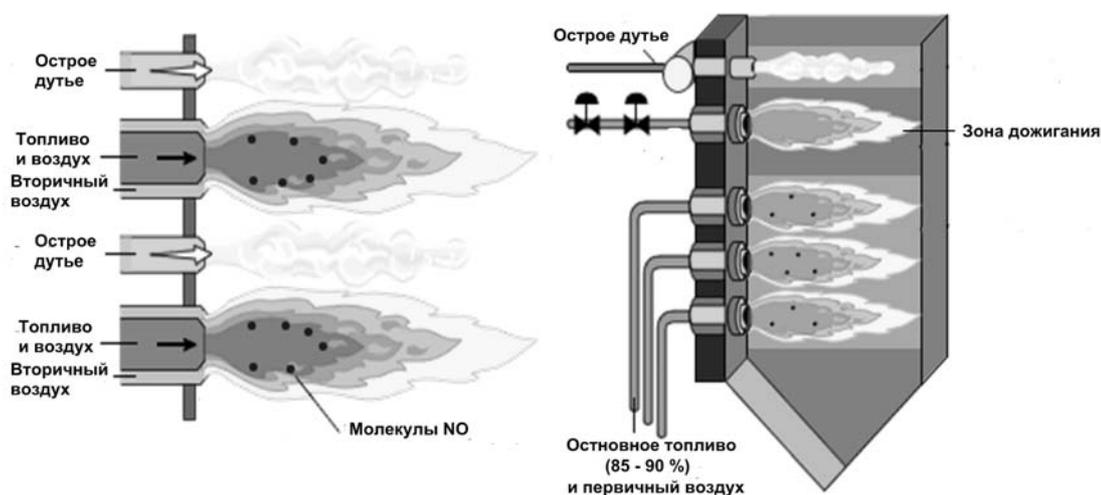


Рис. 1. Различные варианты компоновки OFA инжекторов

“Острое дутье” подается над зоной основного горения в несколько воздушных каналов, расположенных на передней и задней стенках камеры сгорания над верхним уровнем горелок, для достижения как можно более полного сгорания топлива. Относительно низкая температура в обогащенной кислородом зоне дожигания обуславливает пониженное образование NO_x из воздуха (термические NO_x) [4].

На рис. 2 представлены аэродинамические особенности возможных методов организации процесса горения с использованием “Overfire air” в реальной камере сгорания с тангенциальной схемой подачи топлива и окислителя. Видно, что преимущество данного метода заключается в том, что для широкого выбора компоновки инжектирующих источников, возможно обеспечить минимальные затраты при реорганизации существующего режима.

Численное моделирование процесса сжигания твердого топлива в пылеугольном состоянии проводилось нами 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-ε -модели турбулентности, а также уравнения состояния и уравнений химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества.

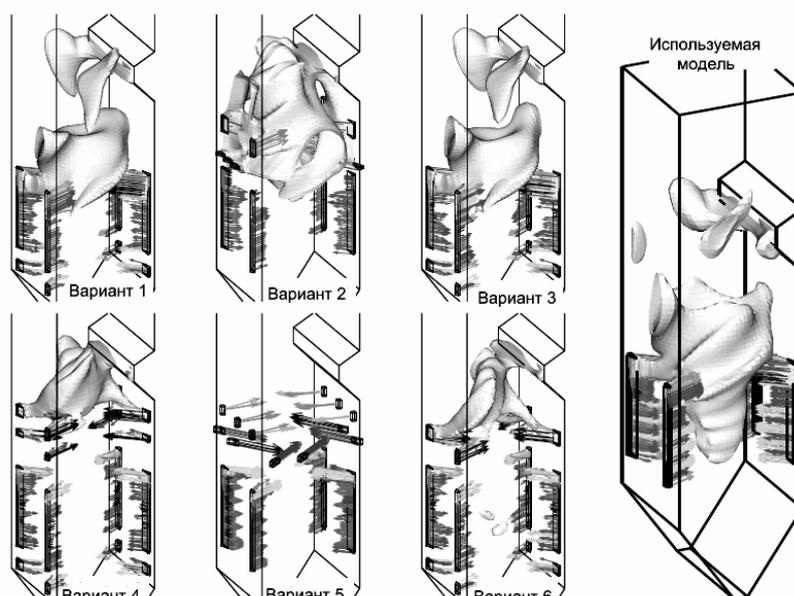


Рис. 2. Аэродинамическая картина введения в камеру сгорания воздушных дополнительных потоков по методу “Overfire Air”

Первичные инжектируемые потоки представляют собой первичный 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 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 тепловых NO_x .

Постановка задачи и методика проведения вычислительного эксперимента

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

Среди методов моделирования горения пылеугольного топлива наибольшее распространение получил метод, в основе которого лежит Эйлеров подход для описания движения и тепломассообмена газовой фазы. Этот метод использует пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергий для газовой смеси. Для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлив вдоль их траекторий используется Лагранжев подход [3]. Турбулентная структура потока описывается двухпараметрической $k-\varepsilon$ моделью турбулентности, где k – кинетическая энергия турбулентности, ε – турбулентная энергия диссипации. Радиационный теплообмен представляется шестипоточной моделью переноса.

Численное моделирование процесса сжигания твердого топлива в пылеугольном состоянии проводилось нами 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-ε -модели турбулентности, а также уравнения состояния и уравнений химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества. Система уравнений переноса может быть записана в обобщенном виде.

Математическое описание физических и химических процессов основано на решении уравнений баланса. В общем виде эти уравнения содержат четыре слагаемых, описывающих:

- изменение величины со временем;
- конвективный перенос;
- диффузионный перенос;
- источник или сток.

Для вывода балансных соотношений выбран стационарный контрольный элемент объема или контрольный элемент массы, рис. 3. Предполагается, что центр тяжести выбранного элемента движется со скоростью течения. Этот стационарный контрольный объем соответствует обоснованному подходу Эйлера для течений. Изменение транспортной величины описывается в единичном жидком элементе. Значение этой величины определяется в каждой точке рассматриваемой области.

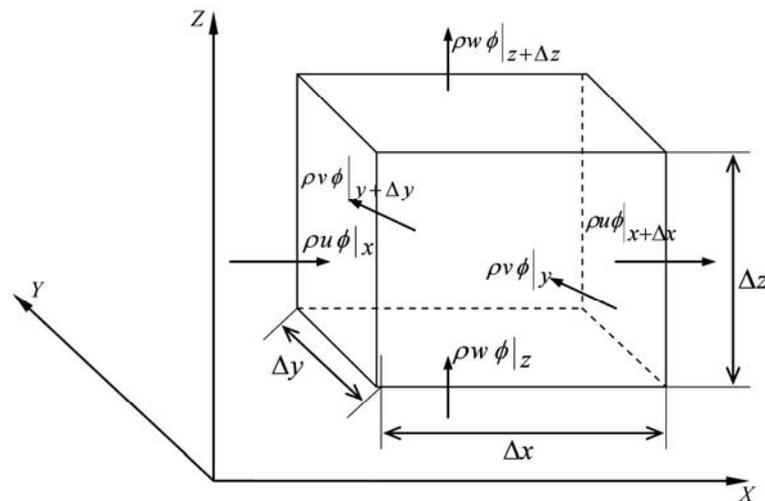


Рис. 3. Контрольный объем для обобщенного уравнения переноса [4], где $\rho u \phi|_{i,i+\Delta i}$ – описывает конвективный перенос транспортной переменной через границы контрольного объема в декартовой системе координат

При преобразовании предельного значения из конечного в бесконечно малый контрольный элемент объема получается дифференциальное уравнение, описывающее сохранение транспортной переменной ϕ :

$$\frac{\partial(\rho u_2 \phi)}{\partial x_2} - \frac{\partial(\rho u_3 \phi)}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right] + S_\phi, \quad (1)$$

где через ϕ , называемую обобщенной транспортной переменной, обозначены: компоненты скорости u_i ($i = 1,2,3$), температура T (или энтальпия $h = c_p T$), концентрации компонента вещества c_β , кинетическая энергия турбулентности k , скорость ее диссипации ϵ , Γ_ϕ – обобщенный коэффициент обмена, S_ϕ – источниковый член в уравнениях переноса.

Заменяя в (1) конвективный и диффузионный перенос плотностью потоков, через границы контрольного объема, получим плотности потоков:

$$\Phi_{(K),j} = \rho u_j \phi - \text{конвективного};$$

$$\Phi_{(D),j} = \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \text{диффузионного}.$$

Тогда с учетом данных соотношений (1) запишется в виде:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial\Phi_{(K),j}}{\partial x_j} + \frac{\partial\Phi_{(D),j}}{\partial x_j} + S_\phi. \quad (2)$$

Запишем (2) в векторной форме:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \text{div}((- \rho u \phi) + \Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi,$$

а в тензорной форме уравнение (2) примет вид:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi. \quad (3)$$

В дальнейшем для расчета течений газ – твердое вещество с однофазным входом все транспортные величины в контрольном объеме определяются при помощи обобщенного уравнения (3). В этом уравнении S_ϕ – источниковый (стоковый) член для величины ϕ , остальные слагаемые характеризуют изменение величины ϕ :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} - \text{от времени};$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} - \text{за счет конвективного переноса};$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] - \text{за счет явлений молекулярного обмена}.$$

В основе математической модели течения газов или жидкостей лежат уравнения сохранения массы и импульса. Для потоков, в которых происходят процессы теплопередачи, а также для сжимаемых сред необходимо дополнительно решать уравнение сохранения энергии. В течениях с процессами смешивания различных составляющих, с реакциями горения и др. необходимо добавить уравнение сохранения компонентов смеси или уравнения сохранения для фракций смеси и их изменений. Для турбулентных течений система уравнений дополняется транспортными уравнениями для турбулентных характеристик.

Таким образом, для решения поставленной задачи рассматриваются уравнения, характеризующие течение и которые выводятся из обобщенного уравнения (3). Эта система не имеет аналитического решения и может быть решена только численными методами.

В общем случае для численного решения вся расчетная область разделяется 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 представленной работе для решения поставленной задачи применяется метод контрольного объема. Система алгебраических уравнений для разностного уравнения контрольного объема для каждой балансной величины имеет следующий вид:

$$a_P \phi_P = \sum_n a_n \phi_n + S_\phi.$$

Коэффициенты a_n определяют вклад конвективного и диффузионного потока по всем направлениям в каждой точке контрольного объема. В результате аппроксимации системы уравнений (2) получено алгебраическое уравнение (3) для каждого контрольного объема и для каждой искомой переменной ϕ_n . Для каждой ячейки расчетной области используются физические законы сохранения и дифференциальные уравнения, описывающие эти законы (уравнения переноса), интегрируются по объему каждой ячейки.

Использовалась гомогенная модель пылевоздушной смеси, когда скорости твердых частиц считаются равными локальной скорости газа. При этом для турбулентной вязкости с учетом твердых частиц выбрано соотношение [6]: $\mu_{P,eff} = \mu_{G,eff} (1 + \rho_P / \rho_G)^{-1/2}$.

Краевые условия для уравнений сформулированы следующим образом [5]: начальные условия: при $t = 0$; $u_i(x_i, 0) = 0$, $P(x_i, 0) = P_{атм}$, $T(x_i, 0) = T^0$, $C_\beta(x_i, 0) = C_\beta^0$, $k(x_i, 0) = 0$, $\epsilon(x_i, 0) = 0$.

Граничные условия необходимо задать на свободных поверхностях, которыми являются горелки на входе, выход из топочной камеры котла и плоскости симметрии. Все величины на входе задаются по измерениям или оцениваются. На выходе из топочной камеры принимается условие установившегося равновесия, когда производные всех функций по направлению потока равны нулю.

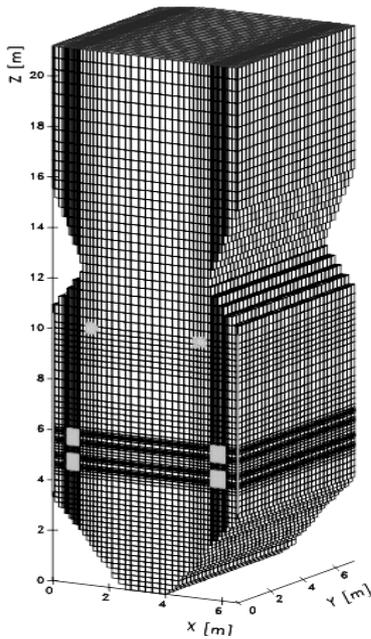


Рис. 4. Общий вид топочной камеры котла БКЗ160 Алматинской ТЭЦ и разбивка ее на контрольные объемы

На рис. 4 показан общий вид камеры сгорания, на рисунке 5 в поперечном сечении камеры сгорания приведена схема течения в области подачи топлива (а) и в области использования OFA - технологии инжестирования вторичного воздуха (б). На рисунке 6 приведено распределение векторов полной скорости в продольном сечении в камеры сгорания для различных объемов подачи дополнительного воздуха (OFA - 0%, б) OFA - 10%, в) OFA – 20%).

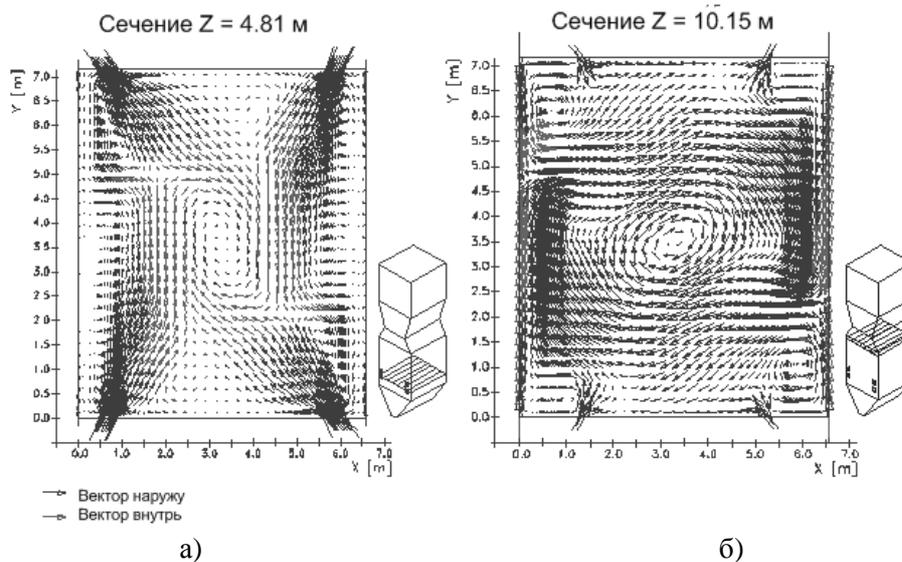


Рис. 5. Схема камеры сгорания и расположение инжекторов OFA (поле скоростей)

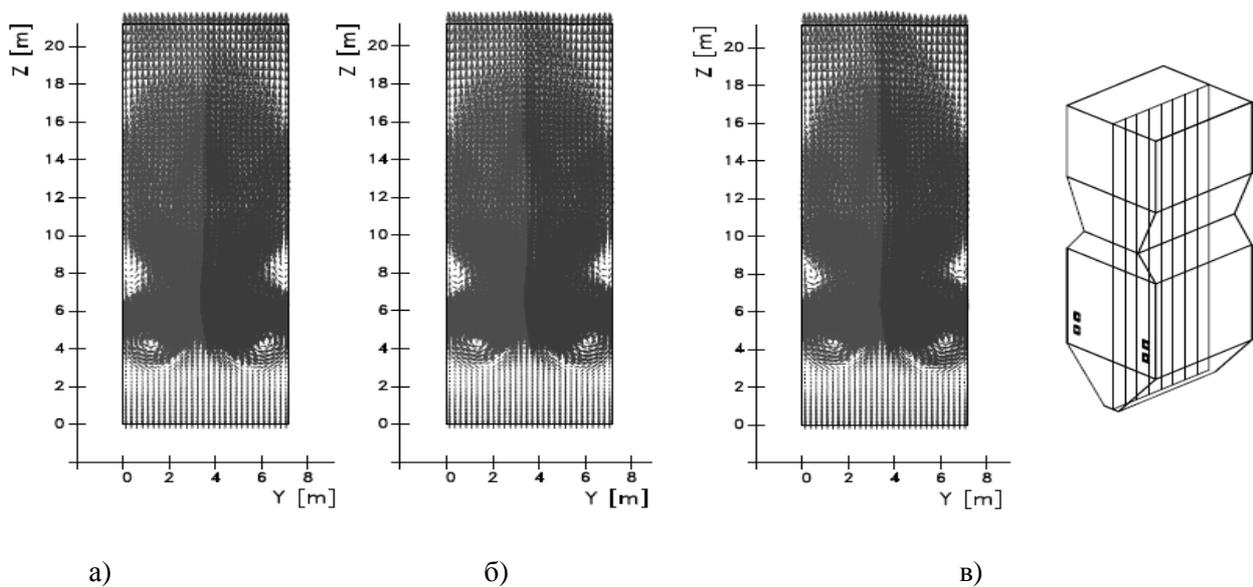


Рис. 6. Распределение векторов полной скорости в продольном сечении камеры сгорания БКЗ160: а) OFA-0%, б) OFA - 10%, в) OFA – 20%

Результаты вычислительного эксперимента

На рисунках 7 – 13 приведены результаты вычислительных экспериментов по влиянию подачи дополнительного воздуха (OFA – технология) на основные характеристики тепломассопереноса. Здесь же проведено сравнения с базовым режимом горения твердого топлива, когда подача дополнительного воздуха отсутствует (OFA=0%).

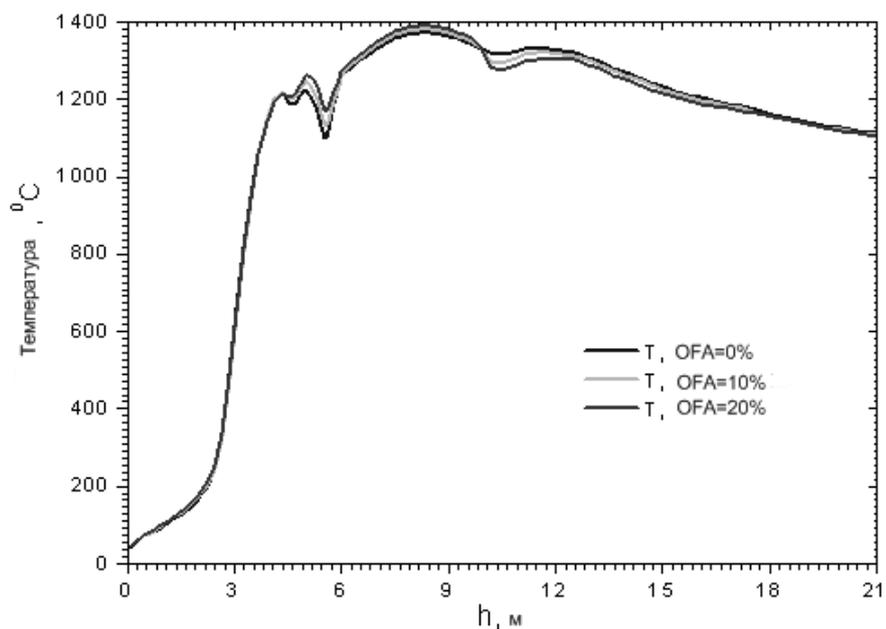


Рис. 7. Влияние OFA на распределение температуры в объеме камеры сгорания БКЗ160

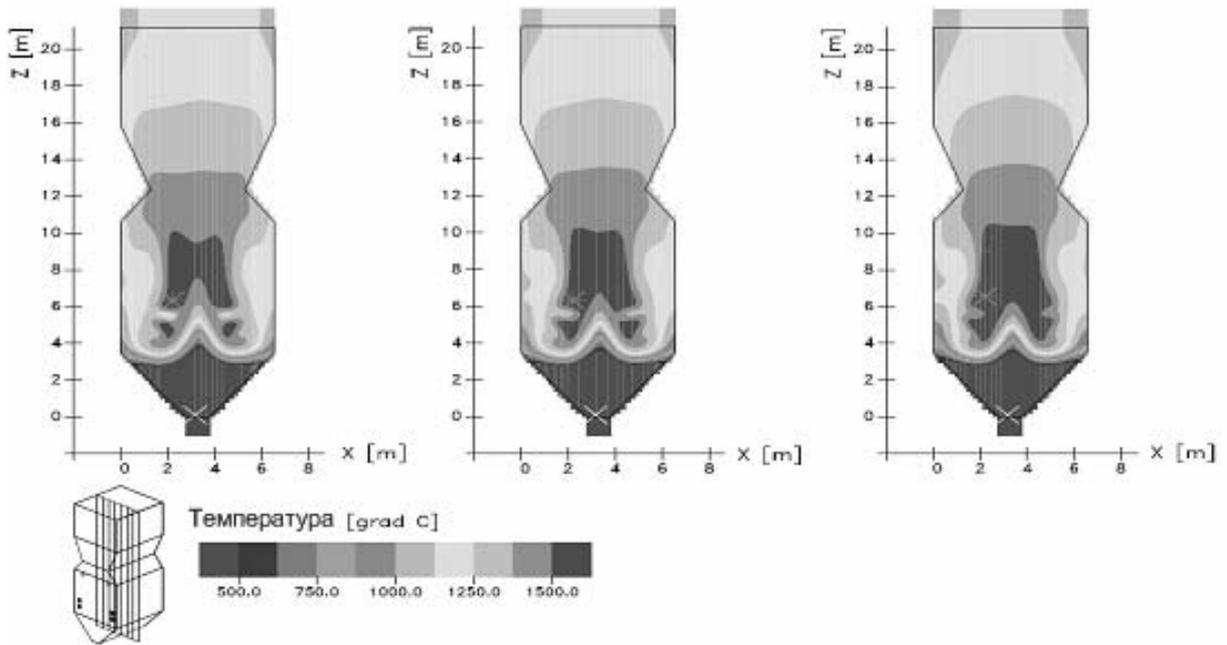


Рис. 8. Влияние OFA на распределение температуры в продольном сечении камеры сгорания БКЗ160:
 а) OFA - 0%, б) OFA - 10%, в) OFA – 20%

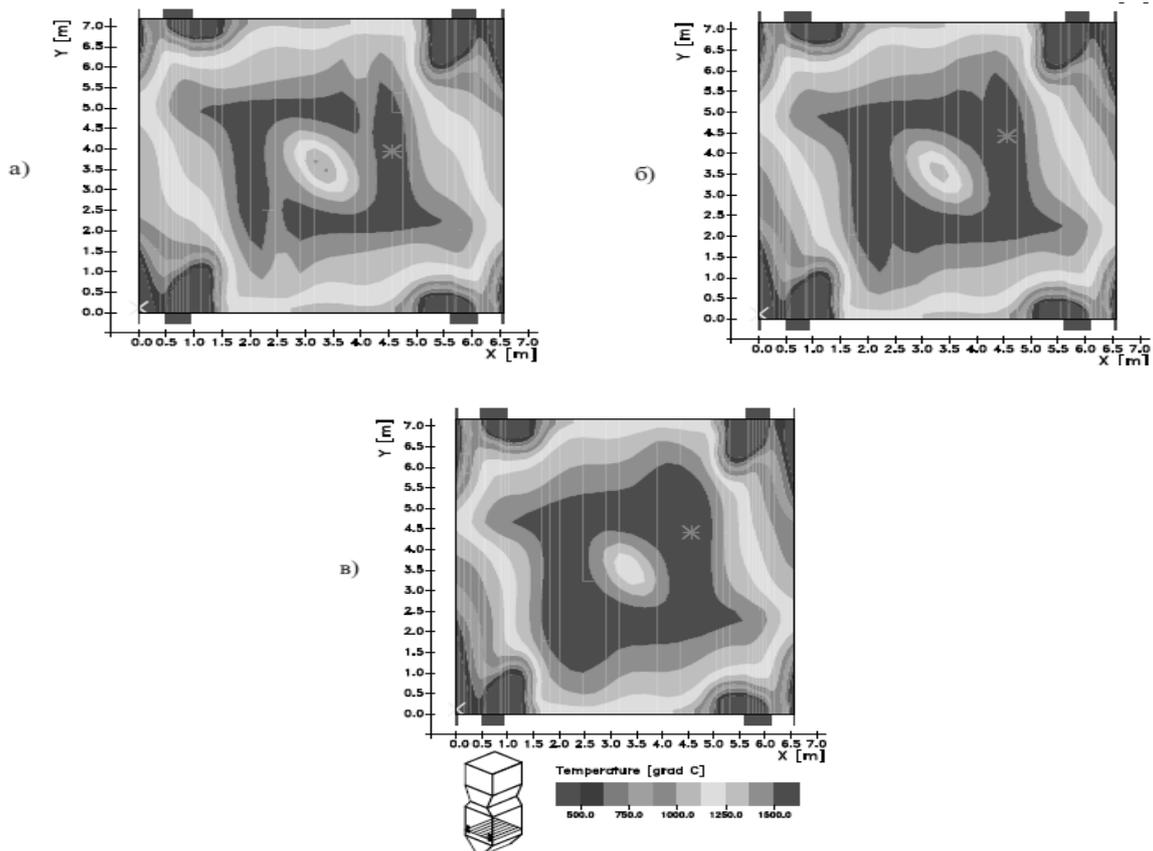


Рис. 9. Влияние OFA на распределение температуры в поперечном сечении камеры сгорания БКЗ160: а) OFA - 0%, б) OFA - 10%, в) OFA – 20%

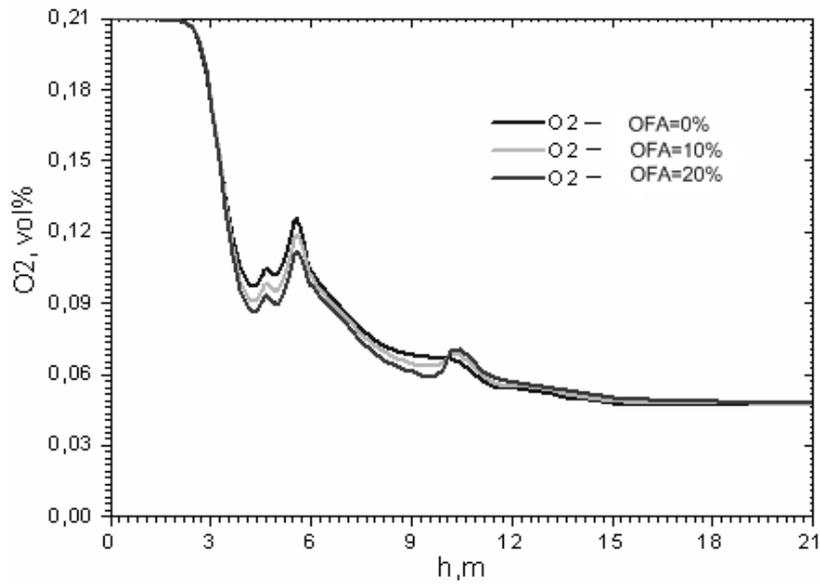


Рис. 10. Влияние OFA на распределение концентрации кислорода O_2 в объеме камеры сгорания БКЗ160

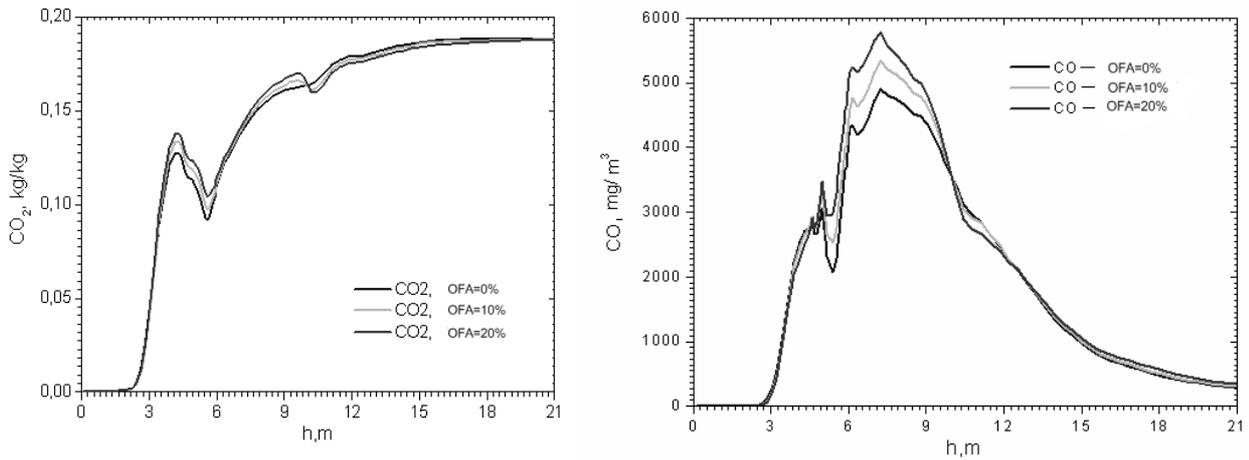


Рис. 11. Влияние OFA на распределение концентрации диоксида углерода CO_2 и CO в объеме камеры сгорания БКЗ160

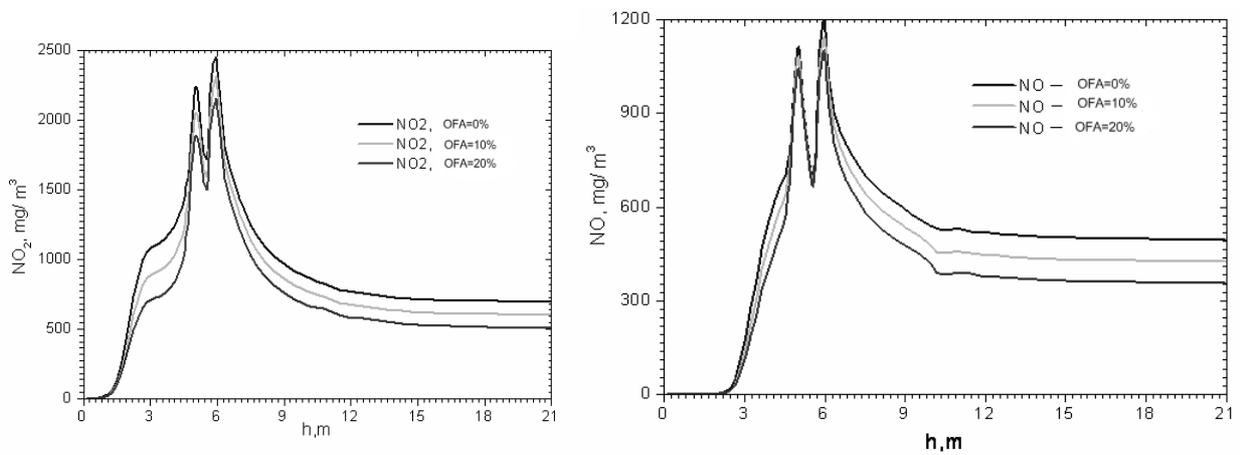


Рис. 12. Влияние OFA на распределение концентрации оксидов азота NO_2 и NO в объеме камеры сгорания БКЗ160

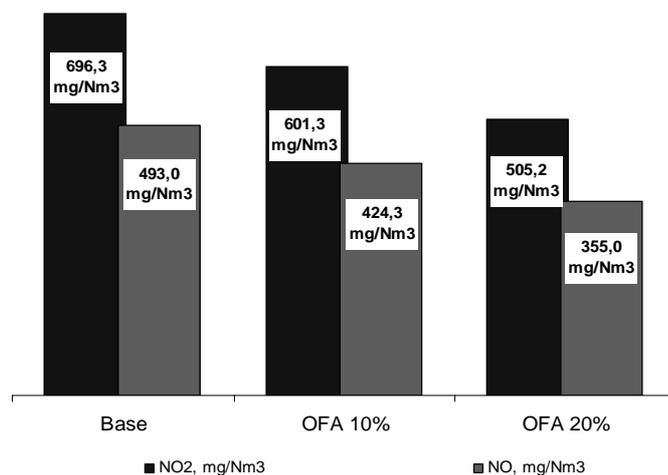


Рис. 13. Влияние OFA на выбросы оксидов азота NO и NO₂ на выходе из камеры сгорания БК3160

Выводы

Применение OFA – технологий вызывает снижение концентрации кислорода в области наиболее интенсивного горения (рис. 10), что приводит к повышению температуры пламени в этой области (рис. 7 - 9) 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 и вторичного воздуха горения.

Однако это не приводит к автоматическому снижению уровня выбросов NO_x. Эффективное снижение выбросов NO_x может быть обеспечено на следующей стадии, когда воздух инжектируется через OFA.

OFA инжекторы наиболее выгодно располагать в области выше основной зоны горения и на максимально возможно большем расстоянии от самой узкой части камер сгорания. При введении дополнительного кислорода воздуха в OFA, наблюдается дальнейшее окисление CO, движущегося в направлении к выходу и таким образом происходит преобразование CO в CO₂. Кроме того, размещение инжекторов OFA именно в этой области, позволяет интенсифицировать смешивание OFA воздуха с CO в общем потоке горючих газов. А это в свою очередь позволяет максимально возможно преобразовать CO в CO₂ прежде, чем существенная часть CO выйдет из камеры сгорания (рис. 11).

Результаты сравнения базового режима работы и включения, дополнительных OFA инжекторов, проиллюстрированные на рисунке 12, показывают, что очевидно наиболее высокие концентрации NO_x наблюдаются в нижней части камеры сгорания, что характерно для всех вида камер сгорания. Однако, в отличие от базового режима, когда наблюдаются высокие концентрации NO_x на выходе из камеры сгорания, при организации OFA систем наблюдается существенное снижение оксидов азота по мере приближения к выходу.

Особенно резкий скачок наблюдается для концентрации NO, именно в области расположения инжекторов ($z = 10,15\text{м}$). Это происходит из-за двух факторов. Прежде всего, богатая топливом окружающая среда в более низкой части печи препятствует формированию NO_x. Кроме того, такая среда предполагает наличие условий для перегорания. Комбинация этих двух эффектов и приводит к существенному снижению в концентрациях NO_x на выходе из камер.

На рисунке 13 приведена диаграмма результатов численных исследований по организации процесса горения твердого топлива с учетом технологии OFA и показано снижение в этой связи концентрации оксидов азота на выходе из камеры сгорания. Можно отметить сокращение концентрации NO_x 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 БКЗ160 Алматинской ТЭС с применением метода “Overfire Air” (в топочное устройство над горелкой подается часть воздуха - “острое дутье”) позволяют предложить теплоэнергетикам технологии снижения вредных выбросов диоксида углерода CO₂, оксида NO и диоксида азота NO₂.

Вычислительные эксперименты по сжиганию пылеугольного топлива на примере экибастузского угля проведены в топочных камерах действующего энергетического объекта на примере модели с тангенциальной подачей топлива действующего котлоагрегата БКЗ160 Алматинской ТЭС. Однако, метод “Overfire air”, предложенный в работе, дает возможность проводить подобные вычислительные эксперименты с любым твердым топливом на любых действующих топочных устройствах мощных энергоблоков. Это позволяет эффективно управлять процессами сжигания топлива в реальных энергетических установках с необходимым воздействием на различные его параметры, создавать оптимальные способы сжигания топлива относительно эффективности энергетических объектов и минимизации вредных выбросов, отыскать наилучшие конструктивные и компоновочные решения по горелочным устройствам, способствующие скорейшему освоению мощных котлоагрегатов.

1. Askarova A.S., Heierle Yevgeniya, Leithner Reinhard, Mueller Horst CFD Code Florean for Industrial Boilers Simulations // WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER, Issue 4, Volume 4, 2009, ISSN: 1790-5044, pp.98-107, 10 p. 2. Полежаев В.И., Бунэ А.В. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье–Стокса. – М.: Наука, 1987. – 272 с. 3. Системы сжигания с низкой эмиссией NO_x. Программа экологически чистого ископаемого топлива. Информационный буклет. – СИ008. – Март 2005. – 16 с. 4. Basic Concepts in Environmental Sciences // US Environmental protection agency. – USA. - March, 2006. 5. Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung. Düsseldorf: VDI-Verlag. V.268. № 6. 1992. 6. Smoot L. D. Pulverized Coal Diffusion Flames: A perspective Through Modelling // 18 In. Symposium on Combustion, The Combustion Institute. 1981. – P. 1185 – 1202.