

УДК 621.18, 533.6.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ЧЕТЫРЕХВИХРЕВОЙ ТОПКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ

Е. Ю. Шадрин, И. С. Ануфриев, О. В. Шарыпов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: evgen_zavita@mail.ru, anufriev@itp.nsc.ru, sharypov@itp.nsc.ru

С использованием метода лазерной доплеровской анемометрии исследована аэродинамика лабораторной модели усовершенствованной топки с четырехвихревой схемой сжигания угольного топлива. Для изотермического случая получены распределения осредненной скорости и пульсаций скорости для различных режимов течения. Описаны основные особенности течения. Проведено сравнение результатов экспериментов с данными измерений, выполненных ранее с помощью PIV-метода, и показано, что они хорошо согласуются.

Ключевые слова: четырехвихревая топка, изотермическая модель, внутренняя аэродинамика, лазерная доплеровская анемометрия.

DOI: 10.15372/PMTF20200516

В настоящее время топочное оборудование на тепловых электростанциях (ТЭС) ориентировано в основном на сжигание высококачественного проектного угольного топлива. Вместе с тем в процессе добычи и переработки угля накоплены огромные запасы низкосортных углей, которые пока не востребованы [1]. Вынужденное сжигание на ТЭС проектного топлива приводит к уменьшению мощности котла и к проблемам при эксплуатации оборудования, накладывает дополнительные требования к системам топливоподготовки, золо- и шлакоулавливания, очистки уходящих газов и т. п. Для эффективного использования таких топлив с соблюдением экологических нормативов требуются новые, научно обоснованные технологические решения.

Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является модернизация оборудования с применением вихревых технологий сжигания пылеугольного топлива. Закрутка потока способствует интенсивному перемешиванию топливно-воздушной смеси с горящим потоком, устойчивому воспламенению низкореакционного топлива, высокой степени сгорания при многократной циркуляции топливных частиц в камере сгорания. Организация структуры вихревого потока позволяет сократить производство вредных продуктов сгорания и шлакование теплообменных поверхностей [2–6]. При разработке и обосновании эффективности таких технологий важным этапом является исследование аэродинамики лабораторных моделей, что позволяет верифицировать математические модели для проведения полномасштабных расчетов с учетом процессов горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-19-00443).

© Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В., 2020

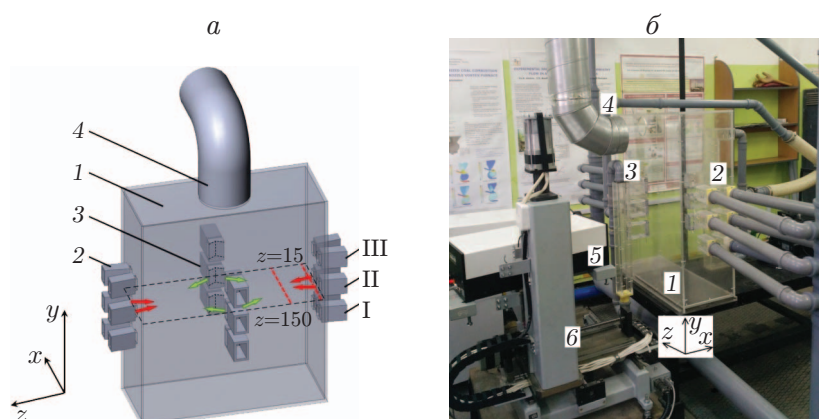


Рис. 1. Схема модели топки (а) и экспериментальный стенд с установленной на нем системой лазерной доплеровской анемометрии (б):

1 — камера сгорания, 2 — боковые сопла, 3 — фронтальные сопла, 4 — вентиляционное устройство, 5 — измерительная система “ЛАД-06”, 6 — координатно-перемещающее устройство; I — нижний ярус, II — средний ярус, III — верхний ярус

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование внутренней аэродинамики модели усовершенствованного топочного устройства с четырехвихревой структурой потока. Топки такого типа на действующих ТЭС имеют недостатки, связанные, в первую очередь, с интенсивным шлакованием теплообменных поверхностей. Модернизация конструкции призвана исключить эти недостатки путем организации благоприятных аэродинамических условий в топочном объеме.

Лабораторная модель выполнена в масштабе 1 : 25 (внутренние размеры $290 \times 880 \times 730$ мм) из прозрачного оргстекла для оптической диагностики потока. Схема модели представлена на рис. 1, а. На боковых стенках в три яруса установлено по два диагонально направленных сопла размером 28×50 мм, соответствующих горелочным амбразурам. Их оси ориентированы горизонтально и направлены к вертикальной оси топки под углом 6° . Фронтальные сопла (для подачи вторичного воздуха) также установлены в три яруса на передней и задней стенках на той же высоте. Исходящие из них потоки направлены к боковым стенкам под углом 20° (размер сопел 23×66 мм). Размеры сопел выбраны из условия геометрического подобия лабораторной модели полноразмерным топкам. Средний ярус сопел расположен на высоте, равной половине высоты модели. Основным отличием модернизированной конструкции от существующих топков, аэродинамика которых исследована в работе [7], является симметричное расположение фронтальных горелок для обеспечения симметрии и устойчивости закрученного потока в широком диапазоне режимных параметров.

Ранее с использованием бесконтактной оптической измерительной системы PIV проведено исследование [8] изотермической структуры течения в модели четырехвихревой топки в широком диапазоне режимных параметров, соответствующих наличию устойчивой четырехвихревой структуры. Используемая PIV-система обеспечивает проведение измерений при низкой (порядка 1 Гц) частоте. Поэтому для измерения пульсационных характеристик потока в данной работе использовался метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). В экспериментах использовалась двухкомпонентная ЛДА-система “ЛАД-06” (Институт теплофизики СО РАН). Метод основан на измерении перемещений взвешенных в потоке частиц (трассеров). Пересекая интерференционное поле, частицы генерируют оптический сигнал, частота которого прямо пропорциональна их скорости. Данная система

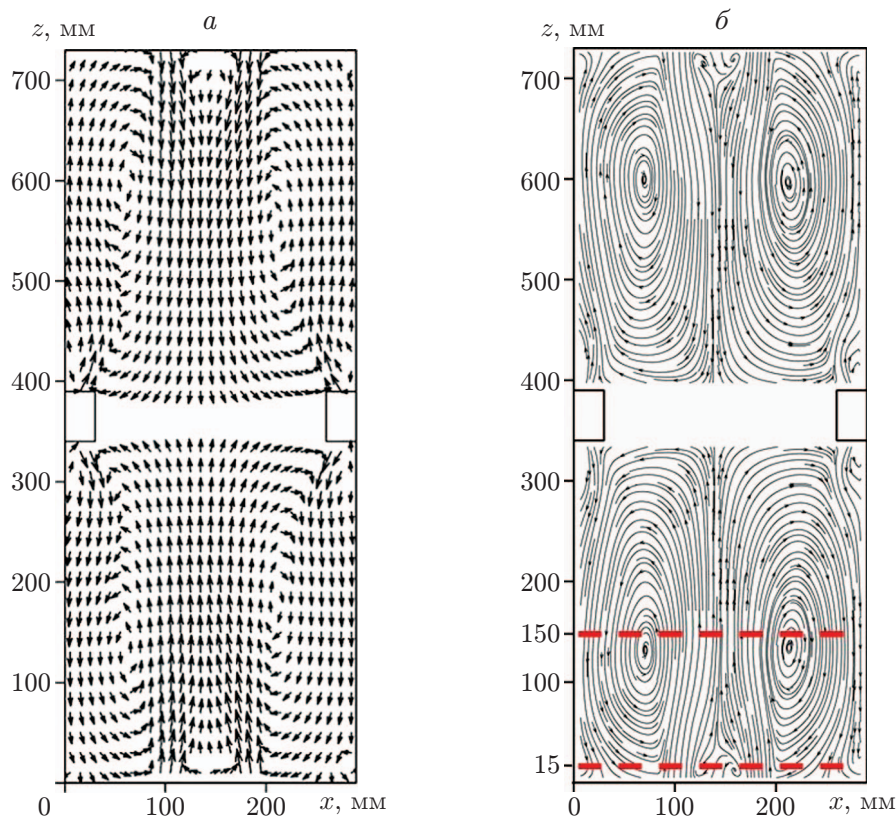


Рис. 2. Результаты PIV-измерений осредненной скорости в горизонтальном сечении, проходящем через центр среднего яруса сопел:
 а — векторное поле скорости (две компоненты), б — линии, касательными к которым являются двухкомпонентные векторы скорости

регистрирует компоненты скорости в плоскости, перпендикулярной оптической оси измерительного блока. При оптимальном засеве потока трассерами система позволяет проводить до 1000 измерений в секунду.

Измерения проводились на экспериментальном стенде (рис. 1, б), основными элементами которого являются автоматизированный комплекс для регулируемой подачи сжатого воздуха и изотермическая лабораторная модель топki. Стенд подключался к системе подачи сжатого воздуха и вентиляции, оснащался устройством для засева потока трассерами (генератором тумана Involight 1500 DMX) и контрольно-измерительными приборами. Основными элементами топki являются прямоугольная камера сгорания, боковые сопла подачи пылевоздушной смеси, фронтальные сопла подачи вторичного воздуха, вентиляционная система. Координатно-перемещающее устройство позволяет выставлять измерительную систему с точностью до $\pm 0,1$ мм.

Измерения осредненной скорости и пульсаций скорости проведены вдоль горизонтальных линий, соответствующих координатам $z = 15$ мм, $z = 150$ мм и расположенных в горизонтальных плоскостях, проходящих через центры ярусов на расстоянии 15 и 150 мм от боковой стенки (см. рис. 1, а). Измерительный блок был ориентирован перпендикулярно фронтальной стенке, что позволяло измерять две компоненты скорости: горизонтальную компоненту перпендикулярно боковой стенке (z -компонента) и вертикальную (y -компонента). В каждой точке проводилось до 2000 достоверных измерений компонент скорости.

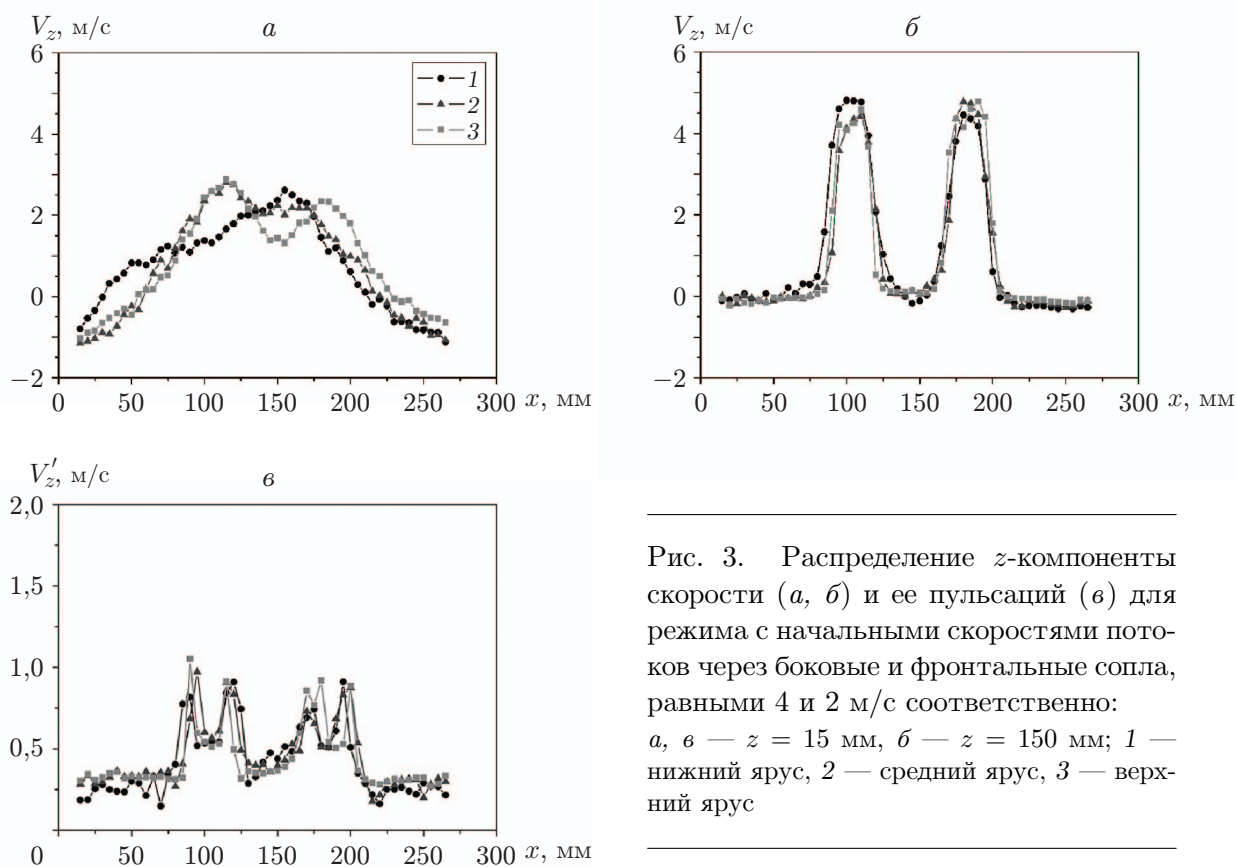


Рис. 3. Распределение z -компоненты скорости (*a*, *б*) и ее пульсаций (*в*) для режима с начальными скоростями потоков через боковые и фронтальные сопла, равными 4 и 2 м/с соответственно: *a*, *в* — $z = 15$ мм, *б* — $z = 150$ мм; 1 — нижний ярус, 2 — средний ярус, 3 — верхний ярус

На рис. 2 представлены поля осредненной скорости, полученные ранее с помощью двумерного PIV-метода [8], и кривые, для которых двухкомпонентный вектор скорости направлен по касательной (режим, при котором скорости течения через боковые и фронтальные сопла составляли 4 и 2 м/с соответственно). Потоки, выходящие из боковых сопел, достигая центра топки, взаимодействуют с потоками, подаваемыми через фронтальные сопла, разворачиваются и замыкаются, образуя интенсивно закрученное течение с четырьмя сопряженными вихрями. Видны четыре симметричные вихревые структуры с вертикальными осями вращения. Фронтальные стенки интенсивно омываются, что способствует предотвращению их шлакования.

Для численного моделирования большое значение имеет также распределение пульсаций скорости. Измерения проводились в области подачи топливно-воздушной смеси, на выходе из боковых сопел при характерных режимах с числами Рейнольдса, соответствующими работе реального котла (в эксперименте и в реальном котле число Рейнольдса $Re = 10^4 \div 10^6$, т. е. находится в диапазоне автомодельности течения [9]). На рис. 3 представлены распределения z -компоненты скорости V_z и ее пульсаций V'_z . Величина V_z два раза меняет знак, что соответствует двум вихревым структурам (см. рис. 3, *a*), при этом точки, в которых $V_z = 0$, являются центрами вихрей. Во всех ярусах, а также в области между левыми и правыми соплами скорость потоков на выходе из сопел почти одинакова. Это свидетельствует о равномерности распределения воздуха в соплах при использовании единой системы подачи, что обеспечивает симметричность течения. Пульсации

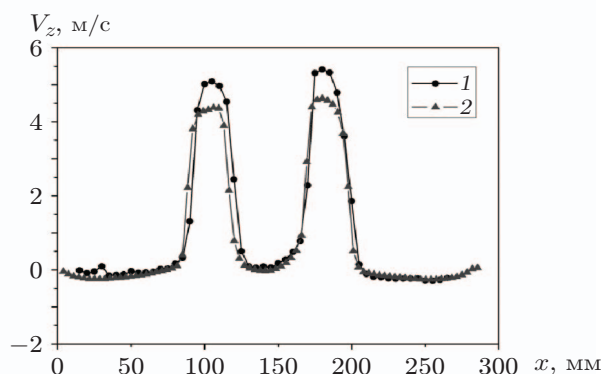


Рис. 4. Распределения осредненной z -компоненты скорости при $z = 15$ мм в среднем сечении, полученные с помощью методов ЛДА (1) и PIV (2)

скорости V'_z достигают 20 % среднерасходной скорости на периферии струи. Эти данные использованы для задания начального уровня турбулентности на входе в топку при численном моделировании [10]. На рис. 4 приведены результаты, полученные с помощью методов ЛДА и PIV [8]. Видно, что они хорошо согласуются, различия не превышают 15 %.

С использованием метода лазерной доплеровской анемометрии получены распределения осредненной и пульсационной составляющих скорости потока в модели усовершенствованной четырехвихревой топке. Показано, что в исследованных режимах течение формируется четырьмя симметричными крупномасштабными вихревыми структурами. Такая подача воздуха в модель обеспечивает равномерное распределение потоков между соплами. Уровень относительных пульсаций скорости достигает 20 %. Результаты сравнения с данными, полученными с помощью PIV-метода, показали хорошее согласование. Полученные результаты использованы при верификации численных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугов А. Н., Рябов Г. А., Штегман А. В. и др. Опыт ВТИ по использованию в энергетике проблемных топлив // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 3–11.
2. Редько А. А., Редько И. А., Редько А. Ф. Сжигание твердого топлива в вихревой топке со встречными закрученными потоками // Пробл. регион. энергетики. 2017. № 3. С. 33–44.
3. Саломатов В. В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных парогенераторов под вихревую технологию сжигания // Изв. Том. политехн. ун-та. 2014. № 4. С. 25–37.
4. Любов В. К., Ивуть А. Е. Совместное сжигание каменного угля с биотопливом // Вестн. Череповец. гос. ун-та. 2016. № 5. С. 16–20.
5. Красинский Д. В. Вариантный анализ показателей сжигания бурого угля в усовершенствованной вихревой топке // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 5. С. 815–818.
6. Казимиров С. А., Багрянцев В. И., Бровченко С. А., Темлянец М. В. Разработка теплоэнергетической установки для сжигания угольных шламов // Научные технологии разраб. и использования минерал. ресурсов. 2015. № 2. С. 342–345.

7. **Ануфриев И. С., Шарыпов О. В., Дектерев А. А. и др.** Исследование структуры потока в модели четырехвихревой топки // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 6. С. 873–879.
8. **Алексеев С. В., Ануфриев И. С., Шадрин Е. Ю., Шарыпов О. В.** Изучение структуры течения в перспективном вихревом топочном устройстве // Письма в ЖТФ. 2019. № 22. С. 32–36.
9. **Кутателадзе С. С.** Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982.
10. **Dekterev A. A., Kuznetsov V. A., Tepfer E. S., Chernetskaya N. S.** Simulation of aerodynamics of a four-vortex combustion chamber // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. 070002.

*Поступила в редакцию 1/VI 2020 г.,
после доработки — 1/VI 2020 г.
Принята к публикации 29/VI 2020 г.*