

УДК 519.6:621.1.016:621.18

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ С ДВОЙНЫМ ВЕРХНЕРАСПОЛОЖЕННЫМ ДУТЬЕМ**Красинский Д.В.***ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН», Новосибирск,
e-mail: dkr@itp.nsc.ru*

Представлены результаты численного моделирования трехмерного турбулентного двухфазного реагирующего течения с учетом всех основных процессов тепломассопереноса при факельном сжигании распыленного бурого угля в вихревой топке парового котла ТЭС. Исследуемая перспективная схема вихревой топки была недавно усовершенствована за счет дополнительного тангенциального дутья через горелку, расположенную в верхней части вихревой камеры горения, что обеспечивает гибкость управления аэродинамической структурой потока и режимными параметрами. В результате расчетов проанализирована детальная аэротермохимическая 3D структура реагирующего течения в топочном объеме, включая поля скорости, температуры, концентраций газовых компонент и дисперсной фазы, тепловых потоков. Также в расчетах получены интегральные теплотехнические показатели, демонстрирующие повышенную энергоэффективность работы топки, и экологические характеристики для предложенного варианта вихревой топки.

Ключевые слова: уголь, горение твердого топлива, вихревая топка, численное моделирование**NUMERICAL MODELLING OF AEROTHERMOCHEMICAL PROCESSES IN COAL-FIRED VORTEX FURNACE WITH DUAL UPPER-PORT BURNERS****Krasinsky D.V.***Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, e-mail: dkr@itp.nsc.ru*

The paper presents the results of numerical modelling of 3D turbulent two-phase reacting flow with account for all the principal heat and mass transfer processes during the pulverized brown coal combustion in the vortex furnace of a power plant boiler unit. The studied prospective vortex furnace design has been recently modified with additional tangential-injection burner mounted at the upper part of the vortex combustion chamber – this allows for flexible control of aerodynamic structure and operational parameters of the furnace. Detailed athermochemical 3D structure of reacting flow in the furnace volume has been revealed from numerical simulation, including the fields of velocity, temperature, species and dispersed phase concentrations, heat fluxes. Also the integral heat engineering characteristics manifesting an improved thermal efficiency of the furnace, and ecological performance for the studied vortex furnace have been obtained in computations.

Keywords: coal, solid fuel combustion, vortex furnace, numerical modelling

Одной из актуальных задач, стоящих перед российской угольной энергетикой, является необходимость разработки топочных устройств с улучшенными характеристиками, обеспечивающими высокоэффективное и экологически безопасное сжигание угольного топлива в котельных агрегатах ТЭС, в том числе при использовании низкосортных и бурых углей. В соответствии с этим, одним из направлений разработки перспективных топочных устройств является использование технологии форсированного высокотемпературного режима сжигания распыленного угля в вихревом потоке компактной камеры горения [1, 2]. Применение вихревой технологии сжигания позволяет решать задачи уменьшения размера и повышения теплонапряженности топочно-го устройства, улучшения экономических и экологических показателей. С физической точки зрения, главным достоинством этой технологии является обеспечение интенсивного тепломассообмена в реагирующей двухфазной смеси благодаря устойчивому

высокотурбулентному вихревому потоку. Топочное устройство на основе этой технологии и состоящее из: – футерованной вихревой камеры горения с тангенциальным подводом струи аэросмеси, создающей вихревой факел с горизонтально расположенной осью вращения, – диффузорной части, – и камеры охлаждения, насыщенной двухцветными экранами и ширмами, известно как вихревая топка [1–9]. Конструкция вихревой топки с жидким шлакоудалением была разработана Н.В. Головановым в НПО ЦКТИ в 1970–80-х гг. Результаты опытно-промышленных испытаний [3] вихревой топки ЦКТИ в составе модернизированного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3 показали перспективность ее применения для высокоэффективного и экологически безопасного сжигания широкого спектра топлив, в том числе низкосортных и бурых углей. В ряде работ соавторов ранее были исследованы особенности аэродинамики [4] и процессов сжигания распыленного угля [5] в вихревой топке ЦКТИ.

Для котла с вихревой топкой именно вихревой перенос является аэродинамической основой всего процесса сжигания. Достижение заданных теплотехнических и экологических показателей при факельном сжигании твердого топлива в вихревом потоке в основном обеспечивается совершенством внутренней аэродинамики топки. Поэтому, с целью усовершенствования исходной конструкции Н.В. Голованова, в ИТ СО РАН ранее была разработана модифицированная схема вихревой топки (патент РФ № 2042084), отличительной особенностью которой является дополнительное тангенциальное дутье топливовоздушной струи через горелку в нижней точке периметра камеры горения (схема «ВТ2Н»), при этом в работах соавторов [6–7] представлены результаты экспериментальных и численных исследований аэродинамики и топочных процессов при сжигании распыленного угля в этой модификации вихревой топки.

В данной работе рассматривается новый вариант «ВТ2В» усовершенствования конструкции вихревой топки (патент РФ № 2585347), в котором горелка дополнитель-

ного дутья расположена в верхней части камеры горения и ориентирована вертикально вниз (см. рис. 1) – поэтому такую схему подачи горелочных струй можно назвать конфигурацией с двойным верхнерасположенным дутьем. Аэродинамическая структура потока в изотермической модели этой недавно предложенной конфигурации «ВТ2В» вихревой топки исследовалась методами PIV и 3D LDA в [8], а в работе [9] на основе численного 3D моделирования топочных процессов получен ряд характеристик факельного сжигания бурого угля в полноразмерной вихревой топке «ВТ2В». Вместе с тем, поскольку конфигурация «ВТ2В» является новой, необходимы расчетные оценки ее показателей для некоторого диапазона рабочих режимов сжигания угольного топлива. Поэтому целью настоящей работы является дальнейшее численное исследование трехмерного турбулентного двухфазного реагирующего течения с учетом всех основных процессов тепломассопереноса при сжигании распыленного угля, проведенное для другого (в отличие от работы [9]) варианта рабочего режима вихревой топки «ВТ2В».

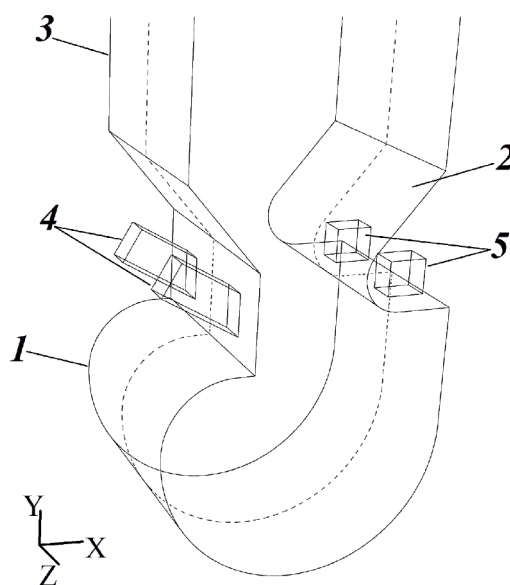


Рис. 1. Схема вихревой топки «ВТ2В» (верхняя часть камеры охлаждения не показана):
 1 – вихревая камера горения; 2 – диффузор; 3 – камера охлаждения;
 4 – основные горелки; 5 – дополнительные горелки.
 Пунктирной линией обозначена плоскость симметрии

Физико-математическая модель описания аэротермохимических процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке

Применяемая для численного исследования физико-математическая модель пространственного турбулентного течения, процессов тепломассопереноса и горения твердого распыленного топлива в топочных устройствах ТЭС основана на смешанном эйлер-лагранжевом описании двухфазной среды, когда для несущего газа используется модель сплошной среды, а для дисперсной фазы – траекторная модель пробных частиц, движение которых вдоль их траекторий описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет легко учесть полидисперсность угольного топлива. Такая математическая модель позволяет описать все основные взаимосвязи процессов переноса за счет турбулентной аэродинамики, межфазного взаимодействия, химического гетерогенного и газофазного реагирования, лучистого теплообмена. Предполагается, что течение в вихревой топке является стационарным, дозвуковым, турбулентным и имеет существенно пространственный характер, обусловленный конструктивной схемой топки. Турбулентное движение несущей газовой фазы описывается осредненными по Фавру определяющими уравнениями, для замыкания которых привлекается «реализуемая $k-\varepsilon$ » модель турбулентности [10]. Газовая фаза считается состоящей из следующих компонент: $\{O_2, CH_nO_m, CO, CO_2, H_2O, N_2\}$, здесь CH_nO_m представляет собой обобщенную формулу углеводородов, выделяющихся в процессе пиролиза летучих. Скорость газофазной реакции горения этих углеводородов описывается на основе известной модели дробления турбулентных вихрей [11]. Для моделирования лучистого теплообмена используется P_1 – приближение метода сферических гармоник для серой двухфазной среды [12], причем коэффициенты поглощения в газовой фазе определяются по известной модели взвешенной суммы серых газов [13], а коэффициенты поглощения и рассеяния в дисперсной фазе определяются из приближения оптически крупных частиц [12]. В рамках лагранжева описания движения, теплообмена и гетерогенного реагирования дисперсной фазы (с учетом выхода летучих и горения коксового остатка согласно диффузионно-кинетической теории) рассчитываются термодинамические состояния «представительных» частиц-кластеров угольного топлива вдоль их траекторий. При этом для учета полидисперс-

ности представительные кластеры частиц разбиваются на ~ 100 фракций по размерам, с использованием известной двухпараметрической формулы Розина-Раммлера [12] для задания начальной массовой доли каждой фракции. Учет влияния турбулентности несущего газа на движение частиц моделируется путем стохастических возмущений траекторий частиц.

С целью предсказания уровня эмиссии оксидов азота в топке в используемой математической модели на этапе пост-процессинга дополнительно решаются дифференциальные уравнения пространственного переноса концентраций монооксида азота NO, а также промежуточных соединений (радикалы HCN, NH_2), учитываемых в общей кинетической схеме образования оксидов азота при сжигании угля, в которой учитываются следующие механизмы: а) «термический» – окисление азота воздуха N_2 по расширенному механизму Я.Б. Зельдовича; б) «быстрый» – реагирование азота воздуха N_2 с углеводородными радикалами по механизму Фенимора, которое может происходить в области выделения летучих; в) «топливный» – выделение азота органической части топлива в газовую фазу (в процессе выхода летучих) в виде радикалов NH_2 и HCN, которые далее окисляются с образованием NO.

Решение уравнений баланса массы, количества движения, энергии и концентраций для дисперсной и газовой фаз выполняется в ходе последовательных «глобальных» итераций для несущего газа и для дисперсной фазы, а взаимовлияние фаз осуществляется согласно алгоритму “Particle-Source-In-Cell” [14], при котором на «лагранжевом» этапе решения в каждой ячейке сетки рассчитываются источники членов суммарного влияния всех прошедших через данную ячейку пробных частиц. Далее на «эйлеровом» этапе эти источники членов используются в правых частях соответствующих уравнений. После сходимости итерационного процесса решение оказывается самосогласованным. Представленная выше физико-математическая модель (более подробное описание которой изложено, например, в [7]) отличается универсальностью и широким диапазоном применимости для описания процессов горения твердого органического топлива, и может служить инструментом предсказательного моделирования и научной основой для высокотехнологичного проектирования и оптимизации теплоэнергетических топочных устройств (в т.ч. ориентированных на сжигание низкокачественных углей), отвечающих нормативным требованиям по экологи-

ческой безопасности, энергоэффективности и ресурсосбережению. Для проведения расчетов использовался CFD-пакет FLUENT.

Граничные условия

Конфигурация «BT2B» вихревой топки имеет плоскость симметрии S_{xy} между двумя горелками, расположенными последовательно в направлении оси z (см. рис. 1). Течение предполагается симметричным относительно этой плоскости, поэтому с целью экономии вычислительных ресурсов рассчитывалась только половина объема топки – полусекция, содержащая одну основную и одну дополнительную горелку. Габаритные размеры вычислительной области (моделируемой полусекции топки) составляют: $x_{max} = 8$ м, $y_{max} = 35$ м, $z_{max} = z_{symm} = 3.2$ м. С целью более гибкого управления аэродинамикой потока и режимом горения в вихревой камере, основная горелка разделена по высоте на два канала (каналы 1 и 2), а горелка дополнительного дутья в исследуемом варианте представляет собой один вертикальный канал 3 – тем самым подача горелочных струй в топку осуществляется через три канала, сечение каждого из них 0.525×0.8 м. Угол наклона основной горелки к горизонту (плоскости XZ) принят равным 30° . Для такой вычислительной области построена расчетная неструктурированная сетка, состоящая из 488916 гексаэдрических ячеек. Для компонент скорости на стенках задаются граничные условия прилипания, описание методики моделирования турбулентности в пристеночной области приведено в [4]. На плоскости S_{xy} задаются условия зеркальной симметрии для всех величин.

В проведенных расчетах в качестве твердого топлива использовался Березовский бурый уголь КАБ марки «2Б», параметр R_{90} тонины помола угля был задан равным $R_{90} = 30\%$. Расход подсушенного угля на моделируемый объем полусекции вихревой топки «BT2B» был принят равным 2.4 кг/с, а коэффициент избытка воздуха в топке – равным 1.15. Предполагалось, что влага при подсушивании угля в мельнице полностью выходит из топлива в виде водяного пара, вся масса которого подается в канал 1 первичного воздуха, в котором смешивается с сухим воздухом – таким образом, через канал 1 в топку подается аэросмесь – влажный первичный воздух с распыленным в нем углем. Температура аэросмеси, также как и воздуха вторичного дутья (в каналах 2 и 3), была принята равной 120°C . Отношение суммарных расходов газовой фазы $\gamma = G_{pri} / G_{sec}$ через основную (каналы 1 и 2) и дополнительную (канал 3) горелки было задано равным $\gamma = 3$ – этот параметр, как было показано в результате вариантных расчетов [6], оказывает влияние на интенсивность эффекта подпирания струи факела из основной горелки потоком снизу. Отношения расходов между дутьем, поступающим через каналы 1 и 2, были подобраны в результате предварительных вариантных расчетов, при этом локальный коэффициент избытка воздуха в канале 1 аэросмеси был выбран пониженным до ≈ 0.62 с целью формирования режима стадийного сжигания топлива в вихревой камере горения. Значения параметров во входных сечениях каналов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Заданные условия на входе каналов горелок вихревой топки «BT2B»

Параметр	Основная горелка		Дополнительная горелка: канал 3
	канал 1	канал 2	
Угол β наклона каналов горелки к горизонту, $^\circ$	30	30	90
Массовый расход подсушенного угля, кг/с	2.4	0	0
Массовый расход сухого воздуха, кг/с	12.24	4.47	5.97
Массовый расход водяного пара, кг/с	1.18	0	0
Объемная доля O_2	0.1819	0.21	0.21
Объемная доля H_2O	0.1340	0	0
Скорость потока, м/с	37.63	11.91	15.88

Важной особенностью конструкции вихревой топki является разделение топki по высоте на две подобласти: (а) зона высокотемпературного горения внутри футерованной вихревой камеры горения; (б) зона теплосъема, организованного в находящейся над диффузорной частью топki камере охлаждения, насыщенной тепловоспринимающими экранными поверхностями (см. рис. 1). Таким образом, для зоны (а) предполагается, что стенки вихревой камеры горения должны быть покрыты теплозащитной износостойкой футеровкой, создающей близкие к адиабатическим условия в камере горения – наличие такой футеровки является необходимым условием для организации высокотемпературного режима сжигания угля и жидкого шлакоудаления в вихревой камере топki. С другой стороны, интенсивное снижение температуры топчных газов в зоне (б) теплосъема обеспечивается главным образом механизмом лучистого теплопереноса путем отвода тепла в тепловоспринимающие поверхности камеры охлаждения. В качестве граничных условий для величины плотности энергии излучения на стенках топki ставятся известные условия Маршака [12]. Кроме того, для расчета граничных условий как лучистого, так и конвективного теплообмена на поверхности тепловоспринимающих экранов и ширмы в камере охлаждения необходимо задать интегральный коэффициент теплопередачи k_w стенок топki (от поверхности золы отложений до пароводяной смеси). В табл. 2 приведены значения этого коэффициента, заданные для различных типов экранных поверхностей вихревой топki. При этом температура пароводяной смеси в трубах задавалась равной 390°C, а степень черноты экранов – равной 0.8. При таком способе формулировки граничных условий теплообмена значения температур поверхности экранов (T_w) и тепловых потоков на них, а также коэффициент тепловой эффективности Ψ экранов, определяются в процессе численного решения.

Результаты численного моделирования 3D аэродинамики и процессов горения бурого угля в вихревой топке «BT2B»

В результате численного исследования получена детальная предсказательная информация о трехмерной аэротермохимической структуре двухфазного турбулентного реагирующего течения при сжигании березовского бурого угля в усовершенствованной конструкции «BT2B» вихревой топki с двойным верхнерасположенным дутьем, включая распределения скорости, температуры, концентраций, тепловых потоков. Структура течения в виде векторов осредненной скорости в XY-сечении по центру горелок ($z=1.6$ м) представлена на рис. 2, где для увеличения показана вихревая камера горения и диффузорная часть топki. Видны следующие особенности аэродинамической картины в исследуемой вихревой топке «BT2B». Истекающая из основной горелки струя, подпиремая снизу закрученным потоком вихревой камеры, присоединяется к вертикально истекающей струе из дополнительной горелки (струе вторичного дутья) и к противоположной стенке и далее распространяется вниз как пристенная струя вдоль вогнутой поверхности камеры. Вблизи центра вихревой камеры (с некоторым смещением вправо вверх) четко выражена область вихревого ядра закрученного потока. Также следует отметить, что аэродинамическая структура потока в вихревой топке характеризуется «перчаточной» схемой, т.е. пространственным пересечением входящей (из основной горелки) топливовоздушной струи с закрученным потоком в камере горения, восходящая часть которого обтекает эту основную струю снизу вверх (огывая ее в трансверсальном направлении по координате z) и затем поступает в область диффузора и далее в камеру охлаждения. Это свидетельствует о том, что закрученный поток в вихревой камере горения имеет сложную пространственную структуру. Такая «перчаточная» структура течения является

Таблица 2

Средние значения коэффициентов теплопередачи (k_w) и тепловой эффективности (Ψ_{av}) на экранных поверхностях в камере охлаждения вихревой топki «BT2B»

Наименование и местоположение тепловоспринимающей поверхности	Заданное значение k_w , Вт/(м ² ·К)	Расчетное значение Ψ_{av}
Ширма (в сечении $z=3.2$ м)	250	0.597
Двухсветный экран (в сечении $z=0$)	200	0.504
Остальные экранные поверхности (фронтальные, тыловые и потолочные в камере охлаждения)	150	0.400

характерной особенностью аэродинамики вихревых топков, см. [1], [4–9], и обуславливает высокую интенсивность турбулентного перемешивания, интенсификацию процессов тепломассопереноса в вихревой камере горения и, соответственно, надежное сжигание низкорекреационных твердых топлив, а также рециркуляцию продуктов сгорания в зону пылеугольного факела, за счет которой понижается эмиссия оксидов азота в вихревой камере горения.

Распределения температуры в усовершенствованной конструкции «ВТ2В» вихревой топки показаны цветом векторных стрелок на рис. 2, а также представлены на рис. 3 в виде профилей значений температуры по высоте топки, осредненных по горизонтальным XZ-сечениям (сплошная линия 2 на рис. 3). Также, штриховой линией 1 на рис. 3 показан профиль максимальных значений температуры по высоте топки. Кроме того, профиль осредненной по горизонтальным сечениям объемной концентрации монооксида азота NO (выраженной в ppm) по высоте топки представлен линией 3 зеленого цвета (правая ось ординат на рис. 3). Из рисунков 2 и 3 можно видеть высокий уровень температуры в вихревой камере горения, достигающий 1884°C в ее нижней части, вследствие чего обеспечивается стабильность режима жид-

кого шлакоудаления. При этом уровень тепловыделения на единицу объема в камере горения составляет ~344 кВт/м³. Поэтому наличие защитной футеровки на стенках камеры горения является необходимым условием для организации высокотемпературного режима сжигания угля и жидкого шлакоудаления в вихревой топке. Следует отметить, что профиль средней температуры (линия 2 на рис. 3) претерпевает значительные градиенты и минимум вблизи координаты $y=6.6$ м по высоте топки, обусловленные поступлением свежей струи аэросмеси из основной горелки (см. картину течения на рис. 2). Из рис. 3 можно видеть, что в камере охлаждения ($y > 9$ м) температура среды интенсивно снижается по высоте топки – основным механизмом отвода тепла в экранные поверхности является лучистый теплоперенос. При этом температурное поле в камере охлаждения становится более равномерным, что видно по сближению профилей максимальных (линия 1) и осредненных (линия 2) значений температуры с увеличением высоты – это обусловлено эффективным теплоотводом из топочного объема в теплоноситель парогенератора благодаря заложенному в конструкции насыщению камеры охлаждения вихревой топки тепловоспринимающими экранными поверхностями.

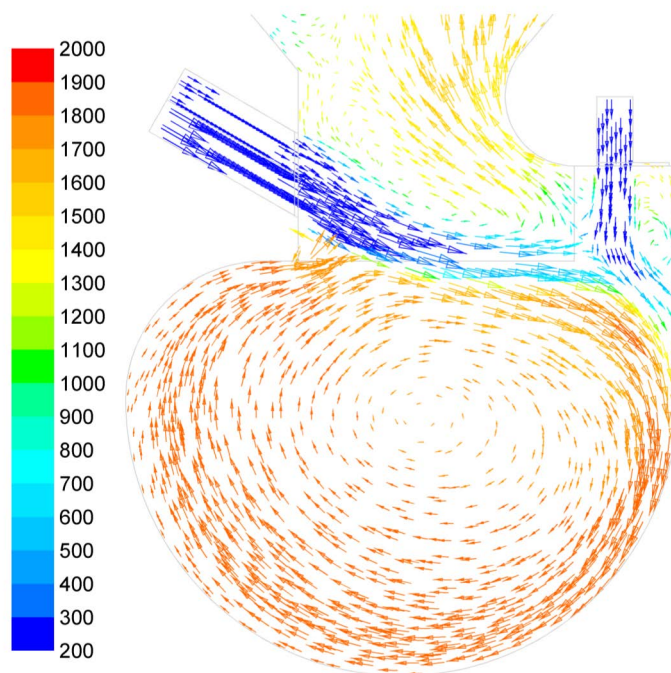


Рис. 2. Поле векторов скорости и распределение температуры (цветовая шкала, °C) в вихревой топке «ВТ2В» (сечение $z=1.6$ м по центру горелок)

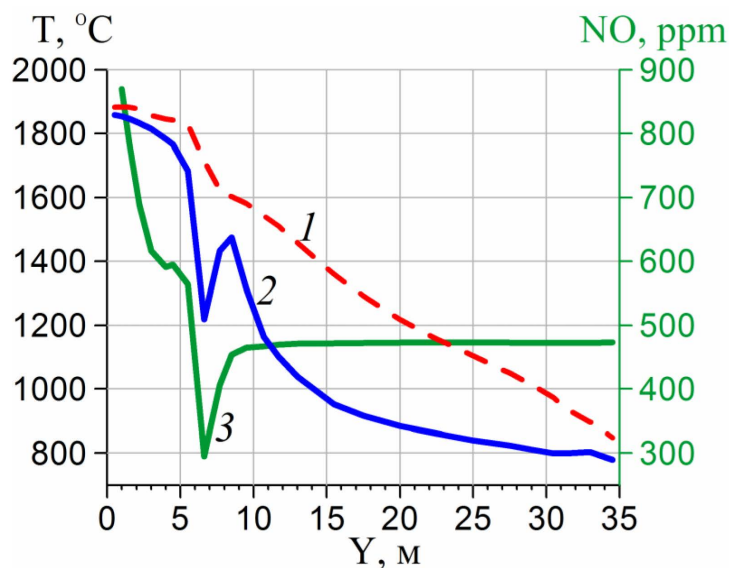


Рис. 3. Профили распределений по высоте точки «ВТ2В»: температура T , °C (линии 1, 2) и концентрация NO по объему, ppm (линия 3, правая ось ординат):
 1 – максимальные значения T по горизонтальным сечениям;
 2 – осредненные по горизонтальным сечениям значения T , °C

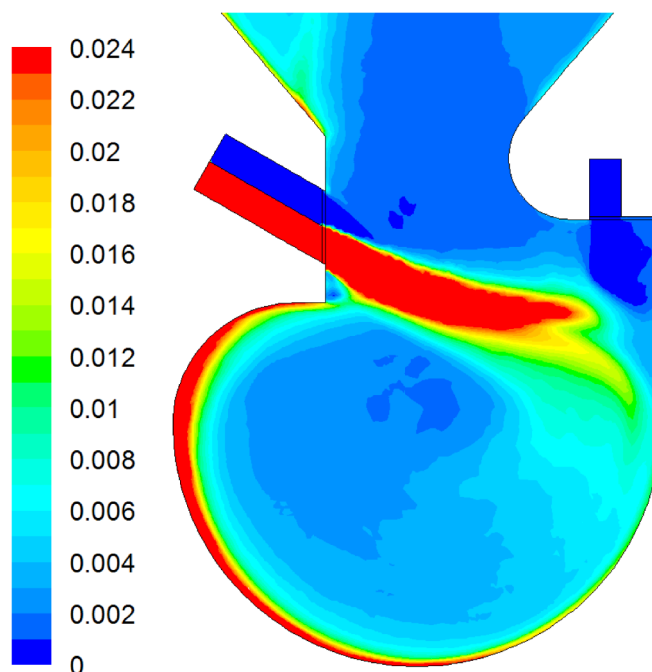


Рис. 4. Поле концентрации дисперсной фазы (сечение $z=1.6$ м по центру горелок), $\text{кг}/\text{м}^3$

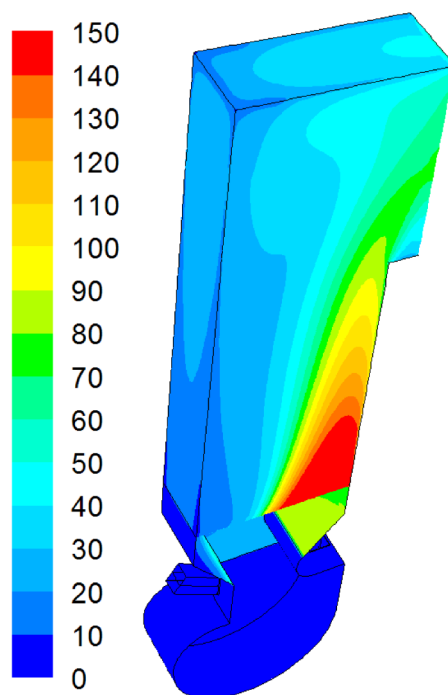


Рис. 5. Изоконтуры воспринятого теплового потока на стенках топки «BT2B» (3D вид на ширмовый экран), кВт/м²

Поле массовой концентрации дисперсной фазы в сечении по центру горелок ($z=1.6$ м) представлено на рис. 4, откуда видно влияние вихревого характера течения в камере горения на распространение факела дисперсных частиц и, как следствие, на интенсификацию процесса турбулентного перемешивания твердого топлива. Также можно видеть, что процессы перемешивания и реагирования в области пылеугольного факела носят выраженный диффузионный характер. Прогрев поступающей из основной горелки свежей струи аэромеси происходит вдоль нижней границы пылеугольного факела за счет высокотемпературного закрученного потока снизу, что сопровождается выходом летучих из прогретых угольных частиц – в этой высокотемпературной зоне происходит газофазная реакция горения углеводородов летучих C_nO_m , сгорание которых в этой области (и ниже по потоку) также приводит к зажиганию углерода коксовых частиц.

Поле результирующих тепловых потоков на тепловоспринимающих поверхностях в камере охлаждения исследуемой вихревой топке «BT2B» представлено на рис. 5, где показан 3D вид на ширмовый экран (установленный в плоскости симметрии $z=3.2$ м между горелками, см. также табл. 2).

Максимальные значения воспринятых тепловых потоков достигают ≈ 200 кВт/м² в нижней части ширмы. Эффективность работы тепловоспринимающих поверхностей в камере охлаждения топки оценивалась путем расчета коэффициентов тепловой эффективности экранов $\Psi = Q_{рез} / Q_{пад}$ по полученному в результате численного моделирования полю тепловых потоков (где $Q_{пад}$ – падающий на стенку тепловой поток, а $Q_{рез}$ – результирующий, т.е. воспринятый, тепловой поток). Осредненные по площади каждой экранной поверхности значения $\Psi_{ав}$ приведены в табл. 2 и находятся в диапазоне $0.4 < \Psi_{ав} < 0.6$ (в зависимости от типа поверхности) – видно, что полученные значения $\Psi_{ав}$ в вихревой топке «BT2B» при заданной нагрузке в целом несколько выше, чем типичный уровень $\Psi \sim 0.4$ для большинства топочных устройств.

Полученные в расчетах интегральные в выходном сечении камеры охлаждения $x=8.1$ м (перед выпускным газоходом) теплотехнические и экологические параметры исследуемой конструкции «BT2B» вихревой топкой с двойным верхнерасположенным дутьем имеют следующие значения: осредненная по выходному сечению температура $T_{mean}=878^\circ\text{C}$, максимальная температура $T_{max}=986^\circ\text{C}$, коэффициент потерь тепла от

механической неполноты сгорания топлива $q_4 = 1,9\%$, осредненные значения концентраций (по объему): $[O_2]=2,7\%$, $[CO]=4$ ppm, $[NO]=474$ ppm. При этом концентрация NO_2 (в пересчете на 6%-е содержание O_2 при нормальных условиях) в выходном сечении составила 796 мг/м³. Эти интегральные характеристики уместно сопоставить с результатами предыдущей работы [9], в которой для этой же конфигурации «BT2B» вихревой топки был численно исследован другой режим сжигания Березовского бурого угля – при более тонком помоле $R_{90}=15\%$ и при пониженном значении коэффициента избытка воздуха в топке (принятого в [9] равным 1.05). Полученное в работе [9] для такого сочетания режимных параметров топки значение эмиссии оксидов азота составило 485 мг/м³, что более благоприятно с точки зрения соответствия экологическим требованиям. Отсюда можно сделать вывод о том, что для исследуемой конфигурации «BT2B» вихревой топки значительное влияние на увеличение уровня выбросов NO_x (образующихся в первую очередь по «термическому» механизму Я.Б. Зельдовича) оказывает присутствие даже небольшой концентрации кислорода в высокотемпературной области вихревой камеры горения. Для управления этим эффектом и снижения эмиссии «термических» NO_x , при задании режимных (входных) параметров топки следует использовать пониженное значение коэффициента избытка воздуха.

Заключение

В результате проведения численного моделирования для принятых конструктивных и режимных параметров перспективного варианта «BT2B» конструкции вихревой топки с двойным верхнерасположенным дутьем при сжигании березовского бурого угля КАБ с тониной помола $R_{90}=30\%$ проанализирована трехмерная аэротермохимическая структура турбулентного полидисперсного реагирующего потока в исследуемой вихревой топке, включая поля скорости, температуры, концентраций газовых компонент и дисперсной фазы, тепловых потоков, а также получены интегральные теплотехнические и экологические характеристики этой топки. Проведенные расчеты продемонстрировали достижение таких показателей энергоэффективности вихревой топки «BT2B», как: – режим непрерывного жидкого шлакоудаления, который обеспечивается высоким объемным тепловыделением и соответствующим высоким уровнем температуры в камере горения; – повышенные значения коэффициента тепловой эффективности тепловоспринимающих поверхно-

стей в камере охлаждения (что способствует повышению КПД котла).

Полученные результаты численного 3D моделирования подтверждают перспективность использования технологии форсированного режима факельного сжигания широкого спектра углей в вихревых топках, и создают научную основу для проектирования пылеугольных топков с вихревой технологией сжигания, а также для обоснования режимных и конструктивных параметров при разработке или малозатратной реконструкции на технологию вихревой топки котельных агрегатов, с целью достижения требований энергоэффективного и экологически безопасного сжигания твердых топлив.

Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды (проект № 14-19-00137).

Список литературы

1. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 464 с.
2. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 104 с.
3. Попов А.А., Голованов Н.В., Гульцев Л.М. и др. Результаты освоения и исследований опытно-промышленной котельной установки с котлом ТПЕ-427 // Сибирский физико-техн. ж. – 1991. Вып. 5. – С. 15–20.
4. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топки парогенератора // ИФЖ. – 2012. – Т. 85, № 2. – С. 266–276.
5. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Энхжаргал Х. Предпроектное обоснование параметров КЭС мощностью 4800 МВт на угле Шивэ-Овооского месторождения Монголии // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 22–30.
6. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 1. Аэродинамика течения в вихревой топке // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 41–46.
7. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 2. Горение бурого угля КАБ в вихревой топке // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 54–61.
8. Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топки // ПЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 15. – С. 25–32.
9. Krasinsky D.V., Sharypov O.V. Numerical modeling of pulverized coal combustion in the vortex furnace with dual upper-port loading // Journal of Engineering Thermophysics. – 2015. – Vol. 24, No. 4. – P. 348–356.
10. Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new k-epsilon eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation // Computers & Fluids. – 1995. – Vol. 24, No. 3. – P. 227–238.
11. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Proc. Combust. Inst. – 1977. – Vol. 16, No. 1. – P. 719–729.
12. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. – М.: Наука, 1994. – 320 с.
13. Смит Т.Ф., Шэнь З.Ф., Фридман Д.Н. Вычисление коэффициентов для модели взвешенной суммы серых газов // Теплопередача. – 1982. – Т. 104, № 4. – С. 25–32.
14. Crowe C.T., Sharma M.P., Stock D.E. The Particle-Source-In-Cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1977. – Vol. 99, No. 2. – P. 325–332.