

УДК 662.933, 533.6.08

Исследование структуры потока в модели четырехвихревой топки*

**И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, А.А. Дектерев, Е.Ю. Шадрин,
А.П. Папулов**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Исследуется структура потока в четырехвихревой топке пылеугольного котла. Представлены результаты экспериментального исследования внутренней аэродинамики, выполненного на лабораторной изотермической модели топочного устройства. С помощью метода цифровой трассерной визуализации получены распределения скорости потока в ряде сечений, проанализирована пространственная структура течения, состоящая из четырех устойчивых сопряженных замкнутых вихрей с вертикальными осями вращения потока.

Ключевые слова: четырехвихревая топка, лабораторное моделирование, структура потока, цифровая трассерная визуализация.

Данные среднесрочного прогноза по мировому энергопотреблению в 2040 году Международного энергетического агентства, полученные в 2016 году, показывают, что угольное топливо по-прежнему остается одним из наиболее востребованных энергоресурсов и занимает (наравне с нефтью и газом) четвертую часть от всех потребляемых источников энергии. Ограниченность запасов высококачественных видов твердого топлива приводит к необходимости вовлечения в топливно-энергетический баланс низкосортных («непроектных») углей. Решение этой задачи предполагает существенное повышение характеристик паровых котлов ТЭС, необходимость разработки новых типов топочных устройств, отвечающих современным требованиям по энергоэффективности и экологической безопасности. Одной из перспективных технологий в этом направлении является сжигание топлива в вихревом потоке. Закрутка потока позволяет добиться большей полноты выгорания топлива за счет лучшего перемешивания и увеличения времени пребывания топливных частиц в камере горения.

Ранее авторами исследовались характеристики оригинальных конструкций вихревых топочных устройств с горизонтальной осью вращения потока и распределенным вводом топливо-воздушных струй [1–7]. Исследования включали как эксперименты на лабораторной изотермической модели топки, так и полномасштабное трехмерное математическое моделирование всей совокупности топочных процессов при вариации режимов сжигания различных марок угля. В результате были показаны достоинства предложенной

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-29-00093).

конструкции топки, обоснованы способы управления топочным процессом и проанализированы ограничения исследуемой технологии. Одна из технологических особенностей связана с высоким уровнем температуры в камере горения, что обеспечивает устойчивое воспламенение и высокую полноту сгорания «непроектных» видов угольного топлива при жидком шлакоудалении, но в то же время существенно препятствует снижению образования оксидов азота. Понижение температуры в топках с твердым шлакоудалением позволяет уменьшить образование оксидов азота, но в то же время приводит к необходимости решения проблем устойчивости воспламенения и полноты выгорания топлива, шлакования теплоотдающих поверхностей. Это требует специальной организации (оптимизации) аэродинамической структуры потока для обеспечения высокой интенсивности процессов смешения в объеме топки, повышения кинетической энергии турбулентных пульсаций потока и прогнозируемого расположения застойных зон. Известен ряд принципиальных технических решений, которые основаны на факельном сжигании топлива в вихревом потоке с вертикальной осью вращения [8], а также ряд работ, посвященных изучению динамики и структуры течения в подобных устройствах [9, 10].

В настоящей работе экспериментально исследована структура потока в перспективной конструкции четырехвихревой топки пылеугольного котла, работающего на высокосольном угольном топливе (шлакующемся буром угле) [11]. Топка оборудована прямоугольной экранированной камерой сгорания (рис. 1а). На боковых стенках установлено по два диагонально направленных блока многоярусных горелок, которые приближены к оси симметрии боковых стенок таким образом, чтобы отношение расстояния между ними к высоте горелок составляло 0,8–1,2. На фронтальных и тыловых стенках по центру расположены сопла вторичного и третичного дутья, выполненные в виде вертикальных пристенных щелей, равных по высоте горелочному блоку и ориентированных относительно друг друга в противоположные стороны вдоль стен, на которых они расположены. Первичное сжигание топлива происходит в прямооточной части факела боковых горелок. Прямоточные части факела, направленные от боковых стенок навстречу друг другу, соударяясь, турбулизируют поток и благодаря наличию сопел вторичного и третичного дутья образуют четыре вихревых потока с вертикальными осями вращения. Научно обоснованное управление структурой потока призвано обеспечить интенсификацию теплообмена, снижение выбросов NO_x и защиту экранов от шлакования. Такая схема сжигания пылеугольного топлива с диагональной компоновкой горелок была разработана СибВТИ для котла БКЗ-320-140 (котёл № 18) Красноярской ТЭЦ-1 в связи с переводом

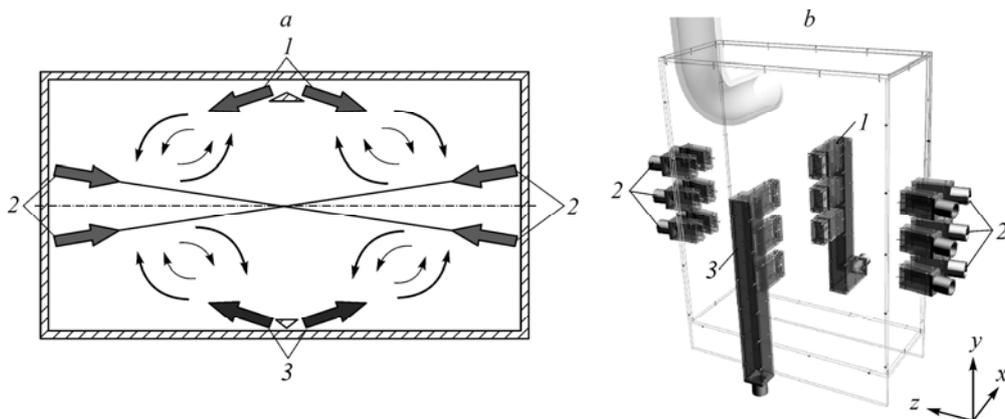


Рис. 1. Четырехвихревая схема сжигания угольного топлива (а) и схема лабораторной модели четырехвихревой топки (б).

1 — фронтальные сопла, 2 — боковые сопла, 3 — задние сопла (третичный воздух).

его с жидкого на твердое шлакоудаление, а также она была реализована при реконструкции топков котлов первой очереди Гусиноозерской ГРЭС БКЗ-640-140-ПТ. Предложенная организация топочного процесса не имела аналогов, поэтому возникла необходимость предварительного изучения эффективности работы топки. Выбор конструктивных и режимных параметров при реконструкции указанных котлов опирался на результаты численного моделирования аэродинамики и теплообмена, в котором использовались простая модель турбулентности и эмпирическая модель выгорания угольных частиц [12], основанная на экспериментальных данных по выгоранию пылеугольного топлива для прямооточных горелок. Анализ работ [12, 13] свидетельствует о недостаточной изученности сложной структуры закрученных потоков, особенно наблюдающихся в них трехмерных и нестационарных эффектов. Современный уровень развития бесконтактных высокоточных измерительных систем, в частности, лазерной доплеровской диагностики, цифровой трассерной визуализации и других позволяет получить недоступную ранее детальную информацию о структуре турбулентного закрученного течения во всем объеме топки.

Экспериментальное исследование структуры потока проводилось на лабораторной изотермической модели топочного устройства с четырехвихревой схемой сжигания твердого топлива (рис. 1*b*). Модель была изготовлена из оргстекла толщиной 10 мм в масштабе 1:25 (внутренние размеры 290×880×730 мм). На боковых стенках в 3 яруса располагалось по 2 диагонально направленных сопла под углом 6° (размеры 28×50 мм), оси этих боковых сопел были направлены к центру топки. На фронтальной и задней стенках сопла устанавливались также в 3 яруса (на отметках расположения боковых сопел) — по 2 центральных сопла (размеры фронтальных сопел — 23×66 мм, задних — 11×64 мм), направленных в сторону боковых стенок под углом 20°.

При изготовлении лабораторной модели с целью упрощения ее конструкции, необходимого для проведения оптических измерений, был проведен ряд изменений, которые, как показал предварительно выполненный численный расчет изотермической аэродинамики, не оказывают существенного влияния на структуру потока в объеме топки. Эти изменения состояли в следующем: холодная воронка в нижней части топки, имеющая форму четырехугольной призмы, была упрощена до формы прямоугольного параллелепипеда; был устранен аэродинамический выступ в верхней части топки; высота топочной камеры выше верхнего яруса горелок была уменьшена (в масштабе) на 50 %. Кроме того, в реальной топке боковые горелки могут быть наклонены вниз в вертикальной плоскости на 10°. В рассматриваемой лабораторной модели боковые сопла (как и центральные) расположены горизонтально. Модель также отличается формой выходного отверстия для уходящих газов: она выполнена в виде круглого отверстия в верхней части задней стенки. Эта конструктивная особенность может влиять на структуру потока только выше зоны взаимодействия горелочных струй, т.е. выше зоны активного горения, которая представляет основной интерес для исследования. Наряду с этим, принятые при моделировании упрощения реальной геометрии выхода из топочного пространства заключаются в отсутствии ширм и конвективных поверхностей нагрева, которые способствовали бы существенному усложнению экспериментальной установки, не приводя к принципиальным изменениям структуры потока в области, исследуемой в настоящей работе. Несмотря на указанные отклонения от конструкции реальной топки, проведение экспериментальных исследований на модели позволяет проанализировать основные характеристики внутренней аэродинамики, полученные данные могут быть использованы как для обоснования способов управления структурой течения, так и для верификации математических моделей.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, основными элементами которого являются (рис. 2): автоматизированный комплекс регулирования подачи сжатого воздуха, изотермическая лабораторная модель четырехвихревой топки, контролируемые приборы. Стенд подключен к сети подачи сжатого воздуха и системе вентиляции,

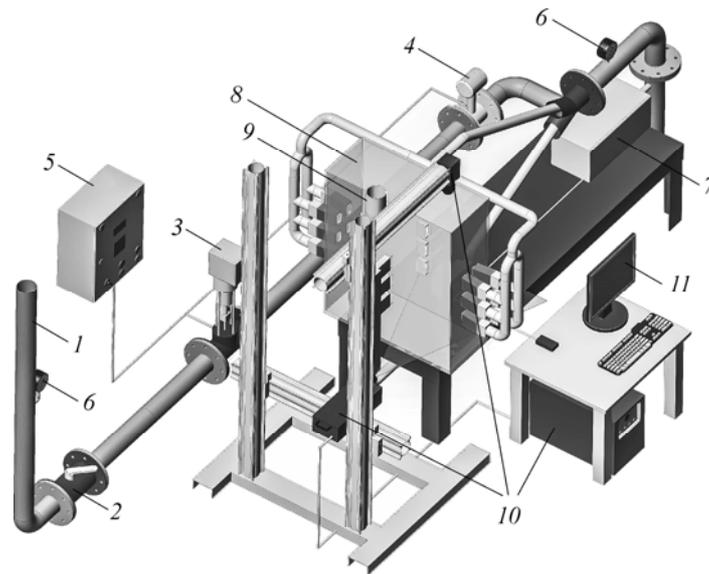


Рис. 2. Схема экспериментального стенда с четырехвихревой топкой.

1 — магистраль подачи сжатого воздуха, 2 — запорный кран, 3 — запорно-регулирующий клапан с электроприводом, 4 — преобразователь расхода, 5 — шкаф управления, 6 — манометры, 7 — дымогенератор, 8 — модель вихревой топки, 9 — вентиляция, 10 — PIV-система, 11 — компьютер.

оснащен устройством засева потока трассерами — микрокаплями жидкости на основе глицерина (генератор тумана Martin Magnum 1800).

Скорость на выходе из сопел в экспериментах выбиралась из следующих соображений. В реальной топке имеет место рассредоточенная подача аэросмеси и вторичного воздуха через боковые горелки со среднерасходной скоростью в каждой горелке 24 м/с. Через фронтальные горелки (вторичное дутье) подается аэросмесь со скоростью 14–25 м/с, а через задние сопла (третичное дутье) — только воздух со скоростью 25 м/с. Таким образом, числа Рейнольдса (по воздуху), рассчитанные по длине камеры сгорания (18,2 м), составляют $Re \sim 10^7$. Лабораторная установка позволяет проводить исследования режимов течения при расходах воздуха до $600 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом, этого расхода достаточно для подачи через все 24 сопла потоков воздуха с одинаковой скоростью — до 5 м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^5$ (это обеспечивает автомодельность режимов течения). Однако распределения потоков воздуха через сопла с разным поперечным сечением с использованием одной точки подключения является весьма сложной технической задачей в силу того, что имеет место перераспределение скоростей при взаимодействии потоков внутри топки. Для решения этой проблемы применялась дополнительная регулируемая система подачи воздуха в модель топки через боковые сопла с применением воздуходувки [14]. Засев потока осуществлялся при помощи сопла Ласкина с использованием растительного масла, что обеспечивало необходимую концентрацию и размер частиц для проведения оптических измерений. Разделение потоков между фронтальными и задними соплами осуществлялось с использованием расходных шайб разного диаметра. Скорости на срезе каждого сопла контролировались при помощи лазерной доплеровской измерительной системы ЛАД-056.

Исследование структуры потока в модели четырехвихревой топки осуществлялось методом цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV) по методике, аналогичной описанной в работе [15]. Метод PIV является бесконтактным оптическим панорамным методом, позволяющим проводить измерения с высокой производительностью. Измерения поля мгновенной скорости потока в заданном сечении основаны

на регистрации перемещения частиц примеси (трассеров), находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные области.

В настоящем исследовании применялась PIV-система «Полис», позволяющая измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении. Измерительный комплекс включает в себя двойной импульсный Nd:YAG-лазер QuantelEVG с энергией в импульсе 145 мДж, с частотой импульсов до 15 Гц, с длительностью импульса 10 нс; объектив для формирования лазерного ножа; CCD камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей, частотой съемки до 1,25 Гц, временем экспозиции 128 мс; широкоугольный объектив Nikon 28 mm F/2.8 D; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow и пакетом PIV Kit; крепежный комплект на основе элементов Newport. Для перемещения измерительной системы использовалось координатно-перемещающее устройство, позволяющее позиционировать измерительную плоскость внутри модели топки с пространственным шагом от 0,1 мм.

Измерения проводились в ряде горизонтальных сечений. В каждом сечении регистрировалась серия из 100 пар кадров с частотой 1,25 Гц, временем экспозиции кадра 128 мс и временем задержки между двумя кадрами в каждой паре 300 мкс. Для обработки данных использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм расчета полей скорости с разбиением расчетной области на ячейки размером 64×64 пикселей с пространственным перекрытием 50 %. Для подавления фоновой засветки, образованной отражением от элементов модели, применялся алгоритм цифровой фильтрации изображения («вычитание фона»).

На рис. 3 представлены поля средней во времени скорости потока в модели четырехвихревой топки в нескольких горизонтальных сечениях на отметках центров каждого из трех ярусов сопел. Для наглядности показано поле скорости во всем горизонтальном сечении, полученное зеркальным отражением измерительной области относительно плоскости

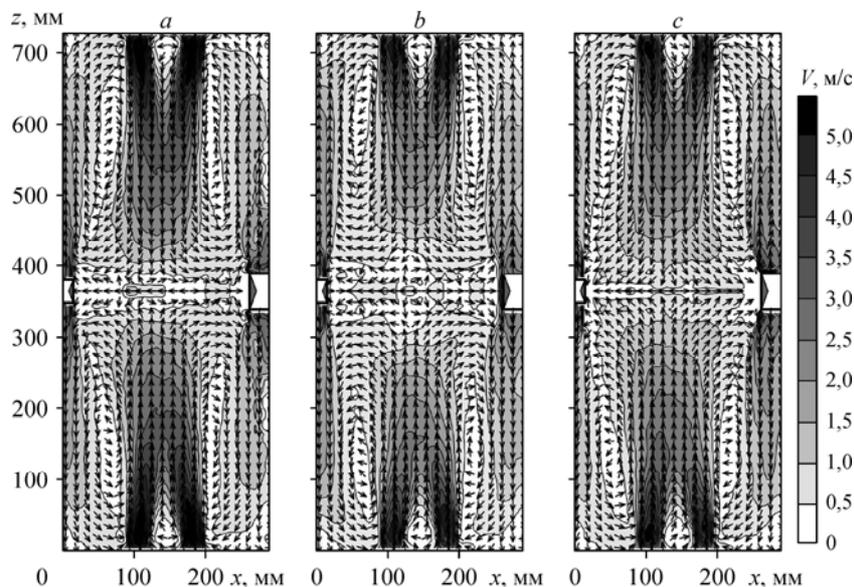


Рис. 3. Поле средней во времени скорости потока в модели четырехвихревой топки в горизонтальных сечениях на отметках центров каждого из трех ярусов сопел.

Пространственный шаг сетки 15 мм; ярусы: нижний (а), средний (b), верхний (с); расположение сопел: задние — слева, фронтальные — справа, боковые — сверху и снизу.

симметрии. Исследован режим, при котором скорость составляла 5 и 3 м/с на выходе из боковых и центральных сопел соответственно. В горизонтальных сечениях течение являлось симметричным относительно вертикальной плоскости, проходящей через середины центральных стенок топки, поэтому с целью повышения пространственного разрешения и экономии времени эксперимента измерения проводились только на половине площади исследуемых горизонтальных сечений (290×365 мм). Минимальный пространственный шаг сетки при одновременном измерении в указанной области составлял 5 мм.

Представленные на рис. 3 результаты демонстрируют сложную структуру течения в исследуемой модели топки, состоящую из четырех сопряженных устойчивых замкнутых вихрей. Струи, выходящие из сопел, расположенных на боковых стенах на расстоянии трех калибров сопла, сливаются и распространяются единым потоком до центра топки. Затем поток разворачивается и, взаимодействуя со струями, выходящими из центральных сопел, направляется параллельно фронтальной и тыльной стенкам. В углах поток поворачивает и поступает к основанию боковых горелок, тем самым образуя четыре замкнутых вихря с вертикальными осями и противоположным направлением вращения. Положение центров вихрей зависит от вертикальной координаты, что указывает на искривление «оси вращения». Поле мгновенной скорости (рис. 4а) характеризует сложную нестационарную структуру турбулентного потока, которая после осреднения приобретает достаточно регулярный вид (рис. 4б). Эта структура потока обеспечивает интенсивное «омывание» топочных экранов (максимум тангенциальной скорости находится вблизи стенок), что на практике способствует улучшению конвективного теплообмена. При такой аэродинамической схеме обеспечена большая длина факела, отсутствует прямой наброс недогоревших частиц на экраны, что снижает опасность интенсивного шлакования поверхностей, характерного для фронтального расположения горелок. Установка сопел третичного дутья является необходимым условием образования четырехвихревой структуры течения. Одновременно она позволяет организовать ступенчатость сжигания топлива с целью снижения выбросов оксидов азота.

Результаты настоящих исследований могут быть использованы для верификации математических моделей, применяемых при полномасштабных численных расчетах топочных процессов [16]. Проведенные эксперименты создают основу для дальнейших исследований, в том числе для анализа распределения кинетической энергии турбулентности в объеме топки, определения режимных и конструктивных параметров (таких как

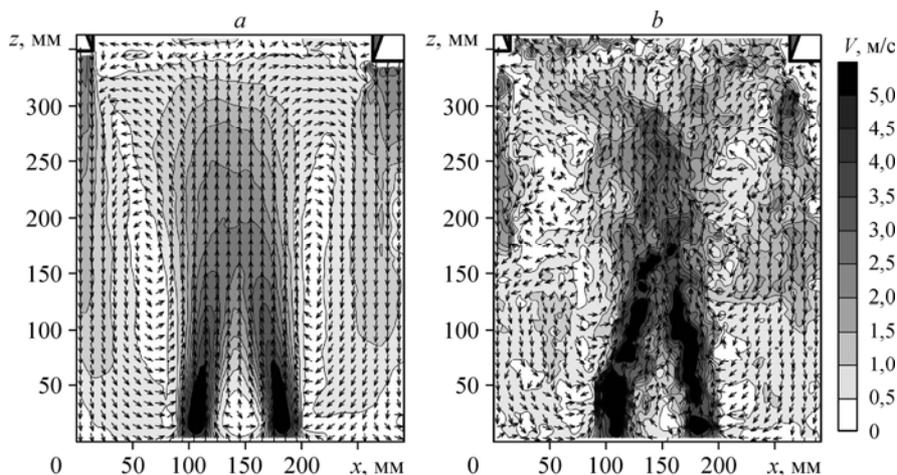


Рис. 4. Поле средней скорости потока (а) и соответствующее поле мгновенной средней скорости (б) на нижнем ярусе топки.

Пространственный шаг сетки ~10 мм.

абсолютные и относительные расходы через боковые и центральные сопла, количество ярусов сопел, угол наклона и угол поворота боковых сопел, отключение отдельных блоков сопел, геометрические характеристики сопел, скорость третичного дутья и др.), обеспечивающих оптимизацию работы топки за счет управления структурой вихревого течения.

Список литературы

1. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Glavniy V.G., Krasinsky D.V., Rakhmanov V.V., Salomatov V.V., Shadrin E.Yu. Study of 3D flow structure and heat transfer in a vortex furnace // Heat Transfer Research. 2016. Vol. 47, No. 7. P. 653–667.
2. Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Шарьпов О.В. Диагностика пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 807–810.
3. Ануфриев И.С., Куйбин П.А., Шадрин Е.Ю., Шараборин Д.К., Шарьпов О.В. Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топки стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 4. С. 645–648.
4. Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Шадрин Е.Ю., Шарьпов О.В. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 15. С. 25–32.
5. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Шарьпов О.В. Визуализация структуры потока в вихревой топке // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 19. С. 104–110.
6. Krasinsky D.V., Sharypov O.V. Numerical modeling of pulverized coal combustion in the vortex furnace with dual upper-port loading // J. of Engng Thermophysics. 2015. Vol. 24, No. 4. P. 348–356.
7. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарьпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Ч. 1. Аэродинамика течения в вихревой топке // Теплоэнергетика. 2015. № 2. С. 41–46.
8. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства / под ред Д.М. Хзмаляна. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. М.: Энергия, 1976. 487 с.
9. Гешева Е.С., Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеев С.В. Анализ аэродинамической структуры закрученного течения в моделях вихревых горелочных устройств // Теплоэнергетика. 2014. № 9. С. 33–41.
10. Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Hanjalić K. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Physics of Fluids. 2014. Vol. 26, No. 6. P. 065109-1–065109-22.
11. Пат. 2032853, РФ. МПК^{с1} F23C5/08(1995.01). Призматическая экранированная топка / Срывков С.В., Процайло М.Я., Дектерев А.А., Козлов С.Г., Пронин М.С., Ковалевский А.М., Попов В.П. Заявитель и патентообладатель Сибир. филиала Всеросс. теплотехнического научно-исследовательского института. № 5060853/06; зарегистрирован 10.04.1995. Заявл. 01.09.1992; опубл. 10.04.1995.
12. Дектерев А.А. Разработка и применение методов расчета аэродинамики и сложного теплообмена в топочных камерах: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1997. 126 с.
13. Брикман И.А. Исследование четырехвихревой схемы сжигания в топочной камере пылеугольных котлов // Сб. научн. тр. IV Всеросс. научно-практ. конф. с международным участием, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. С. 240–244.
14. Litvinov I.V., Mitryakov A.S., Shtork S.I. A study of transient flow modes in a hydraulic turbine draft tube model // Power Technology and Engng. 2016. Vol. 50, No. 1. P. 1–5.
15. Ануфриев И.С., Шарьпов О.В., Шадрин Е.Ю. Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 10. С. 36–43.
16. Чернецкий М.Ю., Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения угольной пыли при наличии закрутки потока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 4. С. 615–626.

Статья поступила в редакцию 23 мая 2017 г.