

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И МАЛОЗАТРАТНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ УГОЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПОД ВИХРЕВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ СЖИГАНИЯ

Саломатов Владимир Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. Института теплофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1.

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

Подведены некоторые итоги экспериментального и численного моделирования вихревых топочных процессов и эмиссии токсичных выбросов при сжигании низкокачественных углей в парогенераторе с вихревой топкой Н.В. Голованова. Исследования турбулентной аэродинамики вихревых топок на физических и математических моделях дали возможность установить их основные габаритно-компоновочные соотношения, а результаты моделирования лучистого теплообмена, горения топлива, химкине-тики образования токсичных выбросов явились базовой информацией по определению их энергетических параметров. Выполненный на современном уровне комплекс научно-исследовательских работ позволил выработать рекомендации по дальнейшему усовершенствованию конструктивных и режимных характеристик парогенератора с вихревой топкой на березовском угле Канско-Ачинского бассейна, а также лег в основу проектов реконструкции котла ТП-87 на кузнецких углях и БКЗ-320 на березовском угле.

Ключевые слова:

Энергетика, уголь, парогенератор, экология, реконструкция, вихревая топка, турбулентная аэродинамика, тепломассоперенос, тепловое излучение, токсичные выбросы.

Введение

В настоящее время одно из основных направлений развития в теплоэнергетике при сжигании низкосортных топлив [1–4] – создание энергоэффективного и экологически чистого оборудования с выбросом в окружающую среду минимума: летучей золы, оксидов серы, азота и других токсичных продуктов сжигания. Наиболее вредным газовым компонентом является NO_x , уровень которого существенно зависит от термических и аэродинамических процессов в топке. Основной же вклад в суммарные выбросы оксидов азота при сжигании углей сибирских месторождений вносят термические NO_x . Из технологических методов снижения термических NO_x в топке наименее затратным выступает многоступенчатый подвод окислителя. Но это не единственный способ уменьшения их выхода. Есть другой, весьма экономичный – за счет чисто аэродинамических приемов, например, закручиванием потоков. Это одно из обстоятельств, почему закрученные течения лежат в основе современных топочных устройств. К таковым относятся: тангенциальная топка, топка с горизонтальным вихрем, кольцевая топка, циклонная топка, топка с циркулирующим кипящим слоем и др. В последние годы низкотемпературный вихрь нашел широкое применение и в котлах стационарного кипящего слоя малой мощности для закрутки газодисперсного потока в надслоевом пространстве с целью успешного сжигания «тяжелых», прежде всего, топлив. Соотношение аэродинамических и химических временных масштабов процесса горения, определяемое параметром Дамкелера (Da), значительно влияет на образование термических NO_x в процессе сжигания. Чем ниже Da , тем меньше выход термических NO_x [5]. Эти положения реализуются и в конструкции вихревой топки (ВТ), разработанной Н.В. Головановым

с сотрудниками. Она пригодна для сжигания газообразных, жидких и широкого ряда твердых топлив (в режиме жидкого плака) и востребована для решения поставленных проблем.

В камере горения этой топки процесс сжигания протекает при повышенных объемных теплонапряжениях, которые обеспечивают жидкотекучее состояние плака. В таких топках интенсивный процесс ассимиляции оплавленных золых частиц гарнисажным слоем плака увеличивает шлакоулавливание и уменьшает унос из нее «летучей» золы. В верхней части топки (камера охлаждения), где располагаются топочные экраны открытого типа, газы и зола охлаждаются интенсивно, что позволяет избежать их зашлаковывания.

Перечислим основные преимущества вихревого сжигания:

- возможность работы на широкой гамме топлив;
- высокие объемные теплонапряжения, что гарантирует непрерывное жидкое шлакоудаление (ЖШУ);
- значительный коэффициент шлакоулавливания за счет центробежного эффекта;
- масса циркулирующего топлива находится во взвешенном состоянии, что существенно ускоряет тепломассообменные процессы;
- топливо, многократно вращаясь, успевает газифицироваться и постепенно выгорает, что придает процессу горения определенную устойчивость;
- наличие устойчивого высокотурбулентного закрученного потока, что стимулирует более быструю доставку кислорода, а следовательно, уменьшение коэффициента избытка воздуха;
- увеличение «технологического» времени пребывания частиц топлива за счет закрутки газодисперсной среды в рабочем пространстве;

- уменьшенные габаритные размеры топочных объемов за счет применения форсированной камеры горения;
- возможность удерживать значительный запас топлива в топке;
- практически изотермические условия в камере горения;
- улучшенные экологические параметры горения, главным образом, за счет сниженного коэффициента избытка воздуха.

Недостатки вихревого сжигания:

- тяжелые условия работы огнеупорного покрытия вследствие его взаимодействия с агрессивным шлаком;
- жесткие требования по поддержанию оптимальной температуры в камере горения для придания требуемой вязкости жидкому шлаку.

Из перечисленного следует, что вихревой перенос является аэродинамической основой всего процесса сжигания в таких топочных устройствах. Основная роль аэродинамической структуры вихревого потока – совершенное смесеобразование газифицированного топлива и окислителя, без чего невозможно достигнуть ни требуемой интенсивности процессов, ни допустимых показателей по вредным выбросам, ни высокого уровня экономичности сжигания. Объектом исследования является парогенератор с вихревой топкой (ПВТ) Н.В. Голованова. К настоящему времени проведен обширный комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ применительно к топочным устройствам такого типа. Анализ работ, выполненных ранее сотрудниками НПО ЦКТИ [1–3], исследователями из Сибтехэнерго, Новосибирскэнерго, Томского [4], Ленинградского политехнических институтов и других организаций применительно к вихревой топке, свидетельствует о недостаточной изученности в ней сложной структуры закрученных потоков, особенно таких эффектов, как присоединение факела к одной из поверхностей нагрева (явление Коанда), прецессия вихревого ядра, вторичные течения, рециркуляционные зоны, что не позволяет перейти на новой научной основе к созданию перспективных котельных агрегатов с вихревой технологией сжигания. По сравнению с применявшимися в этих публикациях методами исследования, на сегодня налицо прогресс в развитии уникальных измерительных систем, компьютерных 3-D расчетов, что на данном этапе дает возможность получать недоступную ранее детальную информацию по параметрам турбулентного закрученного течения, теплообмена, горения, эмиссии токсичных выбросов и другие характеристик практически в любой точке пространства топочной камеры. Результаты же физического и математического моделирования являются основой для выбора конструктивных и режимных параметров для создания новых котлов и реконструкции функционирующих под вихревую технологию сжигания с вихревыми топками.

Ниже освещены итоги решения на современном уровне сформулированных проблем.

Физическое моделирование топочных процессов в парогенераторах с вихревой топкой

Детальные экспериментальные исследования рабочих процессов в ПВТ служат источником новых знаний и закономерностей, благодаря которым целенаправленно оптимизируются режимные и конструктивные параметры ВТ. Они также служат основой для верификации математических моделей топочных процессов, которые без экспериментально вводимых коэффициентов и зависимостей не обеспечивают должную адекватность и информативность последних.

К данному моменту наибольшие усилия нами были затрачены на проведение аэродинамического эксперимента в моделях ПВТ. Экспериментальная часть работы реализуется программой исследований на воздушной (масштаб 1:15) и гидравлической (масштаб 1:30) моделях, геометрически подобных одной секции опытно-промышленного котла с вихревой топкой ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3. Обе модели выполнены из органического стекла. На фронтальной стенке под углом 15° симметрично расположены два прямоугольных сопла. При моделировании был выдержан параметр $\Sigma f/F_t$, являющийся постоянным для данного типа ПВТ, где Σf – сумма площадей сечения горелок, F_t – площадь диаметрального сечения камеры горения (КГ).

Экспериментальные исследования топочных процессов представляют собой сложную проблему, поэтому вынуждены ограничиться результатами изотермического моделирования аэродинамики с использованием лишь одного определяющего критерия подобия – числа Рейнольдса (Re). Последнее может быть оправдано, с одной стороны, тем, что аэродинамика «горячего» течения качественно повторяет картину «холодного» [6]. С другой стороны, в лабораторных условиях по правилам подобия число Re на порядок выше, чем в реальном объекте, но, учитывая наличие автомодельности течения относительно числа Рейнольдса в диапазоне значений $Re=10^4-10^6$ [6], можно здесь применить приближенное моделирование.

На воздушной модели (рис. 1) был выполнен основной объем эксперимента по измерению средних скоростей и интенсивности турбулентных пульсаций с использованием двухканального термоанемометра АТА-03 постоянной температуры с линейризатором и датчиков с прямой и наклонной нитью. Проводились также измерения с помощью тепловизионной системы ТВ-М. С целью измерения скоростей твердых частиц и их концентраций по сечениям топочного объема использована лазер-доплеровская диагностика на волоконных датчиках, а также «время-пролетная» методика с применением двойного оптико-волоконного зонда, разработанные в ИТ СО РАН.

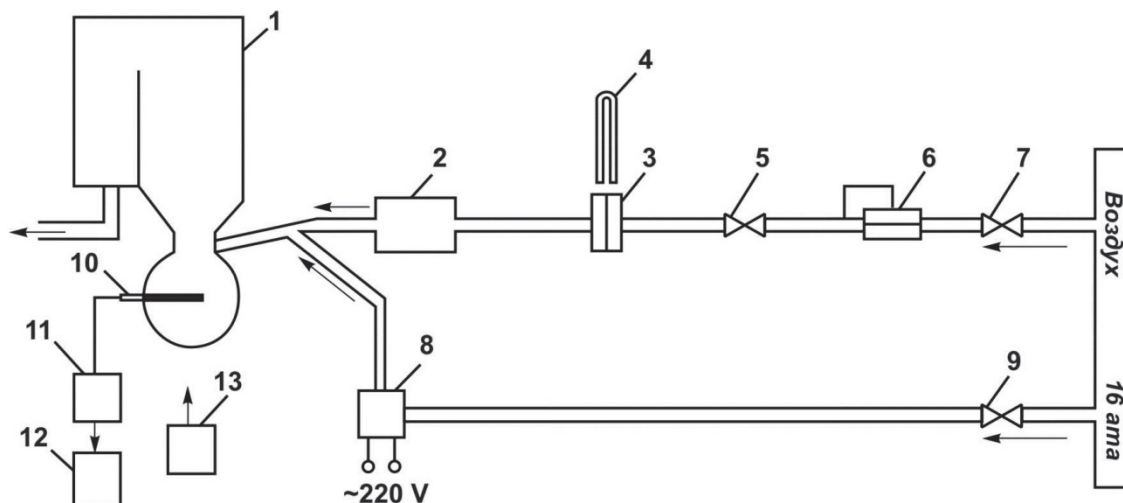


Рис. 1. Схема стенда для исследования аэродинамики и тепломассообмена в моделях ПВТ с вихревой топкой: 1 – модель ПВТ с вихревой топкой; 2 – ресивер; 3 – расходомер; 4 – U-образный манометр; 5, 9 – вентиль; 6 – редуктор; 8 – электронагреватель; 10 – датчик термоанемометра; 11 – термоанемометр; 12 – ПЭВМ; 13 – тепловизор и видеокамера

Визуализация течений в моделях ПВТ

Визуализация течений осуществлена в гидравлической модели ПВТ с помощью микропузырьков воздуха с подачей последнего в поток на входе в центробежный насос. За счет «подсветки» лазерным излучением («лазерный нож») и с помощью видеотехники фиксировалась структура течения в заданном сечении камеры горения и камеры охлаждения. Также использовалась при визуализации течения подкраска жидкости. Применялся на воздушной модели ультрадисперсный порошок (рис. 2).



Рис. 2. Визуализация течения в модели ПВТ с помощью ультрадисперсного порошков

В результате визуализации выявлены «аномальные» свойства закрученных потоков в модели ПВТ: вторичные течения, прецессирующее вихревое ядро, наличие «рециркуляционных» (противопоточных) зон, эффект Коанда (прилипание струй к одному из топочных экранов) и др.

Термоанемометрические измерения

Исследование аэродинамических характеристик ВТ с помощью термоанемометра проведено на стенде (рис. 1). Длина модели (размер по z-координате) составляла 32 см, диаметр 30 см. Воздух в модель подводился через две горелочные амбразуры, симметрично расположенные в модели; расстояние по z-координате от передней стенки до первого сопла составляло 4 см. Размеры сопел (см): 5,2 (по вертикали), 4 (по горизонтали); угол наклона сопла к горизонтали $\gamma=15^\circ$. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру модели, составляло 10^6 . Термоанемометрические измерения (ТА) проводились по горизонтальной прямой вдоль оси, лежащей по вертикальной плоскости, проходящей через середину сопла. Среднерасходная скорость воздуха через сопла составляла до 50 м/с. В работе использовались: датчики с прямой и наклонной нитью длиной 1,5 мм и диаметром 7 мкм. Тарировка и определение коэффициентов чувствительности датчиков выполнялись на тарировочном сопле; скорость течения воздуха через сопло измерялась с помощью трубки Пито–Прандтля.

Проведена совместно с А.В. Кейно [7] оригинальная модификация ТА-метода измерений с прямым и наклонным датчиками, суть которой состоит в раздельном определении касательных компонент тензора напряжений по данным четырех измерений пульсационной компоненты сигнала датчиком с прямой нитью (т. е. с нитью, перпендикулярной оси вращения датчика) при двух известных компонентах скорости. Измерение остальных четырех компонент тензора турбулентных напряжений осуществляется по данным найденной пульсационной компоненты для датчиков с прямой и наклонной нитью. Проведение измерений по вышеописанной методике не налагает требований малости одной или двух компонент средней скорости.

сти по отношению к третьей, т. е. позволяет при измерениях ограничиваться поворотами датчиков термоанемометра только в одной плоскости и допускает при выполнении вышеуказанных условий определять компоненты тензора турбулентных напряжений с хорошей точностью.

Измерения показывают (рис. 3), что осевая компонента скорости трижды меняет знак. Отрицательное значение можно объяснить тем, что входная струя в этом сечении продолжает равномерно распределяться в осевом направлении. Максимумы осевой компоненты скорости на периферии, отрицательный минимум в центре вихря образуются вследствие протекания воздуха в области пограничного слоя на торцевой стенке из зоны повышенного давления на периферии в зону пониженного давления в центре вихря. Радиальная компонента скорости в левой части продольного сечения модели имеет положительную направленность к боковой стенке, что, по-видимому, также связано с перераспределением входной струи в радиальном направлении. В правой части диаметра сечения модели радиальная компонента скорости направлена от стенки, вследствие обтекания потоком выступа на выходе из вихревой зоны.

На рис. 4 представлены данные измерений турбулентных характеристик течения на модели ВТ.

Уровень кинетической энергии турбулентности имеет максимум у левой стенки модели, что, с большой вероятностью, вызвано «размыванием» входной струи, создающей закрутку потока. По направлению к правой стенке интенсивность кинетической энергии турбулентности уменьшается. Такая быстрая ламинаризация течения вызвана, по-видимому, положительным градиентом давления, возникающим при течении вдоль вогнутой стенки. Локальный максимум кинетической энергии турбулентности в приосевой зоне может указывать на наличие пульсаций вихревого ядра в этой области. Экспериментальные данные показы-

вают значительную анизотропию всех аэродинамических характеристик, в частности, как самих напряжений Рейнольдса, так и их пространственных распределений.

Измеренные профили компонент скоростей и соответствующих пульсационных составляющих позволяют сделать следующие выводы:

- средняя составляющая азимутальной компоненты скорости имеет максимум напротив выхода горелки, а профиль пульсационной компоненты скорости при том же положении имеет минимум, что позволяет сделать вывод о струйном характере истечения воздуха из горелки;
- при разных числах Рейнольдса видно, что течение автомодельным не является;
- помимо преимущественно азимутального движения на периферии наблюдается циркуляция вдоль оси камеры сгорания;
- профиль азимутальной компоненты скорости в камере горения является устойчивым и близким к осесимметричному;
- профиль тангенциальной компоненты скорости представляет собой потенциальный вихрь;
- профили радиальной и осевой компонент скорости имеют сложную структуру, что связано с перераспределением входной струи в радиальном направлении и осевой рециркуляцией потока;
- на выходе потока из вихревой зоны происходит его быстрая ламинаризация;
- относительная величина максимума зависит как от среднерасходной скорости через горелки, так и от относительной ширины горелок, причем «дальнобойность» струи увеличивается с увеличением среднерасходной скорости; максимум средней скорости сопровождается максимумами пульсационных компонент скорости, что указывает на интенсивное турбулентное перемешивание по краям струи, и менее интенсивное в центре;

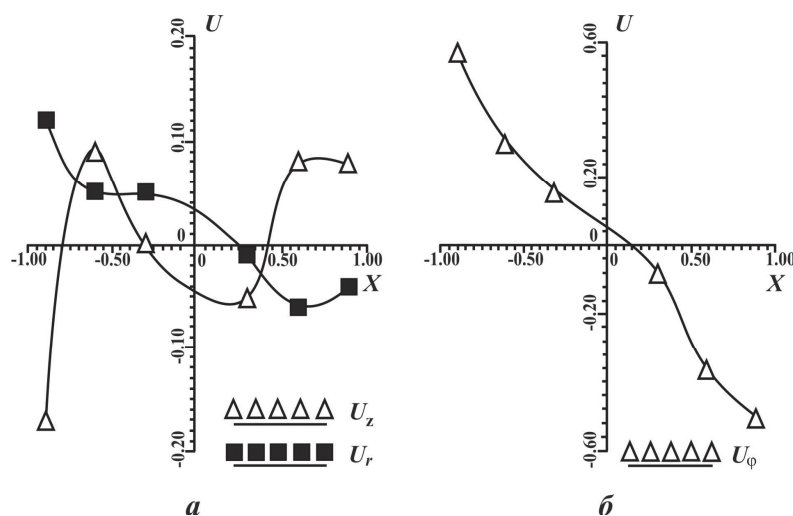


Рис. 3. Экспериментальные профили радиальной, осевой и тангенциальной компонент скорости при входной скорости потока 50 м/с. а) профили радиального и осевого компонента скорости; б) профиль тангенциального компонента скорости

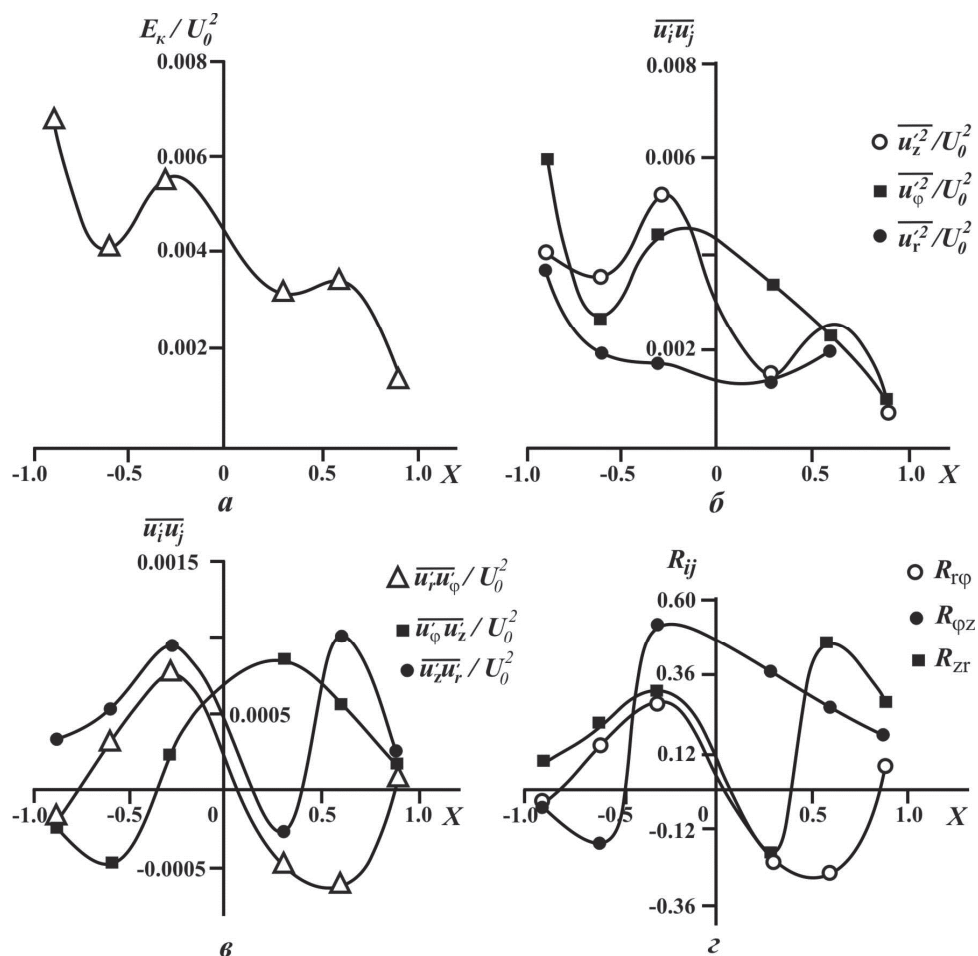


Рис. 4. Распределение кинетической энергии турбулентности (а), нормальных (б), касательных (в) напряжений и корреляционных коэффициентов (г)

- аэродинамика вихревой части топки Н.В. Голованова устойчива; профили окружной компоненты скорости слабо меняются при изменении среднерасходной скорости воздуха в пределах 15–175 м/с, $Re=10^5-10^6$ и при изменении безразмерной ширины горелок (отношение ширины к диаметру камеры) в пределах 0,20...0,33;
- относительно высокий коэффициент сохранения окружной скорости, равный 0,76, создает условия для интенсивного перемешивания по всему объему топки;
- течение в диффузорной части носит «перчаточный» характер; вынос происходит в плоскости симметрии между амбразурами горелок;
- в камере охлаждения в зависимости от режимных параметров формируется сложное пространственное движение; в большинстве исследованных режимов поток существенно неравномерен как по длине, так и по высоте.

На фронтальной стенке имеется область возвратных токов. Ассиметричная картина течения приводит к значительной неравномерности поля течения. В камере охлаждения имеются области, где скорости по абсолютной величине в несколько раз превышают среднерасходную. По по-

перечному сечению камеры охлаждения присутствуют как вертикальные, так и горизонтальные вихри.

Из вышеперечисленных особенностей турбулентной аэродинамики вихревой топki ЦКТИ можно сделать следующие выводы.

1. Область зажигания определяется главным образом дальностью струи и аэродинамическим режимом. Следовательно, изменяя положение области зажигания, можно обеспечить требуемый прогрев топлива и выход летучих до его зажигания, что уменьшает уровень выбросов топливных NO_x .
2. Большая окружная компонента скорости на периферии камеры сгорания создаёт вынос горячего на стенки, вследствие чего горение происходит в основном в пристеночной области, что исключает локальные максимумы температуры. Это, как известно, приводит к уменьшению выбросов «термических» NO_x .
3. Хорошее перемешивание во всем объеме камеры сгорания, являющееся следствием высокого среднего уровня турбулентных пульсаций, позволяет сжигать низкокачественный уголь при низких коэффициентах избытка воздуха.

Указанные особенности аэродинамики турбулентного потока в вихревой топке необходимо учитывать при проектировании топков данного класса.

Тепловизионные измерения

Блок-схема эксперимента представлена также на рис. 1 Лицевая стенка вихревой камеры модели топки изготовлена из стали 12Х18Н10Т толщиной 1,5 мм и зачернена снаружи порошком от копировального аппарата, разведенным клеем 88. Спутный поток воздуха, нагретого до 100 °С, смешивается с основным потоком на последнем прямолинейном участке впускного трубопровода.

Тепловизионная система ТВ-М может устанавливаться в двух положениях: напротив стенки модели; либо сверху так, что объектив направляется на сетку внутри модели через прорезь в стенке. В последнем случае внутри модели располагается сетка из нержавеющей стали перпендикулярно оси объектива на высоте интересующего нас сечения потока. Замену стенок и прорези приходится делать из-за непрозрачности оргстекла в диапазоне длин волн больше 1 мкм.

Калибровка тепловизионной системы осуществляется по термоклину. В экспериментах получено множество термограмм лицевой стенки и сетки, установленной в наиболее интересующей нас части модели, – горловине. Условия экспериментов отличались скоростью основного потока. В результате экспериментов установлена количественная связь между соответствующей скоростью и температурой поверхности стенки или сетки, определяемой по термограмме. Следует подчеркнуть, что тепловизионный метод исследования аэродинамики сложных пространственных течений применен впервые.

В итоге [8] предложен и реализован панорамный тепловизионный метод, состоящий в том, что к основному потоку подмешивается горячий воздух, а с торцевой стенки модели из оргстекла, замененного на сталь, снимается термограмма. Для определения поля скоростей в произвольных сечениях потока используется металлическая сетка. Распределение температур на ИК-изображениях стенки и сетки качественно совпало с предполагаемым распределением скоростей потока.

Численное моделирование топочных процессов в парогенераторах с вихревой топкой

Совместно с Д.В. Красинским, А.Д. Рычковым [9] предложена пространственная математическая модель топочных процессов, включающая процессы течения, теплообмена, горения, теплового излучения, генерацию оксида азота. Результаты вычислительного эксперимента для вихревой топки показали, что предложенная модель успешно объясняет экспериментальные наблюдения. Сконструирована система уравнений химически реагирующего турбулентного газодисперсного течения, записанная в тензорном виде в форме законов сохранения массы, количества движения, энтальпии

и концентрации компонентов для обеих фаз в соответствии с эйлеровым двухскоростным и двухтемпературным описанием.

Принимается модель течения монодисперсной газовой смеси, когда угольные частицы в процессе химических превращений считаются твердыми сферами постоянного размера в соответствии с гипотезой жесткого «золотого каркаса». Скорости химических реакций и их тепловые эффекты описываются через источниковые члены в правых частях соответствующих уравнений. Система замыкается уравнениями переноса плотности энергии излучения и модифицированной k - ε моделью турбулентности (вместе с уравнением переноса k_{is} для дисперсной фазы), а также выражениями для коэффициентов межфазного взаимодействия, коэффициентов турбулентного и диффузионного переноса и других параметров. В выражении для времени релаксации частиц учтены изменения плотности частиц при выгорании и зависимость вязкости от температуры, а также поправка на стесненность обтекания частиц. Описана постановка граничных условий. Для определения k , ε и турбулентного теплового потока на стенках вихревой камеры используется метод пристеночных функций; для уравнения переноса радиационной энергии – известные граничные условия Маршака. При этом плотность частицы уменьшается при снижении ее массы в процессе выхода летучих и конверсии углерода. Для осреднения нестационарных пространственных уравнений переноса импульса, энергии, концентраций компонентов используется метод Фавра для несущего газа, а для дисперсной фазы – кинетические уравнения для функции распределения плотности вероятности скорости и температуры частиц в турбулентном потоке. Далее для расчетов используется комплексная модель пространственного турбулентного течения с горением распыленного угля, построенная на базе рассмотренных выше частных моделей. Состав газовой фазы представляется в виде компонентов O_2 , CH_4 , CO_2 , H_2O , N_2 , энтальпия и теплоемкость которых вычисляются как полиномы от температуры газа. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии находятся по эмпирическим степенным зависимостям от температуры. На входе в топку уголь считается подсушенным; содержание золы в частицах в топочном процессе полагается постоянным. Принимается, что в процессе термической деструкции угля летучие уходят в газовую фазу в виде паров CH_4 , CO_2 , и H_2O , при этом массовые доли этих компонентов определяются через заданные содержания кислорода, водорода и углерода летучих в исходном топливе.

Рассмотрены физические представления и математические модели для описания всех характерных явлений физико-химического реагирования и теплообмена при горении пылеугольного топлива. Прежде всего, разработаны модели процессов горения частиц натурального твердого топлива. Охарактеризован состав угля и определяющие

стадии его превращений при горении: пиролиз и выход летучих веществ, газофазное сгорание углеводорода летучих, реагирование твердого углерода кокса с газовыми компонентами. Стадийность этих процессов, которые описываются на уровне брутто-реакций, обеспечивается в уравнениях сохранения массы и энергии автоматически ввиду зависимости скорости каждого процесса от температуры и концентрации реагентов. Для описания скорости гетерогенного горения углерода привлекаются результаты диффузионно-кинетической теории, разработанной в трудах Л.Н. Хитрина, А.С. Предводителя и др. Динамика пиролиза летучих также описывается на основе диффузно-кинетических соотношений. Для выражения скорости газофазного сгорания выделившегося углеводорода используется модель дробления турбулентных вихрей. Также рассмотрены модели переноса излучения в топочной среде, которая считается оптически серой. Принят диффузионный метод (P_1 – приближение метода сферических гармоник) для излучающей, поглощающей и рассеивающей двухтемпературной среды. При этом коэффициенты поглощения в газовой фазе (учет вклада трехатомных газов) вычисляются по соотношениям модели взвешенной суммы серых газов, а для определения коэффициентов поглощения и рассеяния в дисперсной фазе используется асимптотическое приближение теории Ми для оптически крупных шероховатых частиц.

Проведено моделирование образования окислов азота, что необходимо для численной оценки экологических характеристик топочного процесса. Приведена достаточно подробная и вместе с тем компактная модель, основанная на распространенной брутто-схеме Митчелла–Тэрбелла [10], в которой учтены как «термические» механизмы образования NO_x по Я.Б. Зельдовичу, так и «топливные» с привлечением схемы «четырёх центров» Гейнса (HCN , NH_3 , NO , N_2) [11].

Результаты компьютерного моделирования топочных процессов в парогенераторах с вихревой топкой

Для рассматриваемого класса задач о трехмерных течениях с малыми дозвуковыми скоростями широкое распространение получили методы типа SIMPLE [12] – полунейного метода для связанных через давление уравнений, предложенного Патанкаром и Сполдингом. Установление решения достигается в ходе глобальных итераций, на каждой уравнения решаются отдельно одно от другого, что упрощает применение методов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Проведена конечно-разностная аппроксимация уравнений переноса в SIMPLE, основанная на методе контрольных объемов с использованием шахматной сетки, в которой узлы для компоненты скорости сдвинуты относительно основных узлов для скалярных величин. При построении декартовой сетки возле криволинейной границы узлы для

компонент располагаются непосредственно на стенках, а центр контрольного объема лежит внутри области. При аппроксимации конвективных и диффузионных членов уравнений используется модификация противоточной схемы – схема «пятой степени» Патанкара. Достоинствами схемы является безусловная устойчивость и потому хорошая сходимость решения, а также простота реализации.

При построении разностных аналогов учитывается условие неотрицательности источников членов. Предложено использовать модификацию известного алгоритма SIMPLE, в которой шаг по времени выбирается постоянным. Эта модификация распространена, по-видимому, на случай течения с учетом переменной плотности и химического реагирования, когда в уравнении неразрывности необходимо учитывать член $\partial \rho / \partial t$ и источниковый член межфазного массообмена. Приведена постановка граничных условий для уравнения для поправок к давлению, при этом значения ∇p на открытой границе (выходе) определяются из условия интегрального по всему объему баланса расхода. Предложенный вариант алгоритма обеспечивает надежную сходимость глобальных итераций метода и не требует введения параметров нижней релаксации. Рассмотрены алгоритмы решения разностных уравнений эллиптического типа (это уравнение для поправок к давлению в алгоритмах типа SIMPLE, уравнение для плотности энергии излучения) на основе метода неполной факторизации Н.И. Булеева, являющегося высокоэффективным алгоритмом итеративного решения СЛАУ большой размерности. Для ускорения сходимости методов неполной факторизации в данной работе предложено использовать метод сопряженных невязок, который обладает свойством монотонности и дает несколько более высокую скорость сходимости на начальном участке итераций, что важно при реализации алгоритма в общем контексте метода установления типа SIMPLE. Приведен вывод расчетных формул такого алгоритма на основе обобщенного метода сопряженных направлений по А.А. Самарскому, выведен критерий остановки итерационного процесса. Таким образом, использованное в работе сочетание метода сопряженных минимальных невязок с предобуславливающим явным методом неполной факторизации Булеева обеспечило высокую эффективность решения разностных уравнений Пуассона, что позволило существенно сократить время счета в целом.

Из результатов моделирования аэродинамики однофазного течения в ВТ в изотермической постановке следует, что негативный эффект Коанда исчезает при относительной ширине горловины диффузора, равной 0,4. Из анализа полей скорости следует, что закрученный поток в камере горения имеет в общем устойчивую и существенно пространственную структуру со значительным изменением положения центра вихря по аксиальному направлению. Характерные распределения основ-

ных аэродинамических параметров: давления, компонент скорости, турбулентной вязкости, свидетельствуют о сложном, существенно трехмерном характере аэродинамики ВТ.

Выполнено также моделирование двухфазного монодисперсного течения в ВТ в изотермической постановке. Рассматривались частицы диаметром: 40, 90, 200 мкм, при этом соответствующие числа Стокса следующие: $S_{ik}=\{0,02, 0,101, 0,5\}$. В случае более инерционных частиц ~200 мкм наблюдается их скопление вблизи стенок камеры под действием центробежных сил. Эффект накопления частиц приводит к существенному повышению давления в нижней части камеры горения ВТ. Для менее инерционных частиц порядка 90 мкм этот эффект мало заметен, а в случае $S_{ik} \ll 1$ частицы полностью следуют за несущим газом, что подтверждено в расчетах для 40 мкм.

Проведено также моделирование процессов сжигания распыленного угля Кузнецкого Г и Березовского Б в ВТ. Расчеты проводились для монодисперсных частиц размерами 40 и 90 мкм. При этом показано, что в реальной полидисперсной системе фракция 40 мкм может считаться «представительной» для характерной тонины помола угля $R_{90}=25\%$.

Основным аэродинамическим отличием течения с горением является эффект теплового расширения потока, приводящий к увеличению скорости течения из-за снижения плотности газа по уравнению состояния. Вместе с тем все качественные особенности аэродинамики ВТ (в т. ч. и структура течения) сохраняются и для течения с горением. Прогрев входной струи происходит в процессе ее взаимодействия с горячим закрученным потоком в камере горения и обуславливает интенсивные процессы выхода летучих из твердой фазы и сгорания углерода летучих. Как показали расчеты, на скорость выхода летучих для частиц размером 90 мкм и менее основную роль при $T < 10^3$ К оказывает кинетический режим реакции, а при $T > 10^3$ К становится важным диффузионный режим.

Из расчетов следует, что зона максимальных концентраций образующегося метана находится в струе сразу после зоны окончания выхода летучих из твердой фазы. Тепловыделение при сгорании метана в этой зоне способствует зажиганию углерода коксового остатка. Резкое возрастание температуры частиц на участке входной струи $x > 0,6$ свидетельствует о начале интенсивного горения углерода кокса при $T > 1500$ К. В этой области также существенно проявляется температурное скольжение фаз, достигающее $\Delta T \approx 1000$ К. В камере охлаждения температура потока падает, причем основным механизмом отвода тепла в экраны поверхности является, как показали расчеты, радиационный теплоперенос, при этом отмечена принципиальная важность учета механизма радиационного теплопереноса для адекватного моделирования топочных процессов в ВТ.

При этом отводимая экранными топочными поверхностями тепловая мощность при сжигании кузнецких углей составила до 15 % от мощности химического энерговыделения. Показано, что в целом температурная неравновесность фаз проявляется заметнее, чем скоростная.

Выгорание углерода в частицах 40 и 90 мкм протекает так, что конверсия углерода для 40 мкм почти полностью происходит в камере горения, в то время как более крупные частицы (90 мкм и выше) догорают еще и в диффузоре. Дана оценка значения механического недожога q_4 , которая для 90 мкм составляет $q_4 = 3,89\%$, в то время как для «представительной» фракции 40 мкм – $q_4 = 0,006\%$. Получены важные для оценки теплотехнических характеристик топочного процесса распределения температуры экранных поверхностей, падающего и воспринятого радиационных тепловых потоков и коэффициента тепловой эффективности экранов. Полученные в расчетах значения коэффициентов тепловой эффективности «чистых» топочных экранов хорошо соответствуют диапазону 0,39–0,48 его значений по опытным данным.

Представленная информация об аэродинамических и тепловых полях дополняется полями концентраций газовых компонентов. С целью оценки характеристик топочного процесса проведено моделирование образования оксидов азота в ВТ [13]. Как показали расчеты, основную роль в образовании NO_x играют реакции:

- 1) выхода азота летучих в виде HCN , его превращение в NH_3 и затем в NO («топливные» NO_x);
- 2) «термические» реакции диссоциации воздуха, дающие около 50 % NO_x из-за высокотемпературного режима в камере сжигания;
- 3) реакция поглощения NO на углероде коксовых частиц.

Полученные значения приведенной к NO_2 концентрации на выходе из ВТ составили: 310 мг/нм³ для кузнецкого и 402 мг/нм³ для березовского угля. Эти значения хорошо согласуются с уровнем $[\text{NO}_x] = 360$ мг/нм³ экспериментальных измерений. Таким образом, впервые для ВТ Н.В. Голованова численно исследована полная картина газодинамических и тепловых процессов в топочном объеме. При этом полученные значения основных теплотехнических и экологических характеристик ВТ соответствуют данным опытно-промышленных испытаний.

Выполненные комплексные исследования рабочих процессов в вихревой топке позволяют надежно конструировать высокоэффективные топки со сниженными выбросами окислов азота, летучей золы, бенз (а) пирена и др. На вновь проектируемых ТЭС использование котлоагрегатов с вихревой топкой позволяет значительно сокращать габариты главного корпуса и тем самым снижать капитало- вложения. При этом пылесистема создается в соответствии с требованиями вихревой технологии – она должна быть замкнутой. Эти требования не предполагают изменений самой схемы ТЭС и рабо-

чих параметров. Таким образом, для проектируемых ТЭС технология с вихревой топкой имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной технологией, и что важно для настоящего времени – она является менее затратной.

Результаты физического и математического моделирования, опытных сжиганий явились основой для выбора конструктивных и режимных параметров при создании новых котлов с вихревой топкой. Прежде всего, это данные по геометрии и размерам вихревой камеры, уровню рабочих температур, предельных скоростей, токсичных выбросов, интенсивностей смешения, теплонапряжений внутри топочного объема и на поверхностях нагрева и др. Выполненные комплексные исследования позволили выработать целый ряд научно-технических рекомендаций по конструированию:

- площадь выходного сечения диффузора должна составлять ~40 % диаметрального сечения камеры горения;
- углы скатов диффузора: ~20° переднего и заднего ~30°;
- сброс сушильного агента необходимо осуществлять через амбразуры, расположенные над основными горелками;
- угол наклона осей горелок ~15° к горизонту;
- отношение площади горелочных амбразур к площади диаметрального сечения ~5 %;
- отношение ширины одного модуля топочной камеры к её условному диаметру составляет 1,5.

Научные принципы малозатратной реконструкции функционирующих парогенераторов под вихревую технологию сжигания

При реконструкции функционирующих ТЭС установка ВТ требует, во-первых, доводки самого парогенератора (ПГ) и, во-вторых, возможной переделки пылесистемы.

Парогенератор БКЗ-320 на Новосибирской ТЭЦ-3 (НТЭЦ-3). Парогенераторы БКЗ-320 оборудованы топками с ЖШУ и рассчитаны на сжигание назаровского бурого угля с проектной зольностью 9 %. Главной проблемой при эксплуатации этих парогенераторов является интенсивное шлакование конвективных поверхностей, что в условиях малоэффективной работы систем их очистки приводит к снижению нагрузки котла до 260–280 т/ч. При поступлении на угольный склад непроектного топлива возникают также затруднения с выходом жидкого шлака.

Учитывая, что на ТЭЦ идет поставка большой гаммы непроектных топлив и что эта ситуация далее будет только усугубляться, возникла необходимость реконструкции парогенератора БКЗ-320 в плане выбора типа топочного и горелочного устройств с целями обеспечения надежной и экономичной работы котла при сжигании топлив практически любого качества с минимальными выбросами оксидов азота.

В работе предложен вариант реконструкции БКЗ-320 под вихревую технологию сжигания с использованием результатов физического и математического моделирования и опытно-промышленных испытаний ТПЕ-427 и корпуса Б котла П-49 как наиболее подкрепленный экспериментально-теоретическими данными и техническими решениями.

В проект реконструкции по варианту вихревой топки ЦКТИ с ЖШУ закладывается следующее:

- условный диаметр вихревой камеры принят 5,76 м (равен глубине топки БКЗ-320);
- ширина топочной камеры – 11,59 м по осям труб;
- углы раскрытия диффузора: переднего – 20°, заднего – 30°;
- площадь выходного сечения диффузора – 40 % от диаметрального сечения камеры горения;
- площадь горелочных амбразур – 5 % от площади наибольшего сечения вихревой камеры;
- устанавливается на фронтальной стенке восемь прямооточных горелок под углом 15° к горизонту;
- сброс сушильного агента осуществляется через специальный канал горелки в верхней ее части;
- пыль от бункера к горелкам подается по системе транспорта пыли высокой концентрации;
- принята замкнутая система пылеприготовления с газовой сушкой топлива и одной ступенью пылеотделения в циклоне;
- предусмотрены один двухсветный экран, а также 20 ширм, образующих перегреватель первой и второй ступени;
- для обеспечения безшлаковочной работы котла устанавливаются системы очистки:

Перечислим основные достоинства варианта реконструкции котла БКЗ-320 под вихревую технологию сжигания низкозольного березовского угля.

- За счет установки двухсветных экранов и ширм обеспечивается минимальная температура газов на выходе из топки 1067 °С и номинальная нагрузка 320 т/ч.
- При такой температуре выходных газов, как показали расчетные исследования и опытные сжигания на ТПЕ-427, обеспечивается безшлаковочный режим котла при нагрузке 320 т/ч. Последнее подтверждается опытом эксплуатации котла ТПЕ-427 на березовском угле, где была доказана длительная и надежная работа при существующих системах очистки на режимах до 360 т/ч. Стабилизация загрязнений при сжигании назаровского угля обеспечивалась при температуре газов на выходе до 1200 °С.
- Выбранный для тепловых расчетов коэффициент тепловой эффективности экранов 0,35 получен при работе ТПЕ-427 на березовском угле. Следует принять во внимание, что на ТПЕ-427 задняя поверхность топки, включая топочные ширмы, не имеет очистки. В случае реконструкции БКЗ-320 под ПВТ вся топочная каме-

ра будет подвержена очистке, что приведет к дополнительному положительному снижению температуры газов на выходе.

- Будет достигнута высокая степень выгорания, т. к. по опыту на ТПЕ-427 в диапазоне нагрузок 360–420 т/ч при оптимальном избытке воздуха в 1,15 она составила 98,5 %.
- Размещение сбросных сопел для сушильного агента выше основных горелок обеспечивает, как это было проверено на стендах ИТ СО РАН, надежное его догорание в камере охлаждения.
- Уровень теплонапряжений в камере горения – $0,78 \cdot 10^6$ Вт/м³, и в поперечном сечении – $3,69 \cdot 10^6$ Вт/м², как показал опыт эксплуатации ТПЕ-427, обеспечивает надежный режим жидкого шлакоудаления в диапазоне нагрузок 0,4...1,0 Дн. Последнее, как было подчеркнуто ранее, обусловлено управляемой аэродинамической структурой газовых потоков, расположением зоны максимальных температур в районе шлаковой лётки, режимом избирательной сепарации минеральных компонентов при шлакообразовании в ПВТ.
- Выбранные углы раскрытия диффузора (на основе наших «продувок», опыта эксплуатации котла П-49 Назаровской ГРЭС) обеспечивают отсутствие шлаковых загрязнений на экранных поверхностях диффузора.
- Гарантируются на реконструированном котле БКЗ-320 значения выбросов NO_x не хуже 240–300 мг/нм³, которые уже были достигнуты на котле ТПЕ-427 после замыкания пылесистемы при эксплуатационных избытках воздуха за водяным экономайзером 1,17...1,2. Обеспечение такого уровня NO_x достигается за счет двухступенчатого сжигания пыли с подачей части ее в приосевую зону камеры горения с избытками воздуха 0,8...0,9, а также применением пыли высокой концентрации.
- Использование существующего топливо-пыле-золо-оборудования без существенных переделок.
- Облегченная работа существующих электрофильтров за счет уменьшения потока летучей золы из-за увеличения коэффициента шлакоулавливания в топке до 50...60 %.

Вариант реконструкции функционирующего ПГ под вихревую технологию сжигания, как уже отмечалось, позволяет использовать как строительную часть котельной ячейки, так и существующие вспомогательные системы котельной установки. Это убедительно показывает рис. 5 по сопоставлению вариантов реконструкции котла БКЗ-320 НТЭЦ-3. Просматривалась замена топки этого котла с ЖШУ на ПВТ с ЖШУ и тангенциальную топку (ТТ) «Сибэнергомаш» с твердым шлакоудалением. Для достижения приемлемых значений мехнедожога при использовании ТТ не хватает высоты существующего здания, что требует заглубления низа топки и затрагивает систему гидрозолаудаления. К тому же невозможно использовать

существующее топливо-пылеприготовительное оборудование без технических переделок. Работа электрофильтров серьезно осложняется из-за увеличения потока летучей золы за счет снижения коэффициента шлакоулавливания. Более низкие температуры в ТТ ухудшают надежность и экономичность сжигания низкорекреационных углей. Возникает малая устойчивость вихревого движения в ТТ при отключении хотя бы одной горелки (эффекты прецессии вихревого ядра, Коанда).

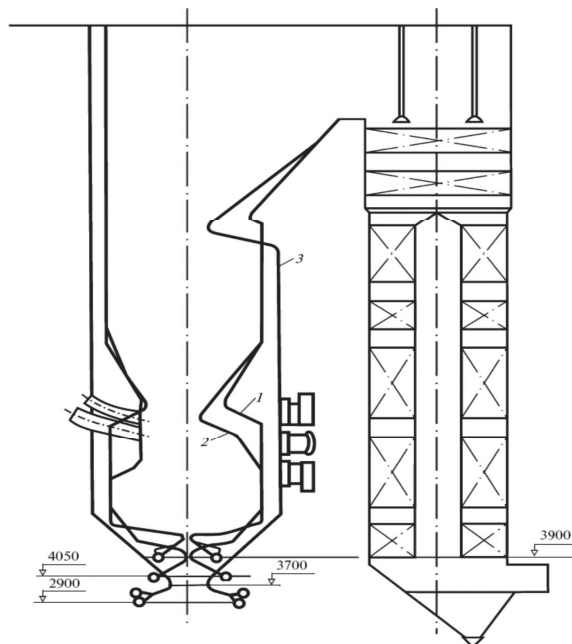


Рис. 5. Сопоставление вариантов реконструкции котла БКЗ-320 на вихревую топку ЦКТИ и тангенциальную топку («Сибэнергомаш»): 1 – БКЗ-320; 2 – вихревая топка ЦКТИ; 3 – тангенциальная топка («Сибэнергомаш»)

По этим причинам вариант реконструкции топки БКЗ-320 НТЭЦ-3 на ПВТ является предпочтительным.

Парогенератор ТП-87 Новокемеровской ТЭЦ (НКТЭЦ). Решение проблемы реконструкции парогенератора ТП-87 имеет большое значение, т. к. находящийся в эксплуатации в настоящее время парогенератор не удовлетворяет существующим санитарным нормам по выбросам окислов азота. Помимо неудовлетворительных экологических показателей ТП-87 (концентрация выбросов окислов азота более 1000 мг/м³), другой стороной проблемы является необходимость сжигания в одном и том же топочном устройстве различных по теплофизическим характеристикам видов кузнецких углей, что является сложной эксплуатационной задачей. Поэтому целью реконструкции является как существенное улучшение экологических характеристик, так и обеспечение возможности экономичного сжигания широкой гаммы различных по свойствам кузнецких углей. Поставленная задача, по нашим обоснованиям, может быть решена с наименьшими затратами путем замены топки ПГ ТП-87 на вихревую топку. В пользу этого варианта

говорит большой положительный опыт эксплуатации ВТ на ряде электростанций, в том числе Новосибирской ТЭЦ-3 и Назаровской ГРЭС, показавший достаточно высокие экологические и экономические характеристики, а также возможность сжигания широкой гаммы углей. Кроме того, данный вариант реконструкции использует имеющуюся на ПГ ТП-87 систему жидкого шлакоудаления и позволяет удачно вписаться в имеющиеся габариты реконструируемого ПГ.

Рассмотрим достоинства варианта реконструкции с использованием вихревой топки:

- обеспечение малых выбросов окислов азота за счёт управляемой аэродинамики и процесса горения; так, при сжигании берёзовского угля с тугоплавкой золой в котлах П-49 корп. 7Б и ТПЕ-427, модернизированных на ВТ с разомкнутой пылесистемой без применения каких-либо средств подавления NO_x , достигнуто содержание $\text{NO}_x = 400\text{--}500 \text{ мг/м}^3$; а после замыкания пылесистемы на котле ТПЕ-427 и применения двухступенчатого сжигания топлива при нагрузках 250–280 т/ч уровень NO_x составил 240–300 мг/м^3 , в то время как на соседних котлах с ЖШУ БКЗ-320–140ПТ при таких же нагрузках содержание NO_x было 500–600 мг/м^3 ;
- надёжный выход жидкого шлака на ПВТ связан с управляемой аэродинамической структурой газовых потоков при изменении нагрузки и качества топлива, расположением зоны максимальных температур в районе шлаковой лётки;
- возможность высокотемпературного, более экономичного, по сравнению с низкотемпературной тангенциальной топкой с СШУ, сжигания низкорекреационных (особенно сибиргинских) кузнецких углей, когда даже значительного утонения помола недостаточно и дополнительно требуется более высокотемпературное сжигание;
- устойчивость вихревого движения в камере горения сохраняется при отключении даже двух горелок;
- возможность обеспечения в камере горения зон с избытком ($\alpha > 1$) и недостатком ($\alpha < 1$) воздуха;
- возможность секционирования топочного объёма, что позволяет эффективно управлять процессом горения;
- возможность использования существующего топливо-пылеприготовительного оборудования без существенных переделок;
- фронтальное расположение горелок и сбросных сопел значительно упростит компоновку воздушного тракта, пылепроводов сброса и ПВК, обеспечит удобство в обслуживании и ремонте;
- малые габариты ПВТ обеспечат значительную экономию котельного металла, работающего под давлением, и позволят удачно вписаться в существующие габариты каркаса реконструируемого ПГ ТП-87;
- существенно облегченные условия работы применяемых электрофильтров за счёт увеличения коэффициента шлакоулавливания в ВТ;

- возможность применения существующей системы гидрозолошлакоудаления;
- возможность использования систем очистки поверхностей нагрева от отложений;
- эффективное применение газоплотных экранных панелей;
- допустимый уровень эрозийного износа котельного металла;
- реализация системы подачи пыли высокой концентрации (ПВК);
- возможность использования золы и шлака, прошедших высокотемпературную обработку, в качестве материала с потребительскими свойствами.

При всех указанных выше достоинствах данного варианта реконструкции следует особо подчеркнуть, что вариант с ПВТ имеет длительный опыт эксплуатации на бурых углях КАБа, т. е. ВТ является отработанным топочным устройством, обеспечивающим надёжное сжигание широкой гаммы углей КАБа, в том числе и берёзовского угля с тугоплавкой золой.

Укажем недостатки варианта реконструкции с использованием ПВТ:

- необходимость установки двухсветных экранов в камере охлаждения;
- усложнённые условия работы опускных шпирм и двухсветных экранов при их размещении в камере горения;
- недостаточная тепловая эффективность поверхностей нагрева верхнего, со стороны фронта, угла камеры охлаждения;
- наличие возвратных течений на заднем экране при нерасчётных режимах работы ПВТ, что приводит к зашлаковыванию в этих локальных местах.

Выполнен предпроектный позонный тепловой расчет топочной камеры котла ТП-87 в исходном и реконструированном под вихревую камеру горения вариантах. Часть результатов этого расчета приведена на рис. 6. Топливом для котла является: промпродукт обогатительных фабрик Пр Пр, кузнецкий Т и СС2. Температура на выходе газов из топки с ВТ 1150 °С близка к регламентному значению, а на нижнем срезе шпирм она достигает 1225 °С. Оптимальной тониной помола угольной пыли для котла с ВК считается: для Пр Пр и СС2 $R_{90} = 12\text{--}15 \%$, для марки Т – $R_{90} = 5\text{--}6 \%$.

Ожидаемый уровень NO_x реконструированного ТП-87 под ВТ на номинальной нагрузке составит менее 0,5 г/м^3 ($\alpha_T = 1,4$) по сравнению с 1,1 г/м^3 в существующем котле.

Коэффициент тепловой эффективности экранов в топке составляет ~0,3, а двухсветных ~0,35.

Таким образом, по варианту реконструкции котла ТП-87 на ВТ имеется развитая научная база, положительный опыт освоения ВТ на ряде угольных парогенераторов, а также возможность «вписаться» в имеющиеся габариты котла ТП-87 с использованием уже существующей системы ЖШУ и пылеприготовления с обеспечением экологических, технико-экономических и других показателей

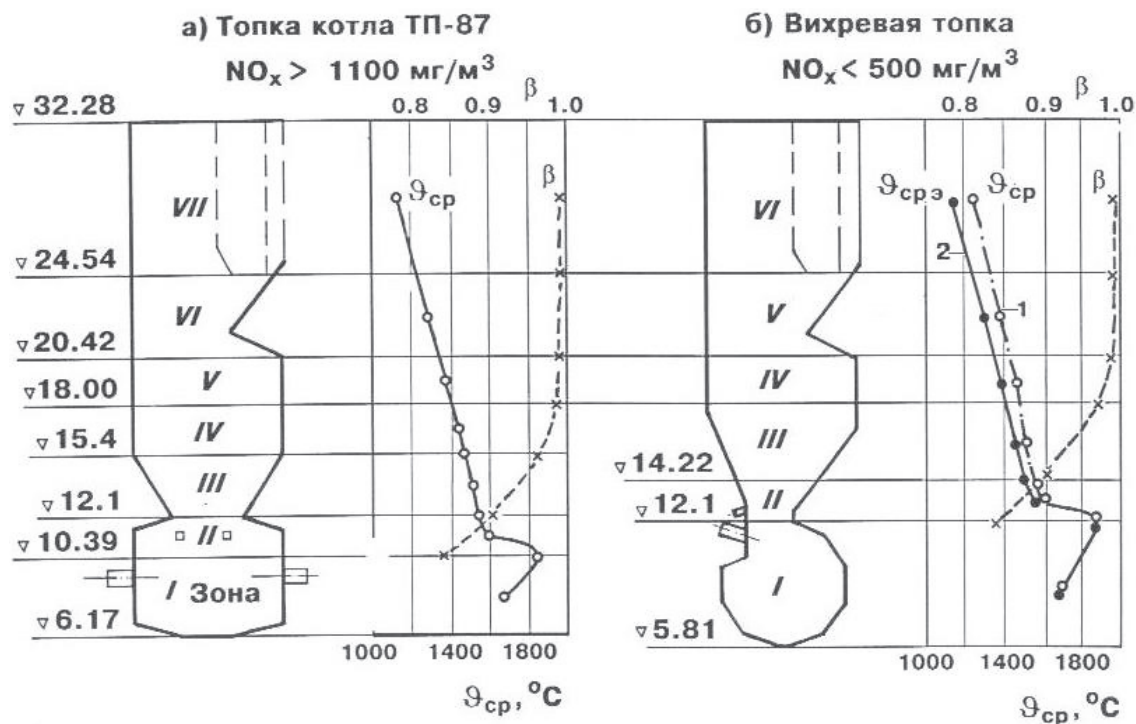


Рис. 6. Распределение температуры газов $\Theta_{ср}$ и степени выгорания пылеугольных частиц β по высоте топки котла ТП-87: а) существующий вариант; б) вариант реконструкции под вихревую топку; 1 – топка без двухсветных экранов; 2 – топка с двухсветными экранами

Закключение

1. Подведен некоторый итог выполненным к настоящему времени исследованиям и разработкам автора совместно с коллегами из ИТ СО РАН, ИВТ СО РАН, а также с сотрудниками НПО ЦКТИ, ТПУ и специалистами НТЭЦ-3, НКТЭЦ, аспирантами и магистрантами по сжиганию низкосортных топлив в парогенераторах вихревого типа.
2. Выполнен комплекс экспериментальных и компьютерных исследований рабочих процессов в парогенераторе с вихревой топкой Н.В. Голованова, на базе которого обоснованы и оптимизированы его конструктивно-компоновочные и режимно-экологические параметры,

удовлетворяющие современным требованиям энергетики.

3. К настоящему времени создана развитая научная база для реконструкции функционирующих парогенераторов под вихревую технологию сжигания низкосортных канско-ачинских и кузнецких углей. Рассмотрены проекты реконструкции парогенераторов БКЗ-320 и ТП-87 с применением вихревой топки.
4. Парогенератор с вихревой технологией сжигания с улучшенными экологическими, весогабаритными, маневренными, технико-экономическими и другими характеристиками успешно вписывается в состав экологически чистой ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голованов Н.В. Малогабаритные парогенераторы с вихревой топкой ЦКТИ. Особенности конструкции и эксплуатации. Перспективы применения // Труды ЦКТИ. – Л.: ЦКТИ, 1978. – Вып. 154. – С. 3–13.
2. Голованов Н.В., Митор В.В. Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ // Труды ЦКТИ. – Л.: ЦКТИ, 1975. – Вып. 132. – С. 3–14.
3. Ицковский М.А. Создание и освоение опытно-промышленных и серийных котлов с вихревыми топками // Труды ЦКТИ. – Л.: ЦКТИ, 2002. – Вып. 159. – С. 127–138.
4. Заворин А.С. Состав и термические свойства минеральной части бурых углей. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1997. – 187 с.
5. Билджер Р.В. Турбулентные течения предварительно перемешанных реагентов // Турбулентные течения реагирующих

газов / под ред. П.А. Либби, Ф.А. Вильямса. – М.: Мир, 1983. – 328 с.

6. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 853 с.
7. Keyno A.V., Salomatov V.V. Not-wire measurements in three-dimensional turbulent flows with the probe rotated in one plane // Thermophysics and Aeromechanics. – 1997. – V. 4. – № 1. – P. 17–24.
8. Пахомов Л.М., Саломатов В.В. Тепловизионный метод визуализации течений в моделях экологически чистых парогенераторов // Оптика в экологии: Тезисы докладов Междунар. конф. – СПб., 1997. – С. 71–73.
9. Красинский Д.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В. Математическое моделирование трехмерного турбулентного течения в вихревой топке парогенератора // Вычислительные технологии. – 1995. – Т. 4. – № 12. – С. 189–198.

10. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // *AIChE J.* – 1982. – V. 28. – № 2. – P. 302–311.
11. Haynes B.S. The oxidation of hydrogen cyanide in fuel-rich flames // *Combustion and Flames.* – 1977. – V. 28. – № 2. – P. 113–121.
12. Experimental modelling and numerical simulation of Vortex Furnace Aerodynamics Processes / A.V. Keyno, D.V. Krasinsky, A.D. Rychkov, V.V. Salomatov // *R.J. Engineering Thermophysics.* – 1995. – V. 5. – № 4. – P. 12–30.
13. Красинский Д.В., Саломатов В.В. Численное моделирование процессов факельного сжигания пылеугольного топлива и образования NO_x в вихревой топке // *Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность.* – Новосибирск: НГТУ, 2000. – Вып. 4. – С. 24–36.

Поступила 20.02.2014 г.

UDC 621.311

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF DEVELOPMENT AND LOW-COST RECONSTRUCTION OF COAL STEAM GENERATORS FOR VORTEX COMBUSTION TECHNOLOGY

Vladimir V. Salomatov,

Dr. Sc., Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev avenue, 1. E-mail: vvs@itp.nsc.ru

The author has summed up the results of experimental and numerical simulation of vortex combustion processes and emission of toxic discharge at combustion of low-grade coal, in particular, in the steam generator with a vortex furnace of N.V. Golovanov from scientific-production association CKTI, with which IT SB RAS has long scientific cooperation. The study of turbulent aerodynamics of the vortex furnaces with the use of physical and mathematical models made it possible to determine their main dimension and assembling relations, and simulation of radiant heat transfer, fuel combustion, and chemical kinetics of toxic emission formation was the basic information for determining their energy and ecological parameters. A set of modern level research work resulted in recommendations for further improvement of design and operation characteristics of the steam generator with a vortex furnace on Berezhovsk coals of Kansk-Achinsk deposit, and formed the basis for the projects of TP-87 boiler reconstruction at Novokuznetsk TPP on Kuznetsk coals and BKZ-320 (Barnaul Boiler Plant) and Novosibirsk TPP-3 on Berezhovsk coals.

Key words:

Power engineering, coal steam generator, ecology, reconstruction, vortex furnace, turbulent aerodynamics, heat and mass transfer, heat radiation, toxic emissions.

REFERENCES

1. Golovanov N.V. Malogabaritnye parogeneratory s vikhreвой topkoy TsKTI Osobennosti konstruktssii i ekspluatatsii. Perspektivy primeneniya [Compact steam generators with vortex furnace of CKTI. The features of construction and operation. Application prospects]. *Proceedings of TsKTI.* Leningrad, 1978, vol. 154, pp. 3–13.
2. Golovanov N.V., Mitor V.V. Osvoenie i issledovanie glavnykh malogabaritnykh parogeneratorov s vikhreвой topkoy TsKTI [Development and investigation of the head compact steam generators with vortex furnace of CKTI]. *Proceedings of TsKTI.* Leningrad, 1975, vol. 132, pp. 3–14.
3. Itskovsky M.A. Sozdanie i osvoenie opytно-promyshlennykh i seriynykh kotlov s vikhrevymi topkami [Design and development of experimental-industrial and serial boilers with vortex furnaces]. *Proceedings of TsKTI.* Leningrad, 2002, vol. 159, pp. 127–138.
4. Zavorin A.S. Sostav i termicheskie svoystva mineralnoy chaste burykh ugley [Composition and thermal properties of the mineral part of brown coals]. Novosibirsk, IT SB RAS, 1997. 187 p.
5. Bilger R.W. Turbulentnye tekhnika predvaritelno nepere-meshannykh reagentov [Turbulent Flows with Nonpremixed Reactants]. *Turbulentnye tekhnika reagiruyushchikh gazov* [Turbulent Reacting Flows]. Ed. by P.A. Libby, F.A. Williams. Moscow, Mir, 1983. 328 p.
6. Salomatov V.V. Prirodookhrannye tekhnologii na teplovyykh i atomnykh elektrostantsiyakh [Environmental technologies for thermal and nuclear power plants]. Novosibirsk, NSTU, 2006. 853 p.
7. Keyno A.V., Salomatov V.V. Not-wire measurements in three-dimensional turbulent flows with the probe rotated in one plane. *Thermophysics and Aeromechanics*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 17–24.
8. Pakhomov L.M., Salomatov V.V. Teplovizionnyy metod vizualizatsii tekheny v modelyakh ekologicheskii chistykh parogeneratorov [The method of thermal visualization in models of environmentally clean steam generators]. *Optika v ekologii. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. International Conference. Optics in Ecology]. St. Petersburg, 1997, pp. 71–73.
9. Krasinsky D.V., Rychkov A.D., Salomatov V.V. Matematicheskoe modelirovanie trekhmernogo turbulentnogo tekheniya [Mathematical simulation of 3D turbulent flow in a vortex furnace of steam generator]. *Vychislitel'naya tekhnologiya – Computational Technologies*, 1995, vol. 4, no. 12, pp. 189–198.
10. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion. *AIChE J.*, 1982, vol. 28, no 2, pp. 302–311.
11. Haynes B.S. The oxidation of hydrogen cyanide in fuel-rich flames. *Combustion and Flames*, 1977, vol. 28, no. 2, pp. 113–121.
12. Keyno A.V., Krasinsky D.V., Rychkov A.D., Salomatov V.V. Experimental modelling and numerical simulation of Vortex Furnace Aerodynamics Processes. *R.J. Engineering Thermophysics*, 1995, vol. 5, no. 4, pp. 12–30.
13. Krasinsky D.V., Salomatov V.V. Chislennoe modelirovanie protsessov fakelnogo szhiganiya pyleugolnogo topliva i obrazovaniya NO_x v vikhreвой topke [Numerical simulation of the processes of flame combustion of coal-dust fuel and NO_x formation in a vortex furnace]. *Teploenergetika. Fiziko-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy, novye tekhnologii, tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost* [Thermal Engineering. Physical-Technical and Ecological Problems, New Technologies and Technical-Economical Efficiency]. Novosibirsk, NSTU, 2000, vol. 4, pp. 24–36.