

Investigation of a Boiler's Furnace Aerodynamics with a Vortex Solid Fuel Combustion Scheme on Physical and Mathematical Models

Prokhorov V.B., Chernov S.L., Kirichkov V.S., Kaverin A.A.

Moscow Power Engineering Institute (MPEI, National Research University)
Moscow, Russian Federation

Abstract. The important problem of developing the low-cost technologies that will be able to provide a deep decrease in the concentration of nitrogen oxides while maintaining fuel burn-up efficiency is considered. This paper presents the results of the aerodynamics study of the furnace of boiler TPP-210A on the base of the physical and mathematical models in the case when boiler retrofitting from liquid to solid slag removal with two to three times reduction of nitrogen oxide emissions and replacing the vortex burners with direct-flow burners. The need for these studies is due to the fact that the direct-flow burners are "collective action" burners, and efficient fuel combustion can be provided only by the interaction of fuel jets, secondary and tertiary air jets in the furnace volume. The new scheme of air staged combustion in a system of vertical vortexes of opposite rotation with direct-flow burners and nozzles and direct injection of Kuznetsky lean coal dust was developed. In order to test the functional ability and efficiency of the proposed combustion scheme, studies on the physical model of the boiler furnace and the mathematical model of the experimental furnace bench for the case of an isothermal fluid flow were carried out. Comparison showed an acceptable degree of coincidence of these results. In all studied regimes, pronounced vortices remain in both the vertical and horizontal planes, that indicates a high degree of mass exchange between jets and combustion products and the furnace aerodynamics stability to changes in regime factors.

Keywords: boiler, vortex combustion, nitrogen oxides emission, direct-flow burners and jets, physical and numerical modeling of furnace.

DOI: 10.5281/zenodo.1217238

Cercetări cu modele fizice și matematice a aerodinamicii focarului unui cuptor folosind un sistem vortex de combustie a combustibilului solid

Prokhorov V. B., Chernov S. L., Kirichkov V. S., Kaverin A. A.

Universitatea Națională de Cercetare «Institutul de Energetică din Moscova»
Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Problema actuală de a asigura cerințele de reglementare pentru emisiile de substanțe nocive în atmosferă, în special oxizii de azot, dictează necesitatea de a dezvolta tehnologii cu costuri reduse care să poată reduce concentrația de oxizi de azot, menținând în același timp eficiența arderii combustibilului. Această problemă este cea mai acută pentru cazanele care lucrează cu eliminarea zgurii cu lichide, pentru care standardul tehnologic pentru emisiile specifice de oxizi de azot este depășit de la două până la trei ori. Acest articol prezintă rezultatele unui studiu al aerodinamicii cuptorului TPP-210A cu modele fizice și matematice la transferul lui de la tehnologia de eliminare umedă a zgurii la cea solidă și la înlocuirea arzătoarelor cu vortex cu arzătoare cu debit direct. Necesitatea acestor studii se datorează faptului că arzătoarele cu debit direct sunt arzătoare de acțiune colectivă, iar arderea eficientă a combustibilului poate fi asigurată numai prin organizarea interacțiunii dintre jeturile de combustibil, jeturile de aer secundar și terțiar în camera de combustie. În acest scop, a fost creată o nouă schemă de incinerare pas cu pas în sistemul de turbionări verticale de rotație opusă pentru utilizarea arzătoarelor cu flux direct și duzele cu injectare directă de praf din cărbuni săraci din Kuznetsk pentru transferul cazanului TPP-210A la îndepărtarea zgurii solide. În toate regimurile studiate, vortexurile pronunțate rămân în ambele planuri verticale și orizontale, ceea ce indică un grad ridicat de schimb de masă între jeturi și produse de ardere și stabilitatea aerodinamicii cuptorului la modificările factorilor de regim.

Cuvinte-cheie: cazan, emisiile de oxizi de azot, arzătoarele și duzele cu flux direct, simularea numerică a focarului.

Исследования на физической и математической моделях аэродинамики топки котла при применении вихревой схемы сжигания твердого топлива

Прохоров В. Б., Чернов С. Л., Киричков В. С., Каверин А. А.

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Актуальная проблема обеспечения нормативных требований по выбросам вредных веществ в атмосферу, в частности оксидов азота, диктует необходимость разработки малозатратных технологий,

которые будут способны обеспечить глубокое снижение концентрации оксидов азота при сохранении эффективности выгорания топлива. Наиболее остро данный вопрос стоит для котлов, работающих с жидким шлакоудалением, для которых технологический норматив по удельным выбросам оксидов азота превышает в два-три раза. В данной статье приведены результаты исследования аэродинамики топки котла ТПП-210А на физической и математической моделях при его переводе с жидкого на твердое шлакоудаление и при замене вихревых горелок на прямоточные. Необходимость данных исследований вызвана тем обстоятельством, что прямоточные горелки являются горелками коллективного действия, и эффективное сжигание топлива может быть обеспечено только при организации взаимодействия топливных струй, струй вторичного и третичного воздуха в топочном пространстве. С этой целью для перевода котла ТПП-210А на твердое шлакоудаление разработана новая схема ступенчатого сжигания в системе вертикальных вихрей противоположного вращения при применении прямоточных горелок и сопел с прямым вдуванием угольной пыли кузнечного тощего угля. Для проверки работоспособности предложенной схемы сжигания и ее эффективности проведены исследования на физической модели топки котла и математической модели экспериментального стенда топки для случая течения изотермической жидкости. С целью проверки степени достоверности полученных данных результаты физического и математического моделирования сопоставлялись как качественно, так и количественно. Сопоставление показало приемлемую степень совпадения указанных результатов. Во всех исследованных режимах сохраняются ярко выраженные вихри как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости, что говорит о высокой степени массообмена между струями и продуктами сгорания и устойчивости аэродинамики топки к изменениям режимных факторов.

Ключевые слова: котельные установки, вихревое сжигание, твердое и жидкое шлакоудаление, выбросы оксидов азота, прямоточные горелки и сопла, физическое и численное моделирование топки.

Введение

В России работает большое число паровых котлов с жидким шлакоудалением (ЖШУ). Причем ЖШУ применяется не только при сжигании антрацитов и тощих углей, но и при сжигании высокорекреационных каменных углей Кузнецкого бассейна и даже при сжигании бурых углей с высокой влажностью. Высокие температуры в зоне горения топлива, при прочих равных условиях, позволяют снизить механический недожог топлива, обеспечивают лучшее его воспламенение, а большое теплонапряжение топочного объема – уменьшить габариты котла, и тем самым, снизить капитальные затраты. Вместе с тем, высокие температуры в зоне горения способствуют большой генерации термических оксидов азота при жидком удалении шлака. Концентрация оксидов азота в дымовых газах котлов, работающих при ЖШУ, обычно составляет 1200-1900 мг/м³, что в два-три раза превышает технологический норматив для котлов с ЖШУ [1]. Возможности применения методов подавления образования оксидов азота значительно ограничены из-за необходимости поддержания высокой температуры для обеспечения удаления шлака в жидком состоянии.

Изменения природоохранного законодательства РФ [2] предусматривают с 2020 года резкое увеличение платы за

выбросы вредных веществ, превышающие технологические нормативы. Поэтому актуальной становится задача по разработке малозатратной технологии по переводу котлов с жидкого на твердое шлакоудаление, что должно позволить в четыре-пять раз снизить выбросы оксидов азота. При этом необходимо обеспечить надежную бесшлаковую работу котла и величину механического недожога в пределах нормативных значений.

1. ЦЕЛЬ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье приведены результаты исследования аэродинамики топки котла ТПП-210А на физической и математической моделях при его переводе с жидкого на твердое шлакоудаление и при замене вихревых горелок на прямоточные. Необходимость данных исследований вызвана тем обстоятельством, что прямоточные горелки являются горелками коллективного действия, и эффективное сжигание топлива может быть обеспечено только при организации взаимодействия топливных струй, струй вторичного и третичного воздуха в топочном пространстве. Кроме того, для снижения выбросов оксидов азота необходимо обеспечить эффективное ступенчатое сжигание топлива.

С этой целью для перевода котла ТПП-210А на твердое шлакоудаление разработана новая схема ступенчатого сжигания в системе вертикальных вихрей противоположного вращения при применении прямоточных горелок и сопел с прямым вдуванием угольной пыли кузнечного угля марки ТР и подготовкой топлива с использованием среднеходных валковых мельниц. Для организации ступенчатого сжигания топлива, быстрого прогрева угольной пыли и ее раннего воспламенения в предложенной схеме сжигания приняты низкие избытки первичного воздуха. Недостающий воздух для полного сгорания топлива поступает в топку из сопел вторичного и третичного дутья. Для проверки работоспособности разработанной схемы сжигания и ее эффективности проведены исследования на физической модели топки котла и математической модели экспериментального стенда топки для случая течения изотермической жидкости (комнатного воздуха). Это позволяет сопоставить результаты исследований с использованием двух различных методов.

II. ВЫБОР МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПОЧНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Одни из первых совместных исследований аэродинамики топки с настенными горелками на численных и физических моделях проводились для 18 горелок котла, разработанного компанией Babcock and Wilcox в середине 1950-х годов. В последние годы исследователи делают упор на численные методы расчета аэродинамических задач. Так в работе [3] проведено исследование изменения аэродинамики струй вторичного воздуха в зависимости от поверхностных теплонапряжений, геометрии подводящих каналов (горелок и сопел) и топочной камеры в целом. LaRose и Hopkins работали над численным исследованием влияния распределения воздуха по горелкам на образование оксида углерода и оксидов азота для физических моделей различных топок [4]. Исследование Bhaskera, моделирующее турбулентный поток в котле, показали, что образование вихрей приводит к неравенству профиля скоростных потоков на выходе из модели [5]. В [6] трехмерная

модель горения Fluent использовалась для определения температуры и профиля тепловых потоков для типичных энергетических котлов. По результатам расчетов авторы отметили, что исследования топочных процессов посредством Вычислительной Гидродинамики (ВГД) является перспективным способом совершенствования работы котельных установок. Подобная идея также обосновывалась ранее в работе [7] на примере моделирования работы топки котла с низкоэмиссионными горелками и циклонными предтопками.

В настоящее время численное моделирование широко применяется при проработке предпроектных конструкторских решений по модернизации котельного оборудования [8], оптимизации режимов [9] или для поиска и устранения проблем в его работе [10].

Модельным исследованиям вихревых течений внутри топочных камер посвящено значительное количество работ, как на постсоветском пространстве, так и в других странах по всему миру. В России исследования вихревого сжигания ведутся в направлении совершенствования камер сгорания котлов с ЖШУ, например, [11], и низкотемпературных вихревых топок с ТШУ, [12].

В других странах мира вихревая технология сжигания твердого топлива применяется преимущественно в циклонных предтопках пылеугольных котлов [7] и при организации тангенциального сжигания в восходящем горизонтальном вихре [13]-[15]. Стоит отдельно выделить применение закрученных потоков в слоевых топках для эффективного дожигания продуктов неполного сгорания твердого топлива, как например в [16], [17].

Таким образом, перспективное направление развития котельной техники – организация вертикальных и горизонтальных вихрей в топочной камере еще не исчерпало своего потенциала. Разработка данных схем сжигания требует детального исследования аэродинамики взаимодействующих потоков и использование численного моделирования, которое необходимо сопровождать валидацией полученных результатов. Поэтому при решении подобного класса задач разумным является совместное применение физического изотермического и

численного моделирования истечения струй из горелок и сопл. Исследователи аэродинамики газовых потоков в России и других странах (например, [11], [18], [19]), стремятся идти именно по этому пути, что указывает на то, что физическое моделирование не исчерпало себя как метод исследования и должно следовать за численным экспериментом для проверки степени адекватности полученных результатов. Современная практика моделирования движения газовых потоков в элементах котлов подтвердила правомерность синтеза численных и физических экспериментов.

III. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработана и изготовлена физическая модель топki котла для исследования методом визуализации потока топливных и воздушных струй в топочном объеме, размеры которой и параметры среды на выходе из горелок и сопл были выбраны из условия соблюдения критериев подобия [20] (рис.1). Моделируется половина топki котла ТПП-210А, вторая половина не отличается от первой. В исследованиях осуществлялась визуализация струй, выходящих из горелок и сопл с помощью искровых продувок.

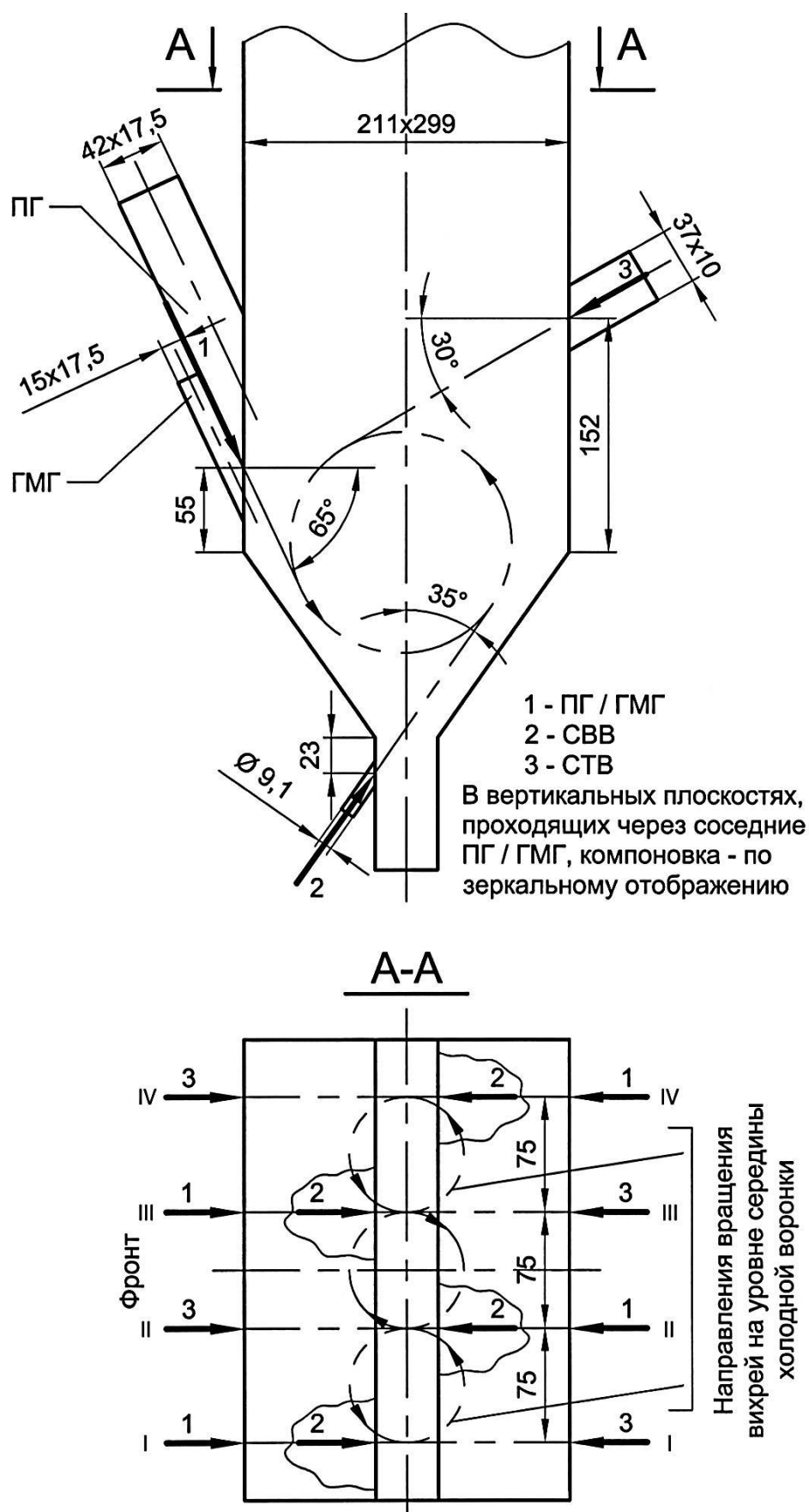
На фронтальной стенке модели в вертикальных разрезах I-I и III-III размещены пылеугольные и газомазутные горелки (ПГ и ГМГ), а сопла третичного воздуха (СТВ) – на задней. В тех же разрезах сопла вторичного воздуха (СВВ) расположены в верхней части фронтальной стенки шлакового комода. В вертикальных разрезах II-II и IV-IV размещение горелок и сопл выполнено по зеркальному отображению. Для исследования режима работы топki с меньшей долей воздуха, поступающего в модель через ПГ, перед ними были установлены ограничительные шайбы с проходным

сечением 31x13 мм². Исследовались также режимы без установки ограничительных шайб перед ПГ и с закрытием каналов ГМГ (с ограничительными шайбами перед ПГ). Углы установки горелок и сопл выбраны из условия наиболее полного заполнения объема низа топki образующимися 4-мя вертикальными вихрями (по числу ПГ), противоположно вращающимися относительно соседних.

Искровые продувки имели цель получить общую картину движения всех струй: пылеугольной горелки (ПГ); газомазутной горелки (ГМГ); сопл вторичного воздуха (СВВ) и сопл третичного воздуха (СТВ) в объеме модели. Визуализация потоков проводилась последовательно для каждого потока и для каждого сечения отдельно при обеспечении скоростей во всех каналах на протяжении всего эксперимента.

Методика заключалась в следующем. Физическая модель топki с прозрачными стенками подключается на всас центробежного вентилятора, имеющего направляющий аппарат для регулирования разрежения и раструб с искрогасителем, через который осуществляется выхлоп воздуха в помещение лаборатории. Патрубки, являющиеся прямоточными горелками и соплами, остаются открытыми и сообщаются с атмосферой.

Положение направляющего аппарата вентилятора определяет разрежение в объеме модели, т.е. организует заданную скорость струй на выходе из горелок и сопл (таких, чтобы критерий Рейнольдса составлял более 10 000). Такие значения критерия Рейнольдса, как показали исследования, обеспечивали автомодельность потоков при их взаимодействии в топочном объеме. Постоянство расходов воздуха через модель котла контролируется по величине динамического напора, измеряемого в выходном патрубке модели с помощью трубки Прандтля, подключенной к дифференциальному манометру.



ПГ – пылеугольные прямоточные горелки, ГМГ – газомазутные прямоточные горелки, СВВ – сопла вторичного воздуха; СТВ – сопла третичного воздуха.

Рис. 1. Эскиз физической модели топки котла ТПП-210А.

С целью визуализации траекторий движения струй в модели топочной камеры проводятся искровые продувки. Древесные опилки, предварительно просеянные через сито с ячейкой 200 мкм, прокаливаются в муфельной лабораторной печи без доступа воздуха, далее лоток с тлеющими опилками (с коксовыми частицами) поочередно подносится к каналам подачи топлива, вторичному и третичному дутью. За счет некоторого скольжения опилок относительно несущего их потока воздуха, они воспламеняются, высвечивая траекторию движения струи. Характер движения тлеющих частиц в модели фиксируется на цифровую фотокамеру. Фотографирование осуществляется через прозрачные боковые стенки.

Исследования на физической и математической моделях выполнены для трех основных расходных режимов:

а) с базовым избытком первичного воздуха $\alpha_{\text{пр}}=0.288$, позволяющим достичь значительного снижения образования NO_x ;

б) с уменьшенным избытком первичного воздуха $\alpha_{\text{пр}}=0.158$. На каналы пылеугольных горелок устанавливаются шайбы размером $31 \times 13 \text{ мм}^2$;

в) с уменьшенным избытком первичного воздуха $\alpha_{\text{пр}}=0.158$ и с закрытыми каналами газомазутных горелок.

IV. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТОПОЧНОГО СТЕНДА

В программном комплексе ANSYS Fluent [21] разработана математическая модель лабораторного стенда котла для случая течения изотермической жидкости (комнатного воздуха) и проведена ее верификация и валидация. Математическая модель строится на основе следующих уравнений сохранения [22]:

1. уравнение неразрывности (сохранения массы);
2. уравнение Навье-Стокса (сохранения количества движения);
3. уравнения турбулентности (k-ε модель турбулентности).

Для исследования с использованием метода математического моделирования была построена 3D модель объекта в модуле ANSYS Design Modeller в соответствии с геометрическими размерами лабораторной

модели и сгенерирована разностная сетка в программе ANSYS Meshing (рис. 2). Чтобы исключить влияние расчетной сетки на результаты моделирования выполнена проверка сеточной чувствительности модели. Для этого был проведен ряд расчетов с постепенным увеличением количества элементов в сетке и неизменными граничными условиями. Для более качественного моделирования пограничного слоя у стен модели использовалась призматическая сетка. Для остального объема применялась тетраэдрная сетка. Сравнение результатов расчета показало, что увеличение числа ячеек сетки выше 3317005 приводит к изменению значений средних скоростей воздуха на входе в топку менее 1%. Поэтому указанная сетка была использована в дальнейших расчетах. Для получения полей скоростей и давления использовался алгоритм расщепления, который хорошо зарекомендовал себя для расчета низкоскоростных потоков (до 0,8М). Так как задача изотермическая, то решается без учета массовых сил ($g=0$). Выбранная модификация модели турбулентности Realizable k-ε model описывается двумя уравнениями.

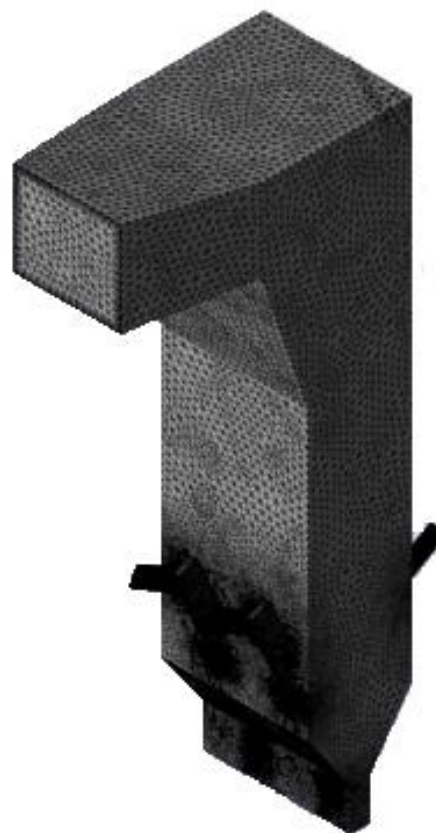


Рис. 2. 3D модель топочного стенда с разностной сеткой расчетной модели.

Данная модификация показывает высокую точность при моделировании закрученных потоков. Модель турбулентности представляет собой вариант стандартной $k-\epsilon$ модели. "Реализация" основана на использовании математических ограничений, которые позволяют модели в конечном итоге лучше описывать поток, чем стандартная $k-\epsilon$ модель. Ее свойства и области применения сходны с моделью RNG $k-\epsilon$, она более точна и быстрее сходится, чем RNG $k-\epsilon$, но не применима во вращающихся системах координат [23], [24]. С данной моделью турбулентности в расчетах применена стандартная пристеночная функция (Standard Wall Functions), которая применяет для описания изменения параметров потока полей эмпирические уравнения.

Решатель ANSYS Fluent настроен на применение следующих методов и схем решения:

- Алгоритм решения (SIMPLE) – раздельный для решения полей скоростей и давлений. Вначале с помощью уравнения Навье-Стокса рассчитывается поле скоростей, затем определяются давления с помощью уравнения неразрывности, после чего полученные значения скоростей и давлений корректируются.

- Пространственная дискретизация производится следующим образом: для расчета градиентов – на основе метода наименьших квадратов (least Squares cell); для давления – по локальной схеме второго порядка точности (Presto!); для момента, турбулентной кинетической энергии, турбулентной скорости диссипации – схема дискретизации 2 порядка точности.

- Коэффициенты релаксации – стандартные для алгоритма SIMPLE.

На всех входных сечениях горелок и сопл граничные условия задавались по полному и статическому давлению, равному атмосферному (pressure-inlet); тип границы для выхода из модели – outlet-vent, статическое давление (отрицательное). На поверхности модели задается условие непроницаемости (равенство нулю нормальной компоненты скорости). Высота шероховатости стен топочной модели и каналов горелок и сопел принята равной 0.5 мм. Расчетная жидкость принята несжимаемой, значения плотности и вязкости приняты соответствующим плотности и

вязкости воздуха при температуре 25°C: $\rho_v = 1.184 \text{ кг/м}^3$; $\mu_v = 1.85 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$.

При расчете отслеживались следующие мониторы сходимости решения: неразрывность (continuity); x , y , z компоненты скорости; параметры турбулентности k и ϵ . Абсолютный критерий сходимости 0.0001. Решение считается вышедшим на стационар тогда, когда максимальная величина мониторов сходимости меньше указанной погрешности. Достигнутый небаланс по массе газа в модели – порядка 10^{-7} кг/с .

Валидация численной модели состояла в сравнении результатов моделирования с опытными данными. Сравнялись значения максимальных скоростей (рис. 3) по вертикальной оси выходного среза ПГ в зависимости от расстояния от нижней границы, полученные по результатам численного моделирования и по результатам замеров на физической модели для второго режима (с ограничительными шайбами). Сравнение показало приемлемое совпадение результатов (среднее отклонение по всему диапазону не превышает 8,5 % или 5 м/с). Таким образом, численная модель достаточно адекватно отражает аэродинамику изотермического течения.

V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сопоставление визуализации топливных струй с помощью математического и физического моделирования для трех рассматриваемых режимов работы для сечения II-II представлено на рис. 4. Рисунки иллюстрируют, что изменение проходных сечений и перераспределение воздуха по каналам влияет как на глубину проникновения струй из всех каналов, так и на результирующую аэродинамическую картину. Вместе с тем, во всех исследованных режимах сохраняются ярко выраженные вихри как в вертикальной (рис. 4 а, б, в, г, д, е), так и в горизонтальной плоскости (рис. 5-7), что говорит о высокой степени массообмена между струями и продуктами сгорания и устойчивости аэродинамики топки к изменениям режимных факторов.

Наиболее существенным образом изменения сказываются на горелочных

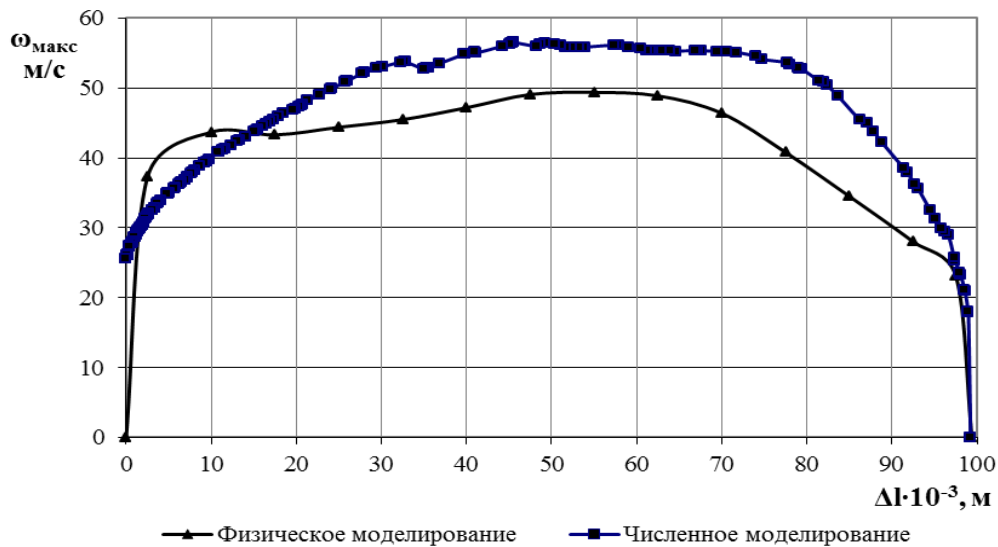


Рис. 3. Изменение максимальной скорости ω_{max} (м/с) на срезе ПГ по вертикальной оси в зависимости от расстояния $\Delta l \cdot 10^{-3}$ (м) от нижней границы.

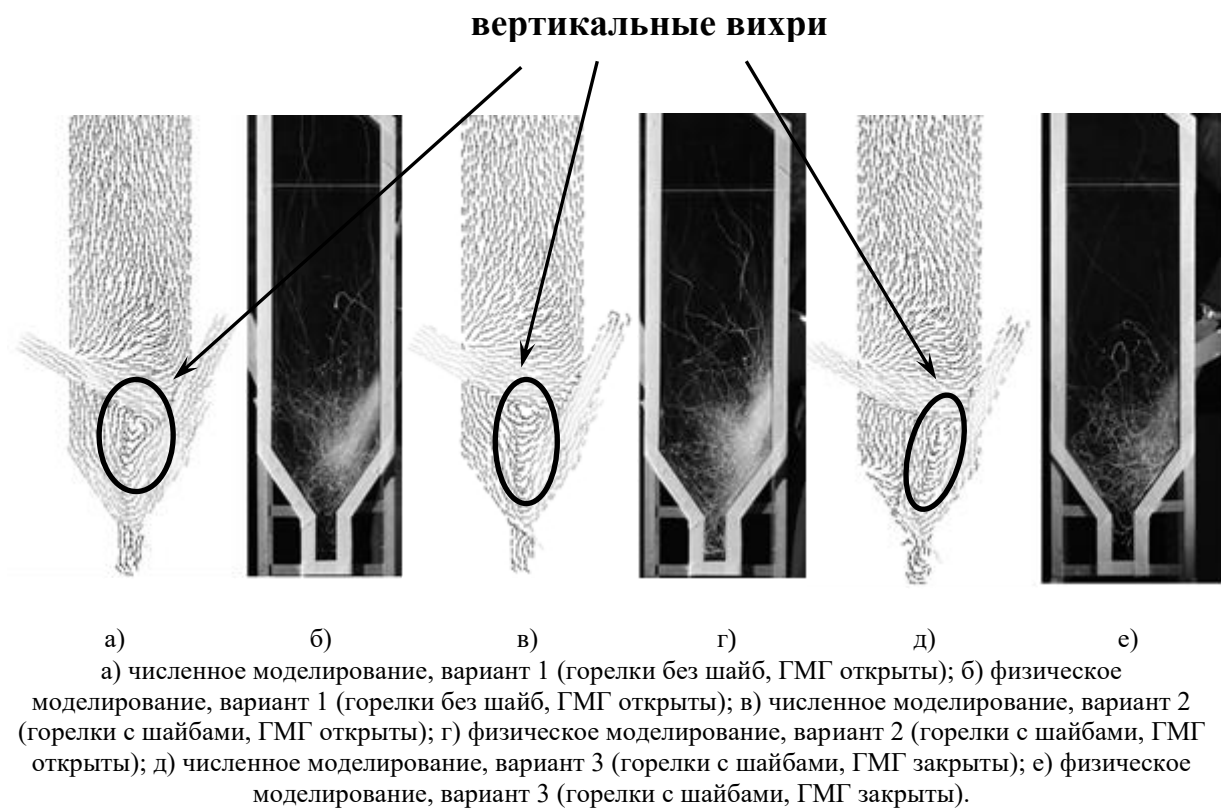
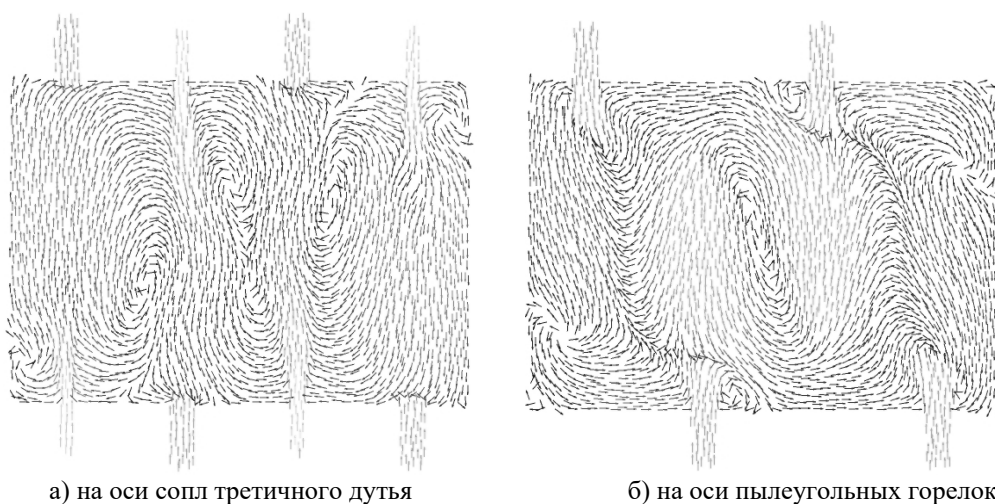


Рис. 4. Истечение струй из пылеугольных горелок по результатам численного и физического моделирования.

струях. В режиме без ограничительных шайб горелочные струи обладают наибольшей дальностью (рис. 4 а, б), в режиме с закрытыми ГМГ и ограничительными шайбами – наименьшей (рис. 4 д, е). Ослабление горелочных струй в режиме с закрытыми ГМГ приводит к их смещению к

скатам холодной воронки, что может представлять опасность с точки зрения шлакования (рис. 4 д, е).

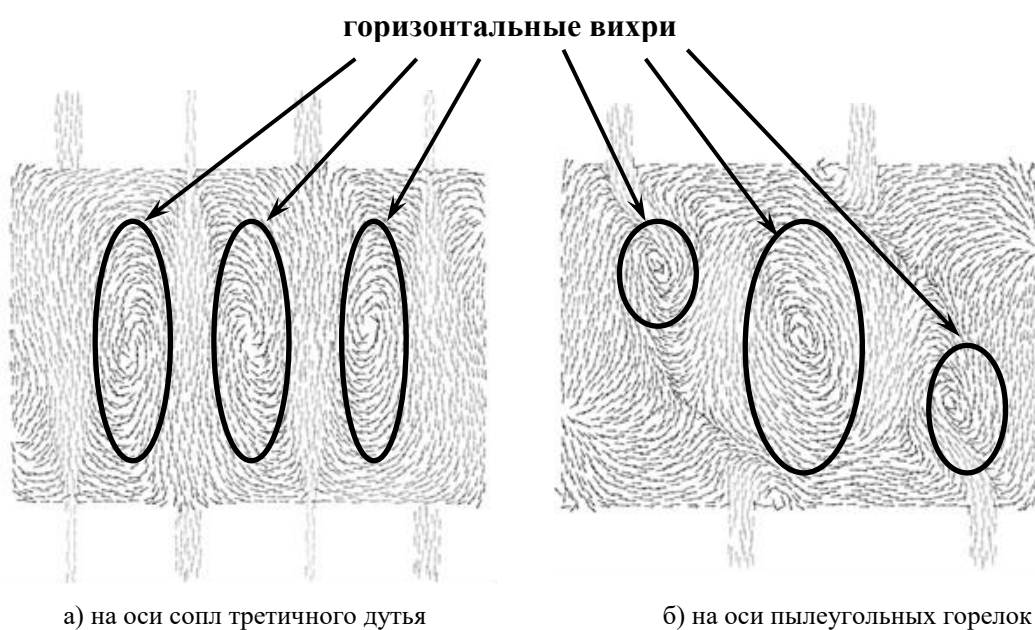
Сравнение режимов с открытыми каналами ГМГ показывает, что в случае установки шайб в ПГ вихри в вертикальной плоскости теряют свою интенсивность



а) на оси сопл третичного дутья

б) на оси пылеугольных горелок

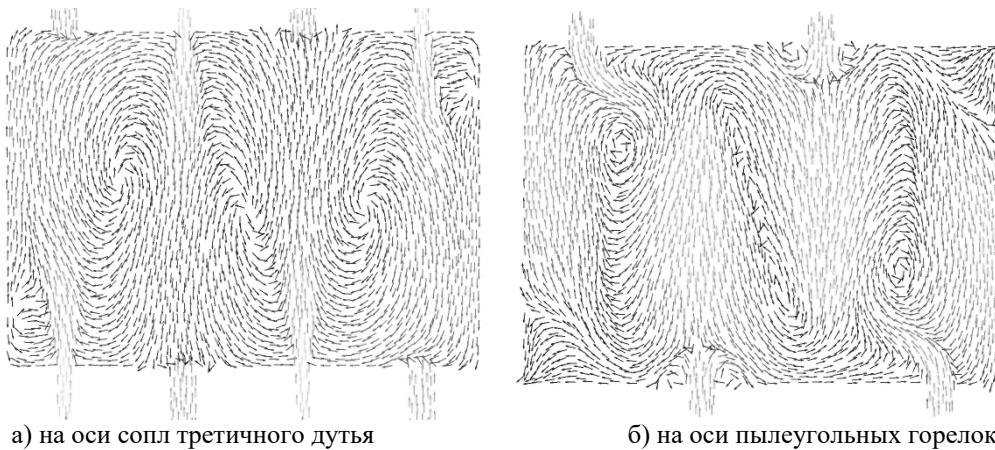
Рис. 5. Движение газов в горизонтальной плоскости, вариант 1 (горелки без шайб, ГМГ открыты).



а) на оси сопл третичного дутья

б) на оси пылеугольных горелок

Рис. 6 Движение газов в горизонтальной плоскости, вариант 2 (горелки с шайбами, ГМГ открыты).



а) на оси сопл третичного дутья

б) на оси пылеугольных горелок

Рис. 7 Движение газов в горизонтальной плоскости, вариант 3 (горелки с шайбами, ГМГ закрыты).

(сравнение рис. 4 а, б и рис. 4 в, г), зато более очерченными становятся вихри в горизонтальной плоскости (сравнение рис. 5 а, б и рис. 6 а, б). Следовательно, при снижении доли воздуха, подаваемого в горелки, массообмен смещается из вертикальной плоскости в горизонтальную.

Качественное сравнение траекторий выхода струй для третьего режима (без ГМГ), полученное по результатам численного и физического моделирования (рис. 4) показывает удовлетворительное совпадение. Незначительное отклонение от результатов искровых продувок можно наблюдать для струй СТВ, что не сказывается на общей аэродинамической картине топочной модели.

Заключение

Высокая стабильность положения вихрей, выявленная как при расчетах с помощью математической модели, так и на физической модели, увеличивает время пребывания угольной пыли в зоне горения и делает возможным ее сжигание при более низких значениях температур, что в конечном итоге, вместе с переходом на твердое шлакоудаление, позволит существенно снизить образование оксидов азота. Сравнение вариантов показало, что наиболее предпочтительным с точки зрения снижения вероятности шлакования является горение с избытками воздуха в ПГ (без ограничительных шайб) и с полностью открытыми каналами газомазутных горелок.

Вариант с закрытыми каналами ГМГ не допустим, т.к. серьезным техническим ограничением является попадание струй ПГ на скаты холодной воронки с последующим шлакованием и перегревом экранной системы. Каналы ГМГ, которые при сжигании угольной пыли являются воздушными, создают подушку, отделяющую топливную струю от скатов холодной воронки; когда эти каналы закрыты возможно выпадение большой доли несгоревших частиц топлива через холодную воронку.

Сравнение режимов с открытыми каналами ГМГ показывает, что в случае установки шайб перед ПГ вихри в вертикальной плоскости теряют свою интенсивность, зато более очерченными становятся вихри в горизонтальной плоскости. Следовательно, при снижении доли первичного воздуха, подаваемого в

горелки, массообмен смещается из вертикальной области в горизонтальную.

Выполнена валидация численной модели, заключающаяся в сравнении результатов математического моделирования с опытными данными, полученными на физической модели. Сравнение скоростей вдоль вертикальной оси на выходном срезе ПГ в зависимости от расстояния от нижней границы по результатам численного и физического моделирования для различных режимов показало приемлемое совпадение.

Это позволяет использовать в дальнейшем разработанную математическую модель для расчетов при различных скоростях потоков ПГ и сопл, меняя их ориентацию и расположение.

Литература (References)

- [1] GOST R 50831-1995 *Ustanovki kotel'nye. Teplomekhanicheskoe oborudovanie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State standard R 50831-95. Boiler plants. Heat-mecanical equipment. General technical requirements]. Moscow, 1995.14 p.
- [2] *Federal'nyi zakon №219, 22.07.2014 O vnesenii izmeneniy v Federal'nyi zakon «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» i ot del'nye zakonodatel'nye akty RF* [On amendments to the Federal law "About environmental protection" and separate legislative acts of the Russian Federation. Law of the Russian Federation No 219]. Moscow 22.07.2014.
- [3] G.B. Malone, *Computational Analysis of Secondary Air Flow in a Wall-Fired Power Plant*, Ph.D Dissertation, Tennessee Technological University, 2002.
- [4] J.A. LaRose, M.W. Hopkins, Numerical Flow Modeling of Power Plant Windboxes, *Power-Gen Americas '95, December 5-7*, Anaheim, California, USA, 1995.
- [5] C. Bhasker Simulation of air flow in the typical windbox segments *Adv. Eng. Software*, 33 (2002), pp. 793-804
- [6] R. Vuthalura, H.B. Vuthaluru Modelling, of a wall-fired furnace for different operating conditions using FLUENT. *Fuel Process. Technol.*, 87 (2006), pp. 633-639
- [7] Philip J. Stopford Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries, *Applied Mathematical Modelling* 26 (2002) 351-374
- [8] Gil' A.V., Starchenko A.V., Zavorin A.S. *Primenenie chislennogo modelirovaniya topochnykh protsessov dlya praktiki perevoda kotlov na neproektnoe toplivo : monografiya*. [Appliance of numerical simulation of furnace processes for boiler modernization for non-

- standard fuels combustion : monograph]. Tomsk: STT, 2011. 184 pp.
- [9] Filkoski Risto V., Petrovski Ilija J., Karas Piotr. Optimisation of pulverised coal combustion by means of CFD/CTA modelling // *Thermal Science (An International Journal)*, Vol. 10, No. 3, 2006. pp. 161-179.
- [10] Cristiano V. da Silva, Maria Luiza S. Indrusiak, Arthur B. Beskow. CFD Analysis of the Pulverized Coal Combustion Processes in a 160 MWe Tangentially-Fired-Boiler of a Thermal Power Plant // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. XXXII, No. 4, 2010. pp. 427-436.
- [11] Krasinsky D.V., Salomatov V.V., Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Y., Anikin Y.A. Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. Part 1: Flow aerodynamics in a vortex furnace, *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, Volume 62, Issue 2, 1 February 2015, pp. 117-122
- [12] Shestakov S.M. Tekhnologii szhiganiya mestnykh vidov tverdogo topliva [Technologies of combustion of indigenous types of solid fuels]. *Novosti teplosnabzheniya – News of heating supply*, 2013, №10 (158), pp. 32-36 (In Russian).
- [13] Audai Hussein Al-Abbas, Jamal Naser Computational fluid dynamic modelling of a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions, *Procedia Engineering* 56 (2013) 387 – 392
- [14] Mike Kryjak, James Dennis, Graeme Ridler NOx reduction using advanced techniques in a 175MWth multi-fuel corner-fired boiler, *Energy Procedia* 120 (2017) 689–696
- [15] Tai Lv , Qian Wang ,Jie Leng Numerical and Experiment Research for Soft Coal under Condition of Blending Lignite, *Energy Procedia* 17 (2012) 1001 – 1006
- [16] João Silva, José Teixeira, Senhorinha Teixeira, Simone Preziati, João Cassiano CFD Modeling of Combustion in Biomass Furnace, *Energy Procedia* 120 (2017) 665–672
- [17] Puzyrev E.M. e.a. *Vikhrevaya kamernaya topka* [Swirl-type chamber furnace]. Patent RF, no. 2158877, 2010.
- [18] James T. Hart, Md. Rezwanul Karim, Arafat A. Bhuiyan, Peter Witt, Jamal Naser Numerical modelling of unsteady flow behaviour in the rectangular jets with oblique opening, *Alexandria Engineering Journal* (2016) 55, 2309–2320
- [19] Anil Purimetla, Jie Cui CFD studies on burner secondary airflow, *Applied Mathematical Modelling* 33 (2009) 1126–1140
- [20] Arkhipov A.M., Lipov Yu.M., Prokhorov V.B. *Ispol'zovanie pryamotoknykh gorelok i sopl v topkakh kotlov: Innovatsionnyi opyt MEI* [Realization of direct-flow burners and nozzles in boiler installations furnaces: MPEI's innovation experience]. –M.: Izdatel'stvo MEI, 2013. – 240 pp.
- [21] *Engineering Simulation & 3-D Design Software* [ANSYS]. Available at: <https://www.ansys.com/> (accessed 12.03.2018)
- [22] ANSYS FLUENT, 14.5. (2014). *User's and theory guide*. Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc.
- [23] Karthik T.S.D. Turbulence models and their applications / *10th Indo German Winter Academy*. 2011.
- [24] Poinso T., Veynante D. Theoretical and numerical combustion/ - *2nd ed. R.T. Edwards. Inc.*, 2005. 522 pp.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10463 от 12 мая 2016 г.)

Сведения об авторах.



Прохоров Вадим Борисович,

кандидат технических наук, профессор кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: котельные установки, аэродинамика горения, охрана окружающей среды, моделирование.

E-mail: ProkhorovVB@mpei.ru



Чернов Сергей Львович,

кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, струйные и вихревые течения.

E-mail: chernovserl@gmail.com



Киричков Владимир Сергеевич,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, охрана окружающей среды, моделирование.

E-mail: KirichkovVS@mail.ru



Каверин Александр

Александрович,

ассистент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, численное моделирование.

E-mail: alexander_7@bk.ru