

The Coal Dust Combustion Scheme for an Invert Furnace of an A-USC M-Shaped Boiler

Prokhorov V.B., Kirichkov V.S., Chernov S.L., Fomenko N.E.

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

Abstract. The M-shaped boiler construction for the advanced ultrasupercritical steam parameters (A-USC) is proposed in this work. The boiler was designed to operate in a 500 MW unit on low volatile hard coal. This design allows reducing the pipelines length of the high cost steam pipelines made of nickel alloys. A downstream (invert) furnace is offered for this boiler type. The coal dust burning scheme design using the direct-flow burners and nozzles in a system of vertical and horizontal tangential torches and the solid ash removal are proposed. This approach was extensively used earlier on standard shaped boilers, and it was upgraded now for an invert furnace. The goals are achieved by conducting research on the physical furnace model and thermal furnace processes numerical simulation by computational fluid dynamics software. The most significant research results were as follows: the oxidizer stage supply was performed along the torch length and furnace height; the dynamic jet pressure on the furnace walls was excluded; a high degree of coal burnout was ensured due to the vortex furnace aerodynamics implementation; the uniform furnace section filling with air jets was performed; turbulent jets ejection was significantly higher than that for a flat submerged jet; chemical underburning loss did not exceed 0.1%; and unburned carbon loss was 0.8%. The carbon monoxide concentration at the furnace outlet in terms of air excess ratio equal to $\alpha=1.4$ was 226 mg/nm^3 . The nitrogen oxides concentration in the flue gases (normalized) was 424 mg/nm^3 . The results significance obtained during the research is efficient solid fuel use with high technical and economic boiler performance.

Keywords: steam boilers, coal fuel, vortex flame, staged combustion, nitrogen oxides, ultra-supercritical steam parameters, fuel combustion efficiency.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.04>

UDC: 621.311:621.18:502

Dezvoltarea schemei de ardere a prafului de cărbune pentru cuptorul inversat al cazanului cu profil M pentru parametrii ultra-supercritici ai aburului

Prohorov V.B., Kiricikov V.S., Cernov S.L., Fomenko N.E.

Universitatea energetică din Moscova (Universitatea Națională de cercetare)
Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Scopul acestei lucrări este elaborarea și studierea schemei cuptorului inversat al cazanului în formă de M eficient pentru ardere a cărbunelui pulverizat folosind arzătoare cu flux direct și duze în sistemul de flăcări tangențiale verticale și orizontale în modul de îndepărtare a zgurii solide. Obiectivele stabilite sunt atinse prin efectuarea de cercetări asupra modelului fizic al cuptorului la realizarea schemei de combustie dată cu modelarea paralelă a proceselor termice din cuptorul cazanului prin intermediul dinamicii fluidelor computaționale, care împreună vor asigura o fiabilitate ridicată a datelor obținute. Cele mai importante rezultate ale cercetărilor sunt următorii parametri ai aerodinamicii cuptorului: dispunerea aprovizionării cu oxidant în etape de-a lungul lungimii flăcării și înălțimii cuptorului; excluderea presiunii dinamice a jeturilor pe pereții cuptorului; asigurarea unui grad ridicat de ardere a particulelor de praf de cărbune datorită realizării aerodinamicii turbionare a cuptorului; umplerea uniformă a secțiunii transversale a cuptorului cu jeturi de aer; inducția jeturilor turbulente a fost mult mai mare, decât în cazul jeturilor inundate plate; pierderile de căldură cu subarderea combustibilului chimic nu depășesc conținutul de monoxid de carbon la ieșirea din cuptor în recalcularea pentru un exces de aer egal cu $\alpha=1,4$ a fost de 226 mg/Nm^3 , iar concentrația de oxizi de azot din gazele de ardere (redușă la condiții normale) a fost de 424 mg/Nm^3 . Semnificația rezultatelor, obținute în cursul cercetării, constă în utilizarea eficientă a combustibilului solid la indicatori tehnici și economici ridicați ai funcționării cazanelor.

Cuvinte-cheie: cazane cu abur, combustibil de cărbune, flăcără vortex cu flux direct, ardere etapizată, oxizi de azot, parametrii aburului ultra-supercritic, eficiența arderii combustibilului.

Разработка схемы сжигания угольной пыли для инвертной топки котла М-образного профиля на ультрасверхкритические параметры пара

Прохоров В.Б., Киричков В.С., Чернов С.Л., Фоменко Н.Е.

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Москва, Российская Федерация

Аннотация. Для ультрасверхкритических параметров (УСКП) пара предложена конструкция котла М-образного профиля, предназначенного для работы в блоке мощностью 500 МВт на каменном угле марки Т. При такой компоновке котла удастся значительно сократить длину паропроводов, что особенно актуально при ультрасверхкритических параметрах перегретого пара из-за высокой стоимости паропроводов, выполненных из никелевых сталей. Для такого типа котла предложено топочную камеру выполнить нисходящей (инвертной). Целью данной работы является разработка и исследование модернизированной для инвертной топки котла М-образного профиля эффективной схемы сжигания угольной пыли с использованием прямооточных горелок и сопел в системе вертикальных и горизонтальных тангенциальных факелов в режиме твердого шлакоудаления. Поставленные цели достигаются за счет проведения исследований на физической модели топки при реализации данной схемы сжигания с параллельным моделированием тепловых процессов в топке котла средствами вычислительной гидродинамики, что в совокупности обеспечит высокую достоверность полученных данных. Наиболее существенными результатами исследований являются следующие показатели топочной аэродинамики: организация стадийного подвода окислителя по длине факела и по высоте топки; исключение динамического давления струй на стены топки; обеспечение высокой степени выгорания частиц угольной пыли за счет реализации вихревой аэродинамики топки; равномерное заполнение сечения топки воздушными струями; эжекция турбулентных струй оказалась значительно выше, чем для плоской затопленной струи; потери теплоты с химическим недожогом топлива не превышают 0.1%; потери с механическим недожогом 0.8%. Содержание монооксида углерода на выходе из топки в пересчете на избыток воздуха равный $\alpha=1.4$ составило 226 мг/нм³, концентрация оксидов азота в уходящих газах (приведенная к нормальным условиям) составила 424 мг/нм³. Значимость полученных в ходе исследований результатов заключается в эффективном использовании твердого топлива при высоких технико-экономических показателях работы котла.

Ключевые слова: паровые котлы, угольное топливо, прямооточно-вихревой факел, ступенчатое сжигание, оксиды азота, ультрасверхкритические параметры пара, эффективность сжигания топлив.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в России отмечается важность и необходимость перехода на более высокие КПД производства электроэнергии [1]. Технология использования ультрасверхкритических параметров пара (температура – 700-760 °С, давление – 35 МПа), способствует повышению КПД термодинамического цикла Ренкина угольных энергоблоков свыше 50% [2]. При таких параметрах перегретого пара неизбежно применение дорогих никелевых сплавов [3]. Если цена применяемых конструкционных материалов до максимальных температур перегретого пара 560 °С равна 20-30 дол/т, то сплавы на основе никеля достигают стоимости до 480 дол/т, т.е. более чем на порядок выше [4, 5]. При этом в общей структуре стоимости энергоблока с УСКП пара на долю паропроводов приходится около 20%, что приводит при проектировании котла, турбины и их взаимной компоновки к стремлению экономии средств за счет уменьшения длины паропроводов из дорогих никелевых сплавов. Поэтому необходимо максимально сократить

длину паропроводов основного и вторичного пара, что сократит стоимость энергоблока. В связи с этим для энергоблока мощностью 500 МВт на УСКП параметры пара на котле, сжигающем низкорреакционный уголь, применены следующие решения:

1) инвертная топочная камера, т.е. дымовые газы движутся в топке сверху вниз. Горелки и сопла располагаются в верхней трети топки, а выход дымовых газов из топки – в нижней трети. Благодаря такому профилю выходные коллекторы пароперегревателей основного и вторичного пара удастся расположить значительно ниже, чем в традиционных котлах, из-за более низкого расположения наклонных газоходов;

2) перегреватели основного и вторичного пара разделены по двум противоположным наклонным газоходам, что позволяет установить их выходные коллекторы примерно на одном уровне;

3) котел выполняется однокорпусным, а турбина располагается рядом с котлом, вдоль задней стены топки, наклонных газоходов и конвективных шахт. Достаточно близкое расположение выходных коллекторов

пароперегревателей и турбины позволяет дополнительно сократить длину паропроводов и сократить общую металлоемкость котла;

4) выходные коллекторы перегревателей основного и вторичного пара выполняются под наклонными газоходами, а не традиционно сверху;

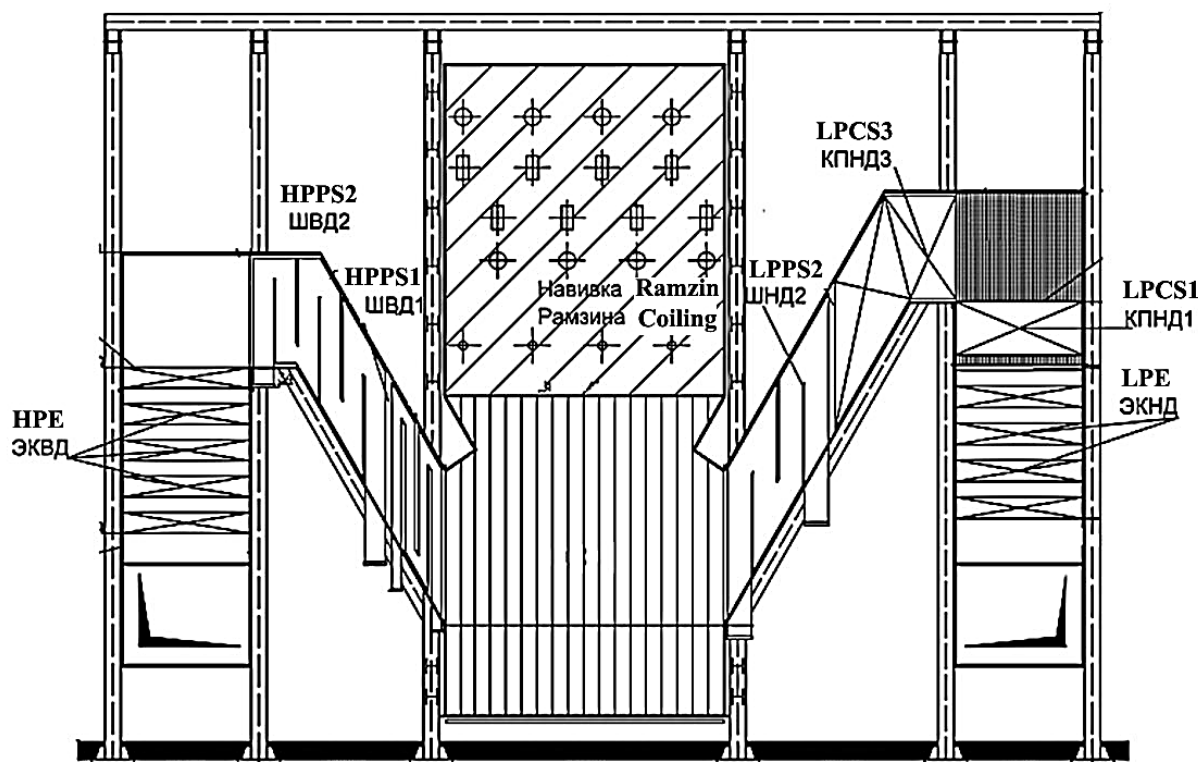
5) расположение горелок вверху топки и их направление вверх с организацией вихрей в горизонтальной и вертикальной плоскостях позволяет увеличить время пребывания частиц топлива в объеме топки, что приводит к повышению степени выгорания топлива и, как следствие, к снижению содержания горючих веществ в шлаке и в золе уноса, т.е. снижает величину механического недожога q_4 ;

6) снижается величина уноса золовых частиц с дымовыми газами за счет их сепарации при входе в газовое окно и выпадения через холодную воронку, что приводит к снижению интенсивности золового износа конвективных поверхностей нагрева;

7) по сравнению с П-образной и башенной компоновками увеличивается располагаемая площадь для размещения ширмовых пароперегревателей.

Разрез котла М-образного профиля на ультрасверхкритические параметры пара приведен на рис. 1.

Указанные решения позволяют снизить высоту установки выходных коллекторов пароперегревателей примерно с 70 м до 20 м, что приводит к снижению общей длины паропроводов в 2.5-3 раза.



HPSS – high-pressure platen superheater; LPPS – low-pressure platen superheater; HPPE – high-pressure economizer; LPE – low-pressure economizer; LPCS – low-pressure convection superheater.

Figure 1. The developed M-shaped boiler layout.

ЭКВД – экономайзер на стороне генерации пара высокого давления; ЭКНД – экономайзер на стороне генерации пара низкого давления; ШВД1 и ШВД2 – ширмовые пароперегреватели 1 и 2 ступеней на стороне генерации пара высокого давления; ШНД2 и КПНД3,1 – ширмовый и конвективный пароперегреватели низкого давления.

Рис. 1. Разрез котла ультрасверхкритических параметров пара М-образного профиля.

При разработке основных положений по ступенчатому сжиганию топлив в прямоточно-вихревом факеле (ПВФ) для котлов большой мощности и последующей проработки схем размещения прямоточных горелок и сопл был использован метод физического и математического моделирования аэродинамики топочной камеры, что позволило определить основные параметры прямоточных струй (скорости, характеристики закрученных потоков и взаимодействия струй и др.). Для физического моделирования изготовлены модели топков котлов. По нормативному методу проведены тепловые позонные расчеты топки. Траектории движения струй при физическом моделировании визуализировались с помощью фотографирования светящихся опилок, также с помощью электрического подогрева отдельных струй определялись их тепловые границы для последующего изучения их эжекционной способности. Численное моделирование выполнялось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Сопоставление результатов физического и численного моделирования позволяет оценить сходимость искомых величин и правильность выбранных моделей.

Предлагаемый котел М-образной компоновки рассчитан на работу в блоке с турбиной 500 МВт. Котел прямоточный с промежуточным перегревом пара и твердым шлакоудалением. Номинальная паропроизводительность составляет 1320 т/ч, расход пара на промперегрев – 1122 т/ч. Давление перегретого пара равно 36 МПа, температура свежего пара и пара промперегрева равна 710 °С. В соответствии с рекомендациями [6] выполнен тепловой конструктивный расчет котла. По результатам расчета КПД котла брутто составил 91.77%, расчетный расход топлива 145.4 т/ч, полезное тепловыделение в топке – 29.5 МДж/кг.

I. ОРГАНИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК И СОПЛ ДЛЯ ИНВЕРТНОЙ ТОПКИ КОТЛА М-ОБРАЗНОГО ПРОФИЛЯ

Эффективное сжигание твердого топлива в системе турбулентных прямоточных струй возможно при соблюдении следующих принципов [7]:

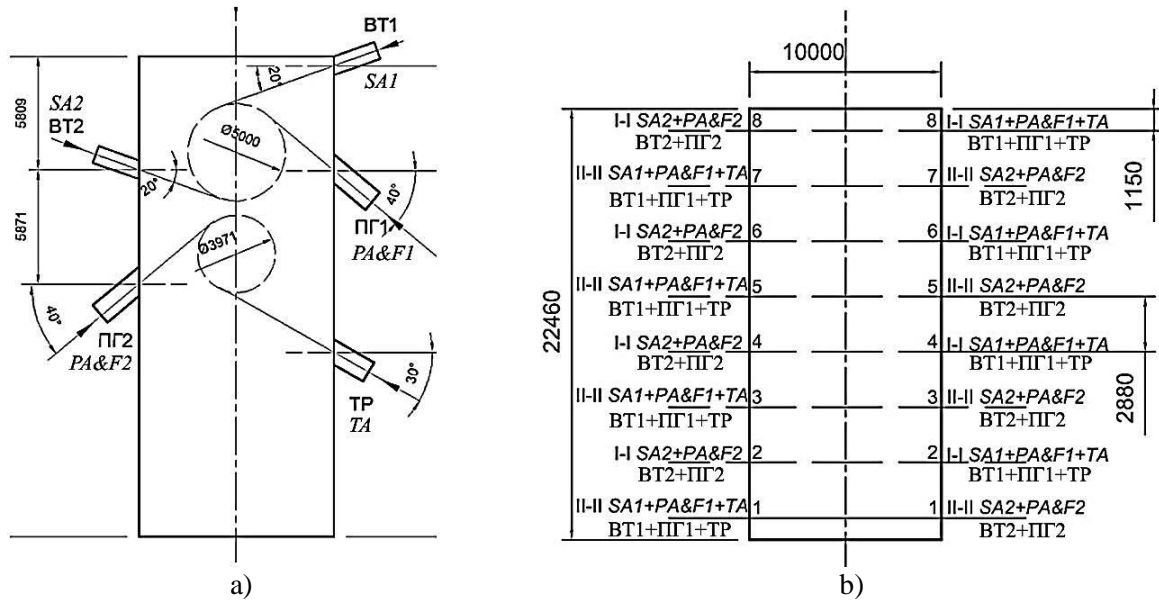
- принятие минимально возможного избытка первичного воздуха;
- задержка подмешивания к факелу вторичного и третичного воздуха;
- значительный наклон пылеугольных горелок;
- увеличение периметра зажигания;
- рассредоточение ядра факела по ширине, глубине и высоте топки;
- принудительный подвод топочных газов к корням горелочных струй;
- организация в объеме топки вихрей вращающихся в противоположных направлениях;
- исключение зон повышенного динамического давления факела на экранные трубы.

Ориентируясь на данные принципы, разработаны и исследованы несколько схем сжигания угольной пыли с различными расположениями прямоточных горелок и сопл для инвертной топки котла М-образного профиля. Анализ аэродинамики рассматриваемых схем выполнялся с помощью численного моделирования движения струй в объеме экспериментальной установки. В итоге была выбрана наиболее удачная в аэродинамическом отношении схема компоновки горелок и сопл, рекомендуемая к использованию в инвертной топочной камере (рис. 2).

На рисунке приняты следующие обозначения: ПГ1 – пылеугольная горелка верхнего яруса; ПГ2 – пылеугольная горелка нижнего яруса; ВТ1 – сопло вторичного воздуха верхнего яруса; ВТ2 – сопло вторичного воздуха нижнего яруса; ТР – сопло третичного воздуха. В нечетных сечениях горелки и сопла расположены по зеркальному отображению.

Каналы горелок и сопл представляют собой коробки прямоугольного сечения, горелки ПГ1 и ПГ2 устанавливаются под углом 40° вверх, воздушные сопла ВТ1 и ВТ2 устанавливаются с наклоном вниз, а сопла ТР с наклоном вверх. Каналы пылеугольных горелок имеют в выходной части рассекатель, который устанавливается в центре канала и служит для увеличения периметра эжекции и снижения дальности выходящих струй. В горелки ПГ1 и ПГ2 подается аэропыль с избытком воздуха $\alpha_{пт}=0.219$, в сопла ВТ1 $\alpha_{вт1}=0.2$; в сопла ВТ2 $\alpha_{вт2}=0.32$; в сопла ТР $\alpha_{тр}=0.441$. Скорости сред на выходе из каналов принимались следующими: на выходе из

горелок 25 м/с, на выходе из воздушных сопел 41 м/с на номинальной нагрузке.



PA&F1 – upper level pulverized coal burner; PA&F2 – lower level pulverized coal burner; SA1 – upper level secondary air nozzle; SA2 – lower level secondary air nozzle; TA – tertiary air nozzle.

Figure 2. The location scheme of direct-flow burners and nozzle.

a) вертикальное сечение топки котла; б) горизонтальное сечение топки котла.

Рис. 2. Схема компоновки прямоточных горелок и сопел в инвертной топке.

II. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ИНВЕРТНОЙ ТОПКЕ

Достигнутый уровень аппаратного и программного обеспечения позволяет использовать метод численного моделирования с достаточной точностью. Одним из главных его достоинств является возможность исследовать особенности аэродинамики, теплообмена и горения топлива внутри топки, не прибегая к дорогостоящему огневому физическому моделированию или натурным испытаниям, а также моделировать такие режимы работы топки, которые осуществить при натурных испытаниях на действующем оборудовании не представляется возможным.

Целью численного моделирования горения топлива являлась проверка основных показателей топки, характеризующих эффективность, экологическую безопасность и надежность ее работы: полноты выгорания топлива, распределения температур газов по высоте и в горизонтальных сечениях, концентрации газообразных компонентов по

высоте топки (O₂, CO и NO) [8-14]. Получить информацию о данных величинах другими методами, кроме численного моделирования, представляет значительные трудности и для нового проектируемого котельного агрегата данный метод фактически не имеет альтернативы.

В случае численного анализа внутритопочных процессов, наибольший перевес имеет программный продукт ANSYS Fluent [15], апробированный в решении задач самого широкого класса – от пылеугольных котлов малой и средней мощности до котлов с ЦКС и обладающий широким набором готовых моделей и инструментов для описания внутритопочных процессов. На основании приведенных выше соображений предпочтение в этой работе отдано именно этому программному продукту, подходящему под данные задачи и успешно применяемому при моделировании горения в котельных установках [10].

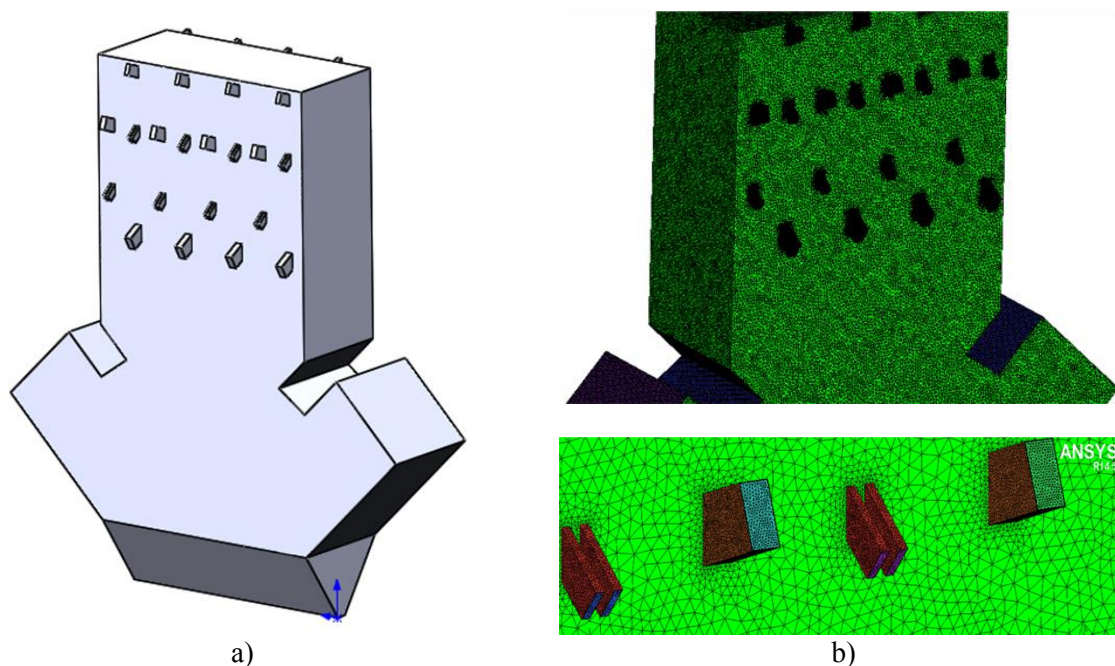
Для создания 3D модели расчетного объема топки использовался программный комплекс SolidWorks (рис. 3а). Для исключения влияния обратных токов в выходных сечениях модели в 3D геометрию включены части наклонных

восходящих газоходов котла длиной 5 м. Ширмовые поверхности нагрева не включались в расчетный объем. В программе ANSYS ICEM для расчетного объема создана расчетная сетка (рис. 3b). Сетка состоит из 3,9 млн. ячеек и выполнена из тетраэдров с двумя слоями призм в пограничном пристеночном слое для учета ламинарного вязкого слоя.

Принятая математическая модель топки включает в себя следующую систему уравнений [15, 16]: уравнение неразрывности; уравнение сохранения энергии; уравнение сохранения количества движения; уравнения переноса химических реагентов и продуктов реакции (уравнения диффузии); уравнение переноса лучистой энергии; уравнения состояния; уравнения для дискретной фазы.

При выполнении работы использовалась Realizable $k-\epsilon$ -модель турбулентности, с пристеночной функцией Scalable. Задача движения частиц топлива решалась применением модели Discrete Phase Model (DPM) с законом трения между частицами и

газом Spherical. Скорость выхода летучих описывалась по модели Single Kinetic Rate, модель выгорания кокса – TheKinetic/Diffusion Surface Reaction Rate. Механизм горения кокса принят двухступенчатым: сначала углерод окисляется до монооксида углерода CO, а затем CO доокисляется до CO₂ гомогенной реакцией. Испарение влаги угольной пыли в топке в данной модели не учитывалось ввиду незначительного влагосодержания данной марки угля. Скорость горения газообразных горючих компонентов принята согласно кинетико-диффузионной модели Finite-Rate/Eddy-Dissipation, перенос тепловой энергии излучением – по модели Discret Ordinat (DO). Образование монооксида азота NO включает три составляющих: термические, быстрые и топливные. Образование термических NO_x принимается по механизму Зельдовича, быстрых по механизму Фенимора. Степень конверсии топливного оксида азота в NO принята равной 20%.



a) furnace 3D model; b) surface mesh of the furnace walls, burners and nozzles.

Figure 3. The estimated furnace volume for numerical simulation.

a) 3D модель топки; b) поверхностная сетка топочных стен и каналов горелок и сопел.

Рис. 3. Расчетный объем топки для численного моделирования схемы сжигания.

Граничные условия на входе для сушильного агента и горячего воздуха задавались массовыми расходами. Расход топлива рассчитывался по тепловому балансу котла и задавался в модели также массовым

расходом. Граничные условия на стенке задавались смешанными (Mixed). Коэффициент теплоотдачи рабочей среде 12 кВт/(м²·°С), средняя температура среды в трубах 360 °С; степень черноты стенок 0.45.

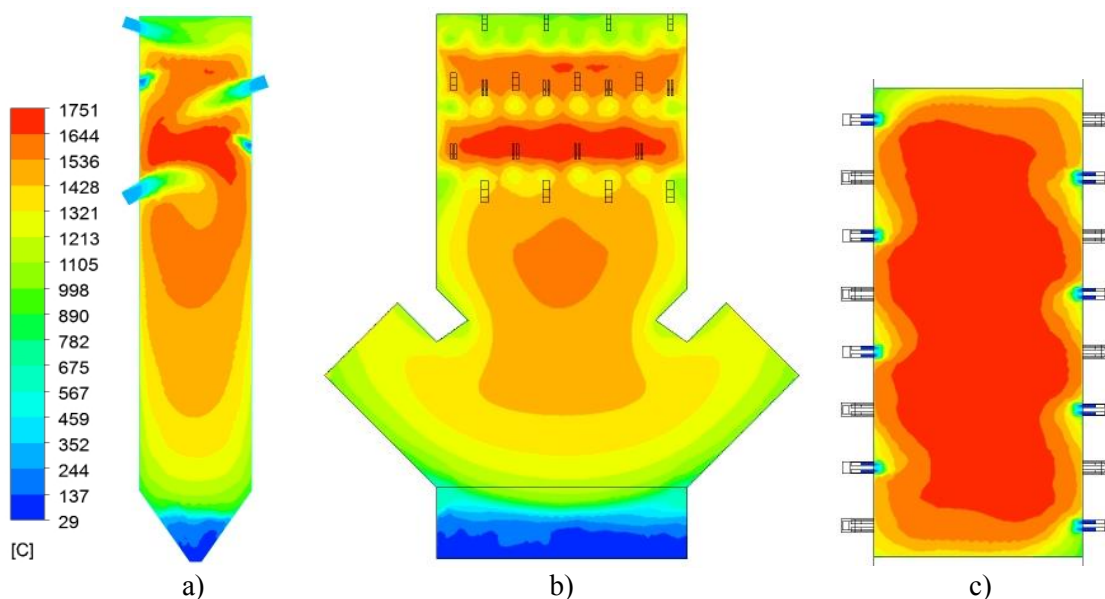
Степень шероховатости стенки 0.4 мм, толщина стенки 6 мм, коэффициент теплопроводности металла труб 40 Вт/(м·°С). Граничное условие на выходе из модели задавалось нулевым статическим давлением (Pressure-outlet). Степень черноты поверхности выходного сечения принята 0.45. Фракционный состав угольной пыли рассчитан на основе остатка на сите размером 90 мкм R_{90} , принятого из рекомендуемого в [17] диапазона для среднеходных валковых мельниц ($R_{90}=14\%$). В расчетах угольная пыль разбивалась по размерам на 10 фракций.

Расчет оканчивался, когда невязки по уравнению неразрывности достигали порядка 10^{-3} , по уравнению энергии порядка 10^{-6} , отсутствовал небаланс по массовым расходам на входе и выходе из модели и по полной энергии, а колебания температуры на выходе из топки и суммы выгоревшего кокса составляли $\pm 2^\circ\text{C}$ и $\pm 0,01$ кг/с соответственно.

Визуализация результатов численного моделирования представлена на рис. 4-6. Полученные результаты свидетельствуют о

высокой полноте выгорания топлива: потери с механическим недожогом топлива составили $q_4=0.8\%$. По концентрации CO на выходе из топки были также определены потери с химическим недожогом $q_3\approx 0.1\%$. Существующие в России нормы рекомендуют для тощих каменных углей держать потери q_4 не выше 2% при твердом шлакоудалении (ТШУ) и не выше 1.5% при жидком шлакоудалении [6].

Распределение температур в топке (рис. 4) показывает, что максимум температур сосредоточен на отметке нижнего яруса горелок и составляет 1751°C . Температуры в поперечном (рис. 4b) и горизонтальном (рис. 4c) сечениях распределяются равномерно, отсутствует прямое касание факелом стен топки. Подобные результаты указывают на корректно выбранный шаг сечений и число горелок. Температура газов на выходе из топки (перед ширмами) составила 1256°C , что должно исключить шлакование ширмовых поверхностей нагрева.



a) in the longitudinal section of burner №4; b) in the central cross section of the furnace; c) in a horizontal section at the level of the SA2 nozzles.

Figure 4. The temperature fields inside invert furnace.

a) в продольном сечении горелки №4; b) в центральном поперечном сечении топки; c) в горизонтальном сечении на отметке сопл ВТ2.

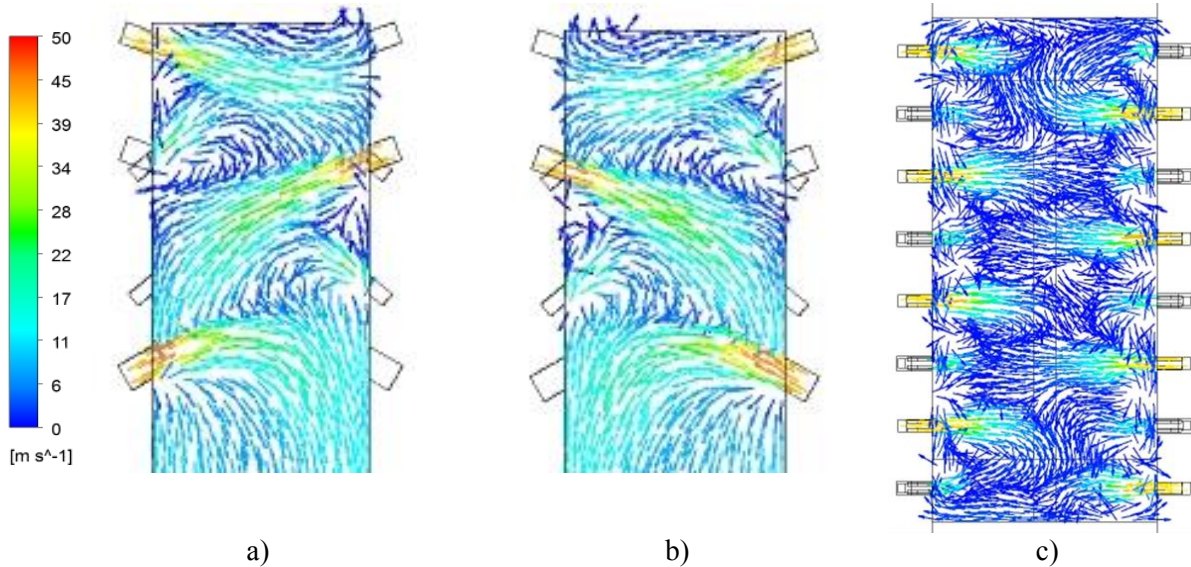
Рис. 4. Температурные поля в инвертной топке.

Анализ векторов скорости в топке (рис. 5) подтвердил качественную картину течения струй, полученную в результате численного и физического моделирования аэродинамики на

изотермическом стенде. Сравнение траекторий струй в двух соседних плоскостях расположения горелок (рис. 5a,b) демонстрирует их идентичность, что

свидетельствует о высокой устойчивости вертикальных вихрей. Следует также отметить интенсивное вихреобразование в горизонтальной плоскости, хорошо выраженное на рис. 5с. Рисунок иллюстрирует

значительные массы газов, омывающие струи из горелок ПГ2, что благоприятно сказывается на воспламенении топлива.



a) in the longitudinal section of burner №4; b) in the longitudinal section of burner №5; c) in a horizontal section at the level of the burners PA&F2.

Figure 5. The velocity vectors inside invert furnace.

a) в продольном сечении горелки №4; б) в продольном сечении горелки №5; в) в горизонтальном сечении на отметке горелок ПГ2.

Рис. 5. Векторы скорости в инвертной топке.

Содержание монооксида углерода на выходе из топки в пересчете на $\alpha=1.4$ по результатам численного моделирования составило 226 мг/нм^3 , при нормативном

значении 400 мг/нм^3 . Несмотря на выполнение нормативных значений, такая концентрация приводит к появлению химического недожога на уровне $q_3=0.1\%$.

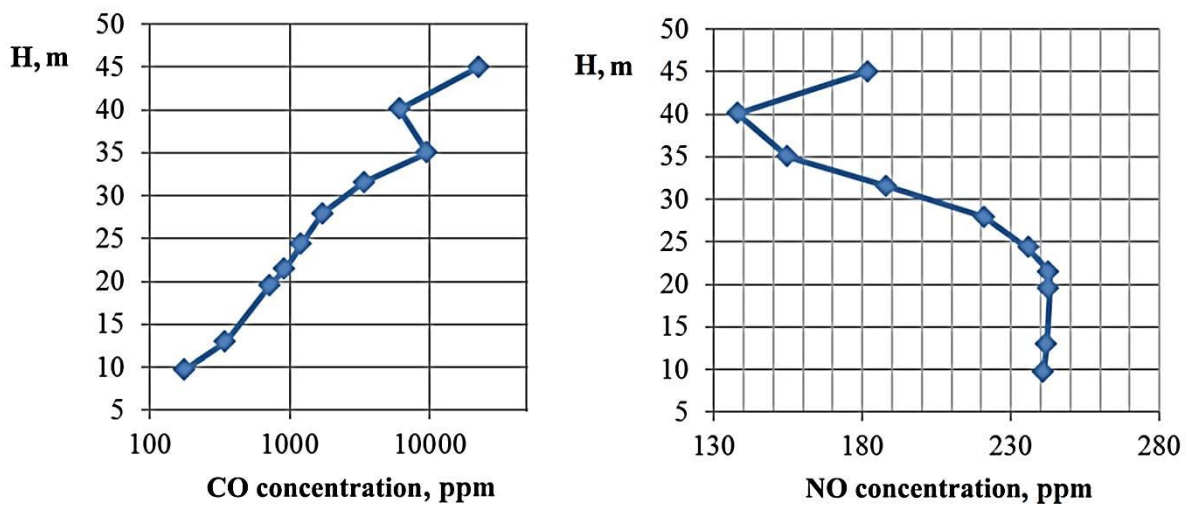


Figure 6. Changes average concentrations of CO and NO along the furnace height in the horizontal sectionals.

Рис. 6. Изменение средних по сечению концентраций CO и NO по высоте инвертной топки (Н, м).

Графики на рис. 6 показывают монотонное убывание концентрации CO с понижением отметки топки, при этом имеется локальный пик в концентрации на уровне горелок нижнего яруса. Содержание монооксида начинает ожидаемо резко падать ниже отметки в 30 м, т.е. после ввода третичного воздуха в топку.

По результатам расчета концентрация NO_x получилась равной 424 мг/м^3 . Нормативные значения удельных выбросов NO_x установлены в [18] и составляют 350 мг/м^3 для котлов, вводимых в эксплуатацию после 2001 г. и 540 мг/м^3 для котлов, введенных в эксплуатацию до 2001 г. Поэтому одних лишь первичных мер, предусмотренных для подавления NO_x в топке недостаточно. Для рассматриваемого котла рекомендуется предусмотреть селективное некаталитическое восстановление оксидов азота в продуктах сгорания. На графике рис. 6 показано изменение концентраций монооксида азота по высоте топки. Концентрация NO имеет минимум на уровне горелок ПГ1 и монотонно растет вплоть до завершения догорания топлива (отметка 20 м).

При решении сложных задач вычислительной гидродинамики разумным является совместное применение физического изотермического и численного моделирования истечения струй из горелок и сопл. Многие исследователи аэродинамики газовых потоков в России и других странах [19, 20], стремятся идти 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.

Верификация результатов численного моделирования проводилась путем качественного сравнения линий тока из горелок и сопл с визуализацией движения струй, полученных на экспериментальном стенде, и сравнением температур по высоте топки, полученным в результате теплового позонного расчета по методике [6].

Сопоставление результатов по разным методикам показало достаточное совпадение, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

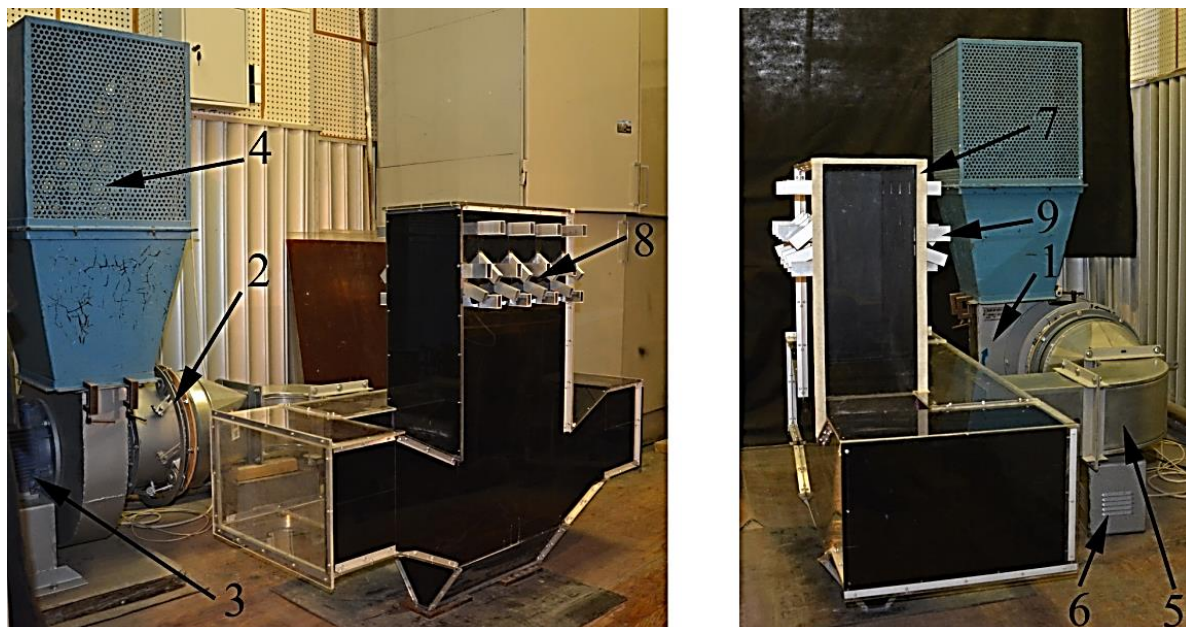
III. ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ РЕКОМЕНДУЕМОЙ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ ДЛЯ КОТЛА М-ОБРАЗНОГО ПРОФИЛЯ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Проведены исследования на физической модели топки при реализации данной схемы сжигания: качественное изучение траекторий движения горелочных струй, струй вторичного и третичного воздуха; количественное определение основных характеристик горелочных струй и прироста массы. Из анализа критериев подобия получены соотношения для расчета основных параметров изотермической модели топки котла М-образного профиля на УСКП пара, масштаб моделирования геометрических размеров топки m был принят равным $1/45$. Фотоснимки экспериментальной установки для исследования аэродинамики турбулентных струй, изготовленной с соблюдением теории изотермического физического моделирования топочных процессов, приведены на рис. 7.

С целью качественного изучения движения струй и визуализации их траекторий на физической модели топочной камеры проведены искровые продувки. Для этого древесные опилки, предварительно просеянные через мелкое сито, прокаливаются в муфельной лабораторной печи без доступа воздуха, далее лоток с тлеющими опилками поочередно подносится к каналам подачи топлива (ПГ1, ПГ2), вторичному (ВТ1, ВТ2) и третичному (ТР) дутью. За счет скольжения опилок относительно несущего их потока воздуха, они воспламеняются, подсвечивая траекторию движения струи. Траектории движения тлеющих частиц в модели фиксируются на цифровую зеркальную фотокамеру, установленную на штатив. Для большей контрастности и четкости изображений в затененном помещении выставляется прожекторная подсветка таким образом, чтобы выделялись контуры самой модели. Фотографирование осуществлялось через прозрачную боковую стенку модели.

Исследованы были все сечения расположения горелок и сопл, на рис. 8 приведены

траектории движения струй в одном из четных сечений.



1 – fan impeller VR 12-26-4K1; 2 – guide device; 3 – asynchronous electric motor with a power of 7.5 kW; 4 – spark extinguisher; 5 – connecting ducts; 6 – supports; 7 – model of the boiler furnace for the study of in-furnace aerodynamics; 8 – removable model panel; 9 – pipes of direct-flow burners and nozzles.

Figure 7. General view of a test installation for studying the M-shaped boiler furnace aerodynamics.

1 – рабочее колесо вентилятора ВР 12-26-4К1; 2 – направляющий аппарат; 3 – асинхронный электродвигатель мощностью 7.5 кВт; 4 – искрогаситель; 5 – присоединительные короба; 6 – опоры; 7 – модель топки котла для исследования внутритопочной аэродинамики; 8 – съемная панель модели; 9 – патрубки прямооточных горелок и сопл.

Рис. 7. Общий вид экспериментальной установки для исследования аэродинамики топки котла М-образного профиля.

По результатам качественного изучения аэродинамики рекомендуемой схемы компоновки прямооточных горелок и сопл на физической модели инвертной топки сделаны следующие выводы:

- организован стадийный подвод окислителя по длине факела и по высоте топки;

- резкое расширение пылеугольных струй свидетельствует о взаимодействии их с воздушными струями, которое происходит в центральной части топки;

- исключено повышенное динамическое давление топливоздушных струй (ПГ1 и ПГ2) на противоположные стены топки;

- воздушные струи ВТ1, ВТ2 и ТР равномерно заполняют сечение топки, обеспечивая эффективное ступенчатое сжигание угольной пыли;

- вихревая аэродинамика топки обеспечит высокую степень выгорания частиц угольной пыли;

- высокая стабильность положения вихрей позволяет предположить увеличение времени пребывания угольной пыли в зоне горения и возможность сжигания ее при более низких значениях температур, что позволит существенно снизить образование оксидов азота;

- низкие значения избытков воздуха на выходе из ПГ1 и ПГ2 при постепенном подводе воздуха в зону вихря через сопла ВТ1, ВТ2 и ТР реализуют ступенчатое сжигание угольной пыли с увеличением степени ее выгорания и температуры газов по длине каждого вихря при значительной величине внутренней рециркуляции продуктов сгорания в корнях струй.

Качественное изучение аэродинамики струйных течений и закрученных потоков

путем визуализации траекторий движения струй всех наименований подтвердило вероятность высокой эффективности работы данной схемы компоновки прямооточных горелок и сопел в инвертной топке.

При использовании прямооточных горелок, являющихся горелками коллективного действия, необходимо обеспечить принудительный подвод горячих топочных газов к корням топливоздушных струй, что обеспечит быстрый прогрев и раннее загорание топлива, и его эффективное сжигание. С точки зрения топочной аэродинамики наибольший интерес представляют топливоздушные струи и их

взаимодействие между собой, со вторичным и третичным воздухом. С целью определения количественных характеристик этого взаимодействия на физической модели топки котла разработана методика, позволяющая выделить, конкретную (интересующую) струю из нескольких потоков, определить ее границы за счет электрического подогрева и провести необходимые измерения. Для измерений физическая модель топки котла (рис. 7) была оснащена электронагревателем, термопарой, пьезометрическими зондами и координатными устройствами.

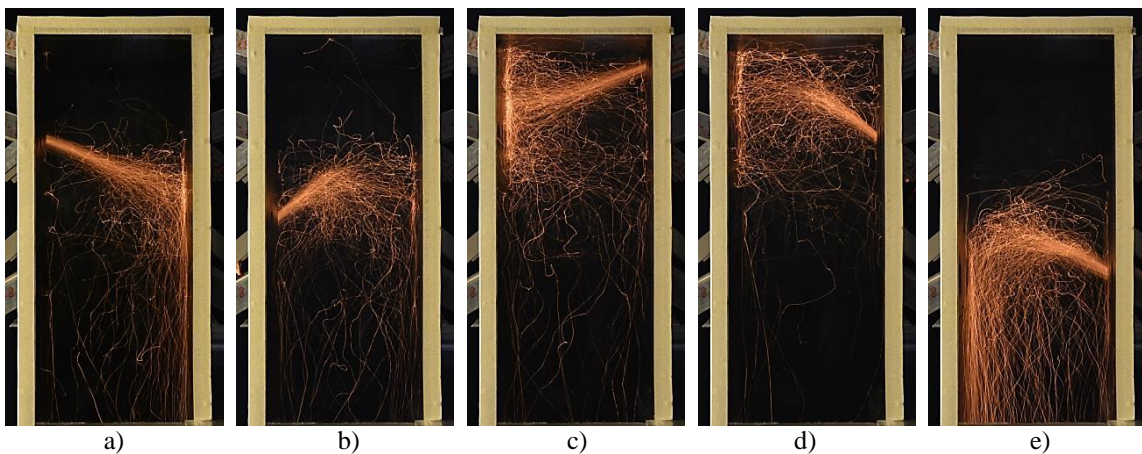


Figure 8. The jets trajectories SA2 (a), PA&F2 (b), SA1 (c), PA&F1 (d) and TA (e) in an even cross section.

Рис. 8. Траектории движения струй ВТ2 (а), ПГ2 (b), ВТ1 (c), ПГ1 (d) и ТР (e) в четном сечении.

На рис. 9-10 приведены тепловые границы струи, истекающей из ПГ2 в координатах, отнесенных к полуширине сопла ПГ2 (b_0), определенные чувствительной хромель-копелевой термопарой. За нулевую координату было взято пересечение осей горелки (ПГ2), причем ось OY направлена по горизонту вдоль фронтальной стенки, OZ – направлена вертикально, OX – направлена горизонтально по боковой стенке модели.

На рис. 9-10 прослеживается сильная деформация струи, что объясняется интенсивным принудительным подводом топочных газов за счет вихревой аэродинамики топки и взаимным влиянием турбулентных потоков друг на друга.

Определив границы струи с привязкой к координатам, измерялись скорости в потоке этой струи трубкой Прандтля. Пьезометрическим зондом фиксировались максимальные и средние значения скоростей

на срезе сопла ПГ2 и в семи сечениях струи, расположенных на определенных расстояниях от среза, а также измерялись скорости спутного потока. Коэффициент неравномерности скоростей на выходе из горелки был определен экспериментальным путем на физической модели.

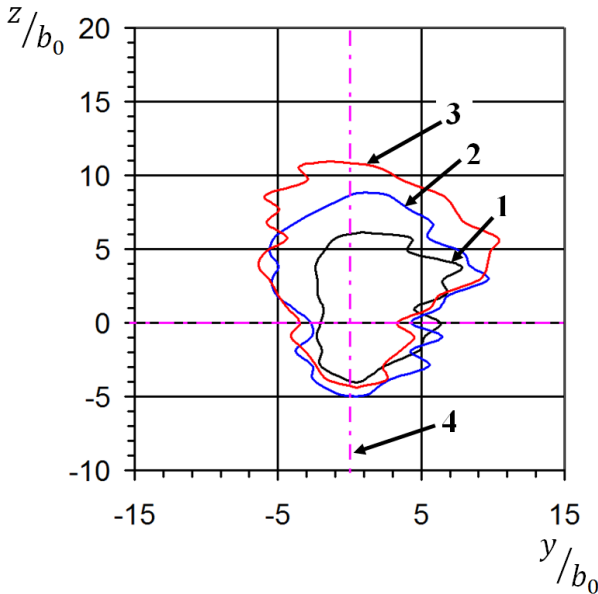
После экспериментального определения основных величин были построены следующие графические зависимости: изменения относительных максимальных скоростей по оси струи ПГ2 (рис. 11); отношения площадей струи ПГ2 в текущем сечении к площади в выходном (рис. 12); изменения относительного прироста массы струи ПГ2 по оси распространения потока (рис. 13); коэффициента эжекционной способности струи ПГ2 (рис. 14). Для большей наглядности на рис. 13-14 нанесена зависимость относительного прироста массы для затопленной плоской струи при

равномерной начальной скорости истечения и ее эжекционная способность.

Анализ полученных графических зависимостей позволяет сделать выводы об основных закономерностях распространения турбулентных струй на физической модели топки котла М-образного профиля и соотнести их с топкой реального агрегата (котла). На графиках обозначены следующие величины: \bar{w}_m – относительные максимальные скорости по оси струи ПГ2; \bar{x} – относительное

расстояние от устья ПГ2; x_l – продольная по направлению движения струи координата; \bar{F} – относительная площадь струи в текущем сечении;

F, F_0 – текущая площадь поперечного сечения струи и площадь выходного сечения сопла ПГ2; $\overline{\Delta G_c}$ – относительный прирост массового расхода струи; k – коэффициент эжекционной способности струи.



1 – $\bar{x} = 2.51$; 2 – $\bar{x} = 5.52$; 3 – $\bar{x} = 8.54$;
4 – burner axis.

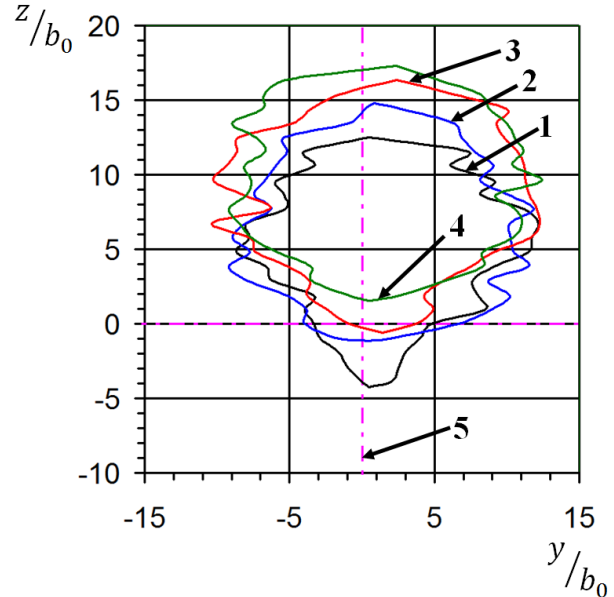
Figure 9. PA&F2 jet thermal boundaries.

1 – $\bar{x} = 2.51$; 2 – $\bar{x} = 5.52$; 3 – $\bar{x} = 8.54$; 4 – оси горелки.

Рис. 9. Тепловые границы струи ПГ2.

Из рис. 11 видно, что скорость по оси струи затухает практически линейно. На расстоянии $20b_0$ максимальные скорости в струе составляют около 0.32 от максимального значения на выходе из ПГ2. Практически отсутствует начальный участок струи ПГ2, что объясняется большим встречным сопротивлением движению потока, создаваемым встречно-опускным движением масс из верхней части модели топки.

На рис. 12 прослеживается значительное расширение струи ПГ2 и увеличение ее площади, которая нарастает постепенно и равномерно до величины 14 на расстоянии $20b_0$.



1 – $\bar{x} = 11.55$; 2 – $\bar{x} = 14.56$; 3 – $\bar{x} = 17.57$;
4 – $\bar{x} = 20.59$; 5 – burner axis.

Figure 10. PA&F2 jet thermal boundaries.

1 – $\bar{x} = 11.55$; 2 – $\bar{x} = 14.56$; 3 – $\bar{x} = 17.57$;
4 – $\bar{x} = 20.59$; 5 – оси горелки.

Рис. 10. Тепловые границы струи ПГ2.

Из рис. 13 видно, что прирост массы струи ПГ2 значительно больше, чем у затопленной плоской струи. Это объясняется, тем, что прирост массы в топливной струе происходит не только за счет эжекции самой струи, но и за счет принудительного подвода топочных газов от других струй и из объема топки, т.е. за счет внутритопочной рециркуляции, которая генерируется благодаря тангенциальной направленности всех струй ПГ1,2, ВТ1,2 и ТР. До расстояния $5b_0$ масса струи резко возрастает в 2.5 раза, далее прирост массы струи замедляется и стабилизируется.

На рис. 14 показан темп прироста массы струй. Видно, что эжекционная способность

турбулентных струй в условиях вихревой аэродинамики точки значительно выше, чем для плоской затопленной струи. Темп прироста массы резко снижается по мере

удаления струи от среза сопла и далее начинает стабилизироваться к $20b_0$.

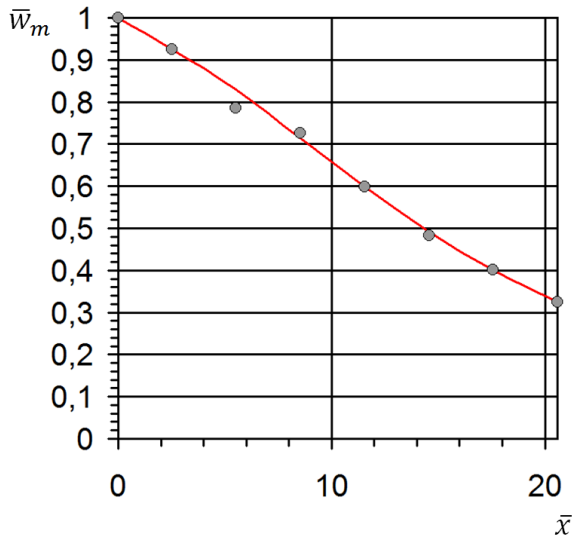


Figure 11. Relative maximum velocities along the PA&F2 jet axis ($\bar{x} = x_l/b_0$).

Рис. 11. Относительные максимальные скорости по оси струи ПГ2 ($\bar{x} = x_l/b_0$).

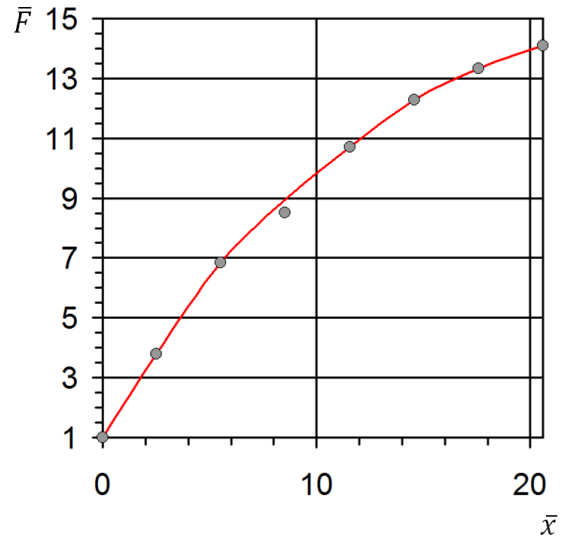
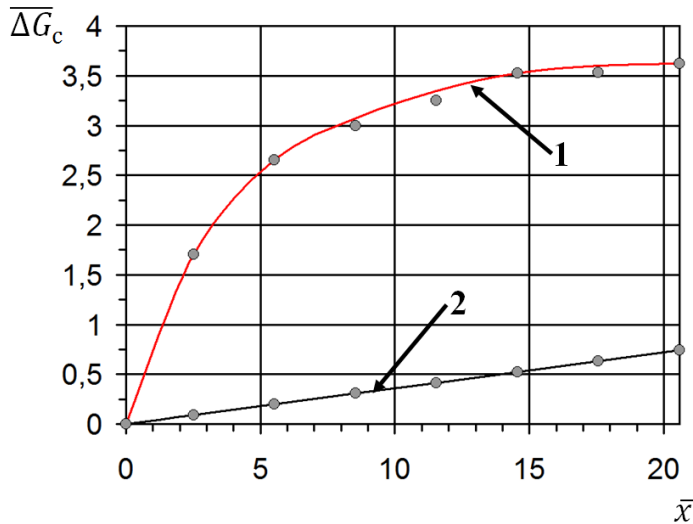


Figure 12. The ratio of the areas of the PA&F2 jet in the current section to the area in the outlet ($\bar{x} = x_l/b_0$, $\bar{F} = F/F_0$).

Рис. 12. Отношение площадей струи ПГ2 в текущем сечении к площади в выходном ($\bar{x} = x_l/b_0$, $\bar{F} = F/F_0$).

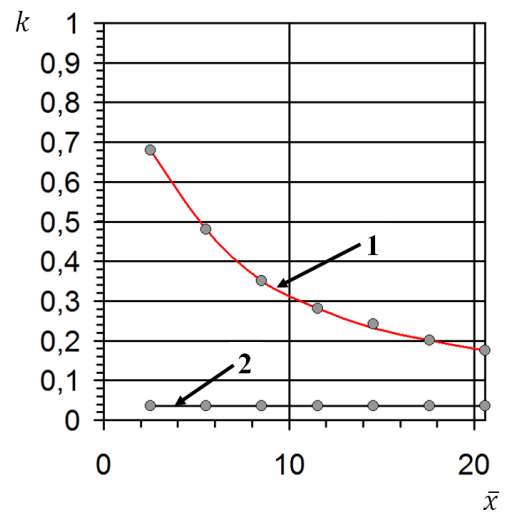


1 – for the PA&F2 jet; 2 – for a submerged flat jet.

Figure 13. Relative weight gain of the jet ($\bar{x} = x_l/b_0$).

1 – для струи ПГ2; 2 – для затопленной плоской струи.

Рис. 13. Относительный прирост массы струй ($\bar{x} = x_l/b_0$).



1 – for the PA&F2 jet; 2 – for a submerged flat jet.

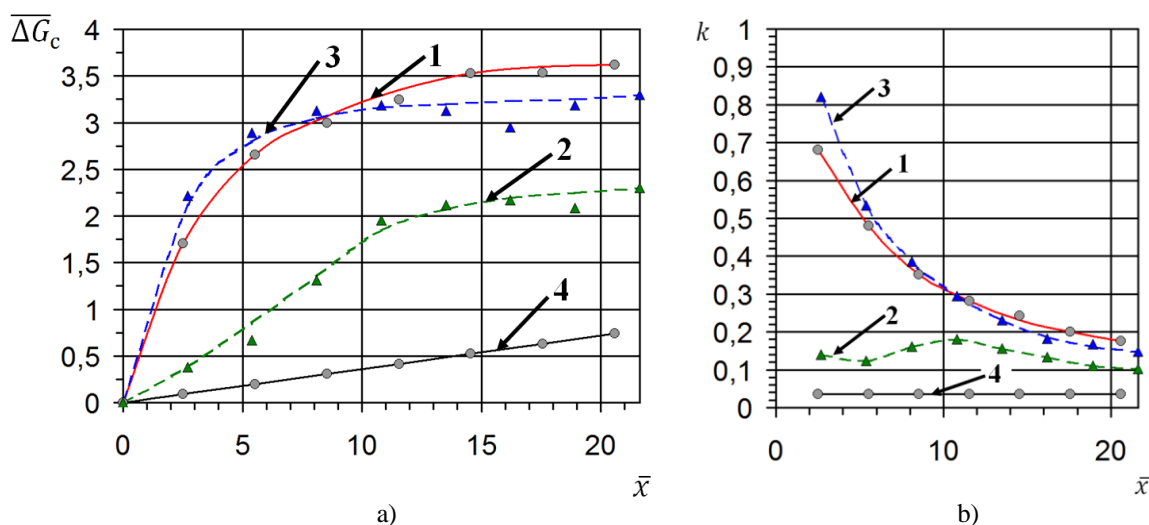
Figure 14. Coefficient of the ejection capability of the jets ($\bar{x} = x_l/b_0$).

1 – для струи ПГ2; 2 – для затопленной плоской струи.

Рис. 14. Коэффициент эжекционной способности струй ($\bar{x} = x_l/b_0$).

Для сравнения и наглядности на рис. 15 приведен относительный прирост массы (а) и коэффициент эжекционной способности струй (b) для рекомендуемой компоновки прямоточных горелок и сопел в инвертной топке и в традиционной топке котла П-образного профиля со схемой расположения топочно-горелочных устройств,

исследованной ранее авторами. Из этого рисунка следует, что в условиях инвертной топки обеспечиваются показатели развития топливоздушных струй ПГ на уровне соответствующем наилучшей компоновке горелок и сопел в традиционной топке котла П-образного профиля.



1 – PA&F jet in an inverted furnace $\alpha_{PA&F} = 0.219$; 2 – PA&F jet in traditional furnace, basic excess of primary air $\alpha_{PA&F} = 0.288$; 3 – PA&F jet in traditional furnace, reduced excess of primary air $\alpha_{PA&F} = 0.158$; 4 – submerged flat jet.

Figure 15. Relative weight gain (a) and the coefficient of ejection capability of jets (b) for the recommended arrangement of direct-flow burners and nozzles in an inverted furnace and in a traditional П-shaped boiler furnace with the arrangement of furnace-burners devices studied earlier ($\bar{x} = x_l/b_0$).

1 – струя ПГ в инвертной топке, $\alpha_{ПГ} = 0.219$; 2 – струя ПГ, традиционная топка, базовый избыток первичного воздуха $\alpha_{ПГ} = 0.288$; 3 – струя ПГ, традиционная топка, сниженный избыток первичного воздуха $\alpha_{ПГ} = 0.158$; 4 – затопленная плоская струя.

Рис. 15. Относительный прирост массы (а) и коэффициент эжекционной способности струй (b) для рекомендуемой компоновки прямоточных горелок и сопел в инвертной топке и в традиционной топке котла П-образного профиля со схемой расположения топочно-горелочных устройств, исследованной ранее ($\bar{x} = x_l/b_0$).

Выводы

Для энергоблока мощностью 500 МВт на ультрасверхкритические параметры пара предложена инвертная топка котла и разработана схема эффективного сжигания угольной пыли с использованием прямоточных горелок и сопел. Проведены экспериментальные исследования с

использованием численного и физического моделирования, по результатам которых для рекомендуемой схемы сделаны следующие выводы:

- отсутствует прямое касание горелочными струями стен топочной камеры, что положительно скажется на работе топочных экранов по условиям шлакования;

– хвостовая часть всех струй характеризуется значительным турбулентным следом, занимающим значительную часть зоны активного горения, что свидетельствует о высокой интенсивности массообмена;

– наблюдается высокая стабильность положения вихрей встречной направленности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, что обеспечит увеличение времени пребывания угольной пыли в зоне горения;

– эжекционная способность турбулентных струй в условиях вихревой аэродинамики топки в 3-4 раза выше, чем для плоской затопленной струи. Темп прироста массы резко снижается по мере удаления струи от среза сопла и далее начинает стабилизироваться;

– в условиях инвертной топки обеспечиваются показатели развития топливоздушных струй ПГ на уровне соответствующем наилучшей компоновке горелок и сопел в традиционной топке котла П-образного профиля;

– результаты численного моделирования полномасштабной топки показали высокую эффективность выгорания топлива: потери с химическим недожогом составили 0.1%, потери теплоты с механическим недожогом 0.8%;

– концентрация монооксида углерода в уходящих газах (приведенная к нормальным условиям) по результатам численного моделирования составила 226 мг/нм³ при существующем нормативном значении 400 мг/нм³;

– концентрация оксидов азота в уходящих газах (приведенная к нормальным условиям) по результатам численного моделирования составила 424 мг/нм³ при существующем нормативном значении 350 мг/нм³, т.е. имеется превышение на 17%. Данное обстоятельство говорит о том, что одних лишь первичных мер, предусмотренных для подавления NO_x в топке недостаточно;

– для рекомендуемой схемы сжигания предусматривается селективное некаталитическое восстановление NO_x в продуктах сгорания путем ввода аммиака или аммиачной воды в наклонные восходящие газоходы котла за ширмовыми пароперегревателями, что обеспечит концентрацию оксидов азота на уровне 250 мг/нм³ и удовлетворит нормативным требованиям;

– результаты численного моделирования топки подтверждены физическим моделированием на лабораторном стенде, тепловым позонным расчетом и расчетом образования NO_x по методике МЭИ, что обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Схему сжигания твердого топлива, предложенную авторами данной работы, ввиду устойчивости положения ядра факела, высокой доли выгорания топлива, возможно использовать для сжигания непроектных топлив.

Литература (References)

- [1] *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 9 iyunya 2020 goda №1523-p «Ob Energeticheskoy strategii Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda»* (Russian Federation Government Decree Dated by June 9, 2020 №1523-p «On Energetic Strategy of Russian Federation for the Period up to Year 2030») [in Russian].
- [2] Di Gianfrancesco A. The Fossil Fuel Power Plant Technology Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants. *Woodhead Publishing*, 2017, pp. 1-43.
- [3] Tumanovskii A.G., Shvarts A.L., Somova E.V., Verbovetskii E.K., Avrutskii G.D., Ermakova S.V., Kalugin R.N., Lazarev M.V. Review of the Coal-Fired, Over-Supercritical and Ultra-Supercritical Steam Power Plants. *Thermal Engineering*, 2017, 2, pp. 3-19.
- [4] Shingledecker J., Hendrix H., Phillips J., Siefert J., Purgert R., Rawls P. US Program on Advanced Ultrasupercritical Power Plant Materials – The Economy of Using Advanced Alloys. *Conf. IEA Clean Coal Centre. Proc. Proceedings of Workshop on Advanced Ultra-Supercritical Coal-fired*, 2012 (Vienna, Austria).
- [5] Romanosky R. A Comprehensive Overview of the United States Advanced Ultrasupercritical (USC) Materials Research Program. *Conf. IEA Clean Coal Centre. Proc. Proceedings of Workshop on Advanced Ultra-Supercritical Coal-fired*, 2012 (Vienna, Austria).
- [6] *Teplovoy Raschot Kotel'nykh Agregatov (Normativnyi Metod)* [Heat Calculation of Boiler Units (Normative Method)]. Moscow, Energiya Publ., 1973.
- [7] Arkhipov A.M., Lipov Yu.M., Prokhorov V.B. *Ispol'zovanie Pryamotochnykh Gorelok i Sopl v Topkakh Kotlov: Innovatsionnyi Opyt MEI* [Realization of Direct-Flow Burners and Nozzles in Boiler Installations Furnaces: MPEI's Innovation Experience]. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2013. 240 p.

- [8] Vuthalura R., Vuthaluru H.B. Modelling, of a Wall-Fired Furnace for Different Operating Conditions Using FLUENT. *Fuel Process. Technol.*, 2006, 87, pp. 633-639.
- [9] Philip J. Stopford Recent Applications of CFD Modelling in the Power Generation and Combustion Industries. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, 26, pp. 351-374.
- [10] Filkoski Risto V., Petrovski Ilija J., Karas Piotr. Optimisation of Pulverised Coal Combustion by Means of CFD/CTA Modelling. *Thermal Science (An International Journal)*, 2006, Vol. 10, No. 3. pp. 161-179.
- [11] 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*, 2010, Vol. XXXII, No. 4. pp. 427-436.
- [12] 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.
- [13] 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).
- [14] Audai Hussein Al-Abbas, Jamal Naser Computational Fluid Dynamic Modelling of a 550 MW Tangentially-Fired Furnace under Different Operating Conditions. *Procedia Engineering*, 2013, 56, pp. 387–392.
- [15] ANSYS FLUENT, 14.5. 2014. *User's and Theory Guide*.
- [16] *Engineering Simulation & 3-D Design Software* [ANSYS]. Available at: <https://www.ansys.com/> (accessed 12.03.2018).
- [17] *Raschot i Proektirovanie Pyleprigotovitel'nykh Ustanovok Kotel'nykh Agregatov (Normativnye Materialy)* [Calculation and Design of the Pulverized Coal Preparation Installations of Boiler Units(Normative Content)]. Leningrad, 312 p. TSKTI i VTI Publ., 1971.
- [18] *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.
- [19] James T. Hart, Md. Rezwatul 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, pp. 2309-2320.
- [20] Anil Purimetla, Jie Cui CFD Studies on Burner Secondary Airflow. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33, pp. 1126-1140.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>

FUNDING

This work was supported by the Russian Scientific Foundation (grant N 22-19-00722)

Сведения об авторах.



Проخورов 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, доцент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, охрана окружающей среды, моделирование.
E-mail: KirichkovVS@mail.ru



Фоменко Надежда Евгеньевна, ассистент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, численное моделирование.
E-mail: fomenko.n.e@yandex.ru