

03.1

## Изучение структуры течения в перспективном вихревом топочном устройстве

© С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин<sup>¶</sup>, О.В. Шарыпов

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

<sup>¶</sup> E-mail: evgen\_zavita@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 июля 2019 г.

В окончательной редакции 16 июля 2019 г.

Принято к публикации 6 августа 2019 г.

Экспериментально исследована внутренняя аэродинамика изотермической лабораторной модели усовершенствованной четырехвихревой топки пылеугольного котла. С использованием метода цифровой трассерной визуализации получены распределения компонент осредненной скорости потока воздуха и проекции линий тока в ряде сечений модели при различных режимах работы топки, определяемых соотношением скоростей потоков, подаваемых через основные и вторичные сопла. Определены условия формирования устойчивой структуры течения с четырьмя симметричными сопряженными вихрями во всем объеме топки, а также диапазон режимных параметров, приводящих к нерегулярной в пространстве вихревой структуре.

**Ключевые слова:** четырехвихревая топка, изотермическая модель, внутренняя аэродинамика, цифровая трассерная визуализация.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48646.17984

В настоящее время, как и в обозримой перспективе, уголь является одним из основных видов топлива для производства энергии. Оборудование современных ТЭС рассчитано на угольное топливо высокого качества, запасы которого ограничены. Этим обусловлена необходимость вовлечения в топливно-энергетический баланс низкосортного твердого топлива (непроектные угли, биомасса, различные отходы) [1]. Сжигание такого топлива на существующем оборудовании приводит к технологическим проблемам и накладывает жесткие требования на системы топливоподготовки, золо- и шлакоулавливания, очистки уходящих газов и т.п. Поэтому актуальной задачей является научное обоснование разработки топочных устройств для энергоэффективного и экологически безопасного сжигания непроектного твердого топлива.

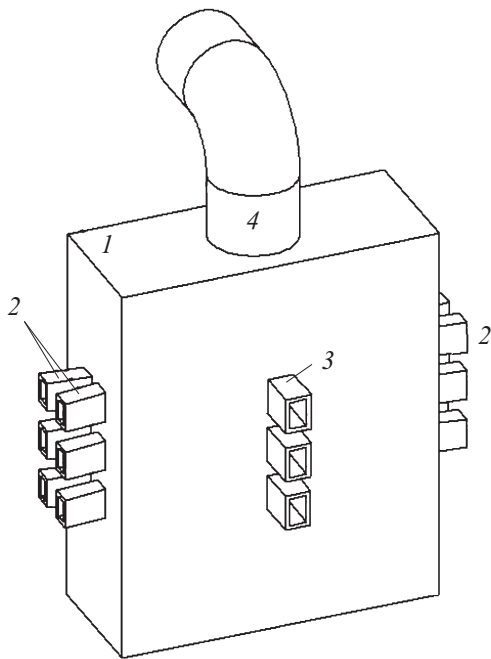
Применение вихревых технологий сжигания топлива позволяет повысить показатели процесса горения топлива. Закрутка потока обеспечивает интенсификацию перемешивания и межфазного теплообмена в двухфазном потоке, устойчивое воспламенение низкорекционного топлива, высокую полноту сгорания за счет многократной циркуляции топливных частиц в камере горения, уменьшение производства вредных продуктов сгорания благодаря более однородному распределению температуры, устранение шлакования теплообменных поверхностей в результате создания определенной структуры потока [2–6]. Ключевым этапом научного обоснования разработки таких технологий является физическое моделирование аэродинамики на лабораторных моделях перспективных вихревых камер сгорания.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию внутренней аэродинамики модели усовер-

шенствованного топочного устройства с четырехвихревой структурой потока. Подобные по конструкции топки действующих котлов ТЭС обладают существенными недостатками (связанными в первую очередь с интенсивным шлакованием), устранение которых может быть обеспечено созданием приемлемой структуры потока в модернизированной вихревой камере.

Модель выполнена в масштабе 1:25 (внутренний размер 290 × 880 × 730 mm) из прозрачного оргстекла для проведения оптических исследований (рис. 1). На боковых стенках в три яруса установлены по две диагонально направленные насадки (соответствующие горелочным амбразурам) под углом 6° (размер 28 × 50 mm) так, что их оси ориентированы горизонтально и направлены к центральной вертикальной оси топки. Фронтальные сопла (соответствующие подаче вторичного воздуха) также установлены в три яруса на передней и задней стенках (на той же высоте, что и боковые сопла), и исходящие из них потоки направлены к боковым стенкам под углом 20°. Размер фронтальных сопел составляет 23 × 66 mm. Размеры сопел выбраны из соображения подобия лабораторной модели полноразмерным топкам. Средний ярус сопел располагается на полувысоте модели. Основным отличием 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.

Исследования выполнены на экспериментальном стенде, основными элементами которого являются автоматизированная регулируемая система подачи сжатого воздуха; устройство засева потока частицами-трассерами, необходимыми для проведения измерений; модель усо-

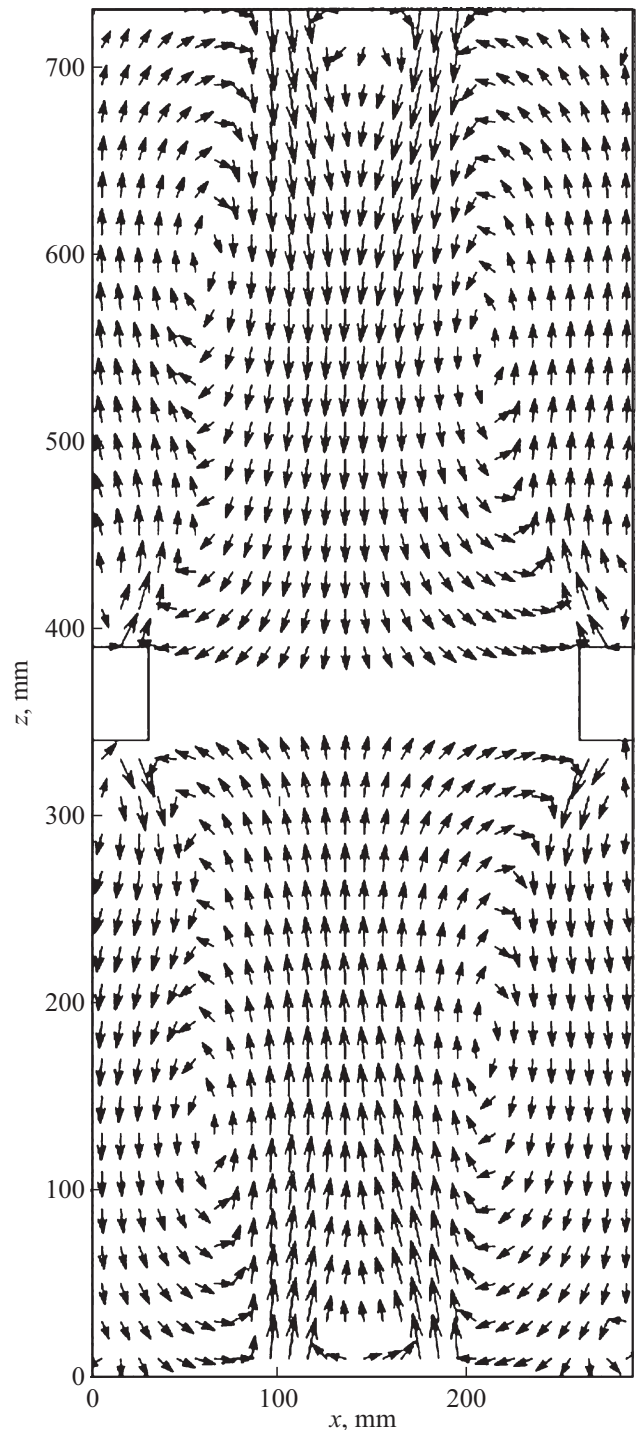


**Рис. 1.** Схема модели четырехвихревой топки. 1 — камера сгорания, 2 — боковые сопла, 3 — фронтальные сопла, 4 — газоход.

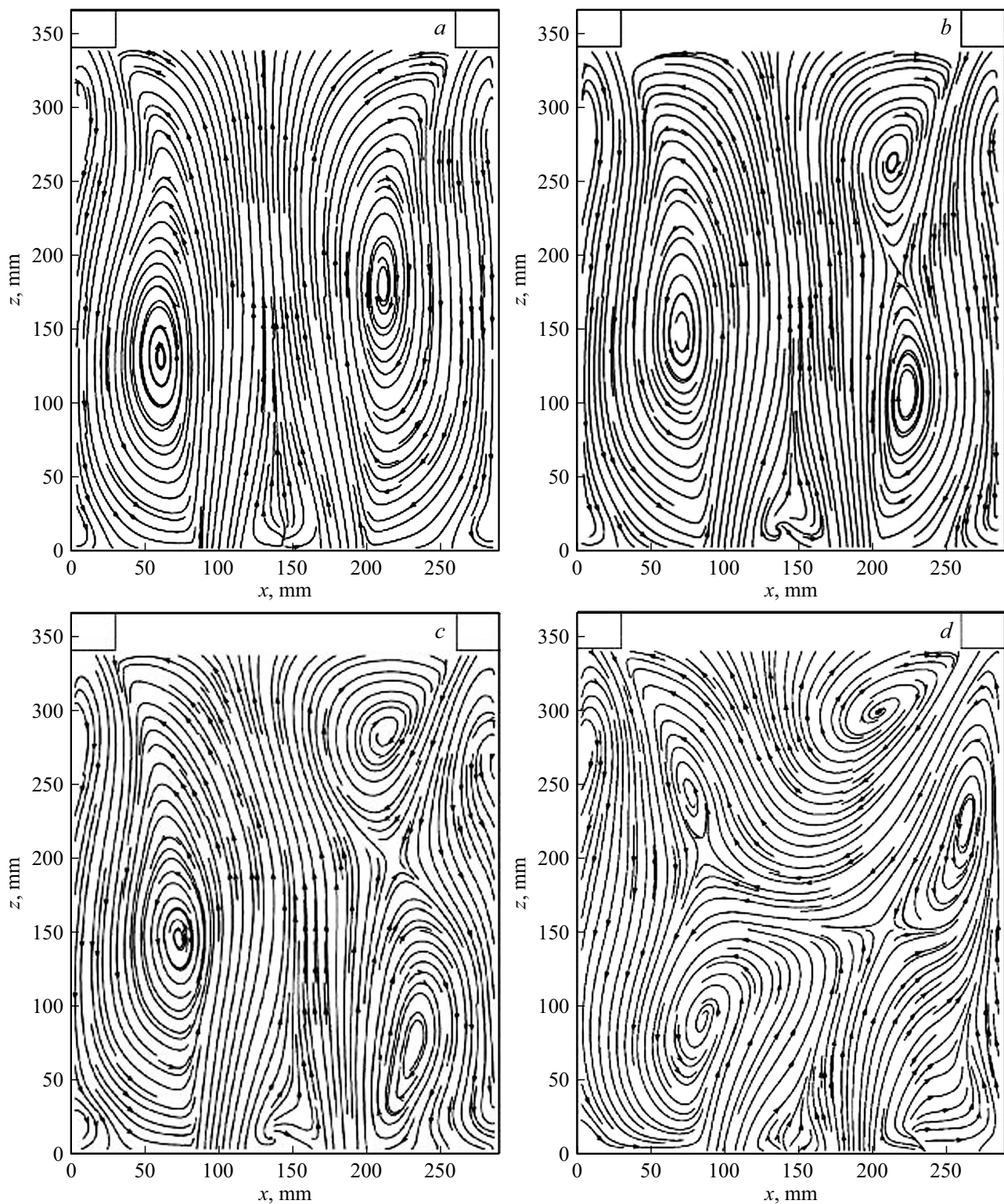
вершенствованной топки; измерительная система; вентиляция. Методика проведения эксперимента аналогична описанной в работе [8]. Для проведения бесконтактных оптических измерений применялась PIV-система „Полис“, состоящая из цифровой CCD-камеры ImperX B4820 (16 Мрх), двойного Nd:YAG-лазера QuanteLEVG (энергия импульса до 145 мДж), объектива Nikon (фокусное расстояние 50 мм), синхронизирующего процессора, компьютера со специальным программным обеспечением ActualFlow. Для перемещения измерительной системы использовалось координатно-перемещающее устройство с точностью позиционирования 0.1 мм.

Измерения проведены в ряде горизонтальных сечений, проходящих через центры ярусов горелок. В каждом сечении получена серия из 1000 пар изображений (задержка между кадрами в паре 100 мкс). По результатам цифровой обработки изображений с использованием итерационного кросскорреляционного алгоритма получена информация о распределении двух компонент осредненной скорости в заданных сечениях. Измерения выполнены при различных скоростях потоков (от 1 до 5 м/с на выходе из сопел), определяющих режим работы котла. Измерения проведены в одной половине сечения модели, что позволило повысить пространственное разрешение (шаг сетки 5 мм) при размере кадра 290 × 340 мм. Характерное значение числа Рейнольдса, рассчитанное по длине вихревой камеры при данных скоростях,  $Re > 10^5$ , т.е. результаты получены в диапазоне  $Re$ , в котором обеспечивается автомодельность структуры потока. Таким образом, результаты характеризуют особенности аэродинамики в полномасштабных топках.

На рис. 2 представлено векторное поле скорости, полученное в горизонтальной плоскости, проходящей на полувывоте топки, для режима, при котором скорости на выходе из боковых и фронтальных сопел составляют 5 и 2 м/с соответственно (отношение скоростей  $\beta = 2.5$ ). Верхняя часть рис. 2 построена как зеркальное отражение нижней части, в которой проведены измерения. Потоки, выходящие из боковых сопел, доходя до центра



**Рис. 2.** Векторное поле осредненной скорости в горизонтальном сечении на полувывоте топки.



**Рис. 3.** Линии тока в горизонтальном сечении на полувысоте топки для характерных режимов с  $\beta = 2.5, 1.5, 1.0, 0.5$  при различных скоростях потоков через боковые и фронтальные сопла: *a* — 5 и 2 м/с; *b* — 3 и 2 м/с; *c* — 2 и 2 м/с; *d* — 2 и 4 м/с.

топки, взаимодействуют с потоками, подаваемыми через фронтальные сопла, разворачиваются и замыкаются, образуя интенсивно закрученное течение с четырьмя сопряженными вихрями (рис. 2). Такая картина течения

характерна для всех трех исследуемых сечений на разной высоте топки.

На рис. 3 изображены осредненные проекции линий тока для половины площади аналогичного сечения,

построенные по результатам PIV-измерений. Представлены характерные результаты при четырех различных отношениях скоростей через боковые и фронтальные сопла: 5 и 2 м/с ( $\beta = 2.5$ , рис. 3, *a*); 3 и 2 м/с ( $\beta = 1.5$ , рис. 3, *b*); 2 и 2 м/с ( $\beta = 1.0$ , рис. 3, *c*); 2 и 4 м/с ( $\beta = 0.5$ , рис. 3, *d*). Диапазон значений параметра  $\beta = 2.5-1.0$  соответствует режимам работы разрабатываемого котла. Анализ результатов показывает, что при  $\beta \geq 2$  реализуются режимы течения с четырьмя симметричными сопряженными вихрями (в том числе при  $\beta = 2.0, 2.5, 4.0, 5.0$  для различных комбинаций скоростей от 1 до 5 м/с). В режимах с  $\beta \leq 1$  структура течения полностью утрачивает симметрию, в различных сечениях наблюдается разное количество вихрей (в том числе при  $\beta = 1.0, 2/3, 0.5$  для скоростей от 2 до 4 м/с). В промежуточном диапазоне  $2 > \beta > 1$  в ряде сечений наблюдается шесть вихрей с нарушением симметрии (в том числе при  $\beta = 5/3, 1.5, 4/3$  для скоростей от 2 до 5 м/с). С практической точки зрения хаотизация структуры течения при понижении значения параметра  $\beta$  ниже характерного критического уровня ( $\beta \approx 2$ ) означает, что в этих режимах невозможно организовать эффективное омывание стенок, необходимое для предотвращения шлакования теплообменных поверхностей. Таким образом, режимы при  $\beta < 2$  неблагоприятны для работы котла.

Проведенные исследования показали, что для изученной усовершенствованной модели вихревой топки соотношение скоростей потоков на выходе из боковых и фронтальных сопел ( $\beta$ ) является параметром, определяющим качественные характеристики структуры потока в вихревой камере. Результаты, полученные для различных комбинаций скоростей входящих потоков, позволяют выделить три диапазона значений данного параметра, которым соответствуют режимы течения с регулярной (четыре симметричных вихря,  $\beta \geq 2$ ), переходной ( $2 > \beta > 1$ ) и нерегулярной (хаотической) вихревой структурой ( $\beta \leq 1$ ). Проведение исследований при  $Re > 10^5$  позволяет прогнозировать применимость результатов к полномасштабному котельному оборудованию. Задавая  $\beta \geq 2$ , можно обеспечивать благоприятный для работы котла режим с интенсивно закрученным течением с четырьмя симметричными сопряженными вихревыми структурами во всем объеме топки. Наряду с этим полученные данные необходимы для верификации физико-математической модели процессов в реальных условиях с целью дальнейшего проведения трехмерного моделирования аэродинамики и процессов переноса в полномасштабной топке.

Все результаты получены авторами статьи.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00443).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Тугов А.Н., Рябов Г.А., Штегман А.В., Рыжий И.А., Литун Д.С. // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 3–11.
- [2] Редько А.А., Редько И.А., Редько А.Ф. // Проблемы региональной энергетики. 2017. № 3. С. 33–44.
- [3] Саломатов В.В. // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2014. № 4. С. 25–37.
- [4] Любов В.К., Ивуть А.Е. // Вестн. Череповец. гос. ун-та. 2016. № 5(74). С. 16–20.
- [5] Красинский Д.В. // Теплофизика и аэромеханика. 2016. № 5. С. 815–818.
- [6] Казимиров С.А., Багрянцев В.И., Бровченко С.А., Темлянец М.В. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2015. № 2. С. 342–345.
- [7] Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Дектерев А.А., Шадрин Е.Ю., Папулов А.П. // Теплофизика и аэромеханика. 2017. № 6. С. 873–879.
- [8] Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 15. С. 25–32.