

03

Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топki

© И.С. Ануфриев, П.А. Стрижак, М.Ю. Чернецкий,
Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
E-mail: anufriev@itp.nsc.ru
Томский политехнический университет
Сибирский федеральный университет, Красноярск

Поступило в Редакцию 2 февраля 2015 г.

Экспериментально исследована аэродинамика перспективной конструкции вихревой топki с верхнерасположенным вторичным дутьем. На основе метода цифровой трассерной визуализации измерены поля скорости в изотермической лабораторной модели топчного устройства. С использованием метода лазерной доплеровской анемометрии проведена трехмерная диагностика структуры потока в камере горения. В результате обработки полученных результатов с применением критерия „минимума полного давления“ визуализирована пространственная структура вихревого ядра потока.

Вихревые технологии сжигания угольного топлива обладают важными преимуществами, обеспечивающими повышение эффективности и экологической безопасности производства тепловой энергии. Главным достоинством сжигания топлива в вихревом потоке является возможность создания устойчивого высокотурбулентного течения, обеспечивающего интенсивный теплообмен в реагирующей двухфазной смеси. При определенных условиях в интенсивных закрученных потоках возможно формирование крупномасштабных организованных структур и проявление нестационарных эффектов, существенно влияющих на характеристики процессов в вихревых аппаратах. Поэтому при разработке перспективных вихревых топчных устройств необходимо детальное изучение их внутренней аэродинамики для научного обоснования эффективности и надежности их работы.

Задачей данной работы является экспериментальное исследование аэродинамики перспективной конструкции вихревой точки с верхнерасположенным вторичным дутьем.

Основными элементами исследуемого типа вихревой топки являются: футерованная вихревая камера горения с тангенциальным подводом струи аэросмеси, создающая вихревой факел с горизонтально расположенной осью вращения; диффузорная часть; камера охлаждения, насыщенная двухсветными экранами и ширмами. В конструкции вихревой топки принято четкое разделение на 2 зоны: а) высокотемпературного горения внутри футерованной вихревой камеры горения; б) теплосъема, организованного в находящейся над диффузорной частью топки камере охлаждения, насыщенной тепловоспринимающими экранными поверхностями. Рециркуляция продуктов сгорания в зону пылеугольного факела — принципиальное свойство аэродинамической структуры потока в камере горения вихревой топки — позволяет существенно снизить выбросы оксидов азота, несмотря на высокий уровень температуры в камере горения. Использование вместе с этим и принципа стадийного сжигания за счет конструктивно-компоновочных решений, обеспечивающих условия недостатка окислителя в вихревом факеле камеры горения с последующим дожиганием топлива, позволит дополнительно снизить уровень эмиссии оксидов азота в вихревой топке. Поэтому в качестве технологической основы и основополагающего подхода, направленного на повышение энергоэффективности при одновременном снижении выбросов оксидов азота, предлагается использование в составе парового котла тепловой электростанции перспективной конфигурации вихревой топки с многоступенчатым тангенциальным вводом топливовоздушных струй для организации форсированного нестехиометрического сжигания распыленного угля в вихревом факеле с высокой степенью циркуляции потока. При этом возможно рассмотреть 2 компоновочные схемы вихревой топки с тангенциальным дутьем горелочных струй, общим для которых является расположение основных горелок в верхней части камеры горения под углом к горизонту, а различие состоит в направлении дополнительного дутья. А именно, для варианта конфигурации ВТ-Н (рис. 1, *a*) дополнительное тангенциальное дутье осуществляется через горизонтально расположенную горелку в нижней точке периметра камеры горения (согласно патенту РФ № 2042084) [1–3]. В другом же варианте конфигурации ВТ-В горелки дополнительного (вторичного) дутья расположены в верхней части камеры горения и ориентированы вертикально вниз (рис. 1, *b*). Для обоих указанных вариантов новой конфигурации аэродинамическая структура потока в вихревой топке характеризуется „перчаточной“ схемой, т.е. пространственным пересечением входящей (из основной горелки) топливовоздушной струи

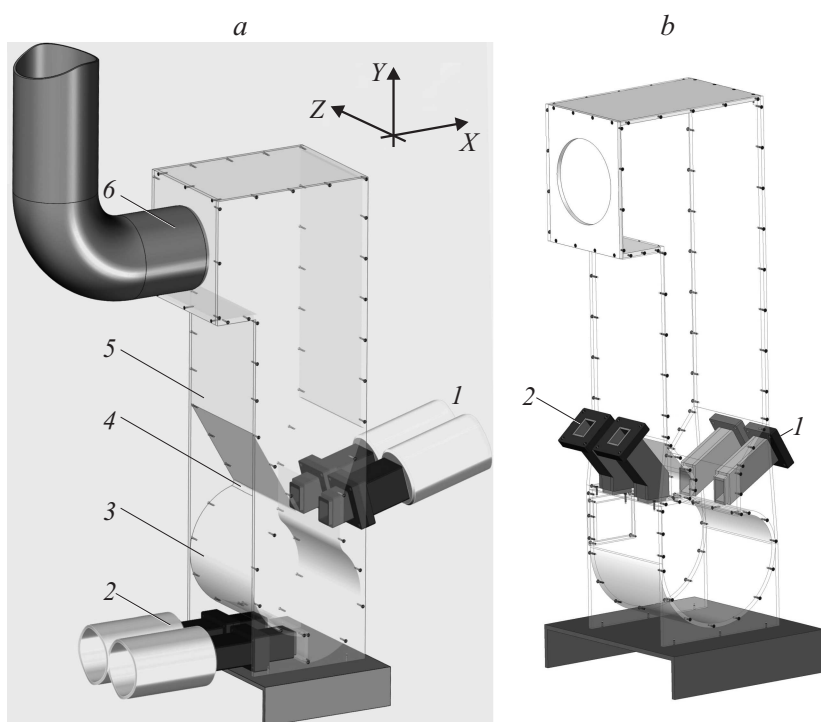


Рис. 1. *a* — модель вихревой топki, конфигурация VT-H: 1 — основные сопла, 2 — дополнительные сопла, 3 — вихревая камера горения, 4 — диффузор, 5 — камера охлаждения, 6 — горизонтальный газоход; *b* — модель вихревой топki, конфигурация VT-B: 1 — основные сопла, 2 — дополнительные сопла.

с закрученным потоком в камере горения, что обуславливает высокую интенсивность турбулентного перемешивания, интенсификацию процессов тепломассопереноса в вихревой камере и соответственно надежное сжигание низкорекционных твердых топлив (что способствует расширению топливной базы угольной энергетики [4–10]). При этом благодаря наличию в новых конфигурациях вихревой топki дополнительного тангенциального дутья обеспечивается расширение способов управления аэродинамической структурой потока и режимными параметрами и, как следствие, возможность повышения показателей

усовершенствованной топки. Однако необходим научный поиск оптимальных вариантов геометрии контура топки и благоприятных рабочих режимов, основанный на исследованиях детальной структуры течения и процессов переноса в новых конфигурациях вихревой топки.

По аналогии с работами [1–3] исследуется аэродинамика лабораторной модели перспективной вихревой топки с верхнерасположенным вторичным дутьем (ВТ-В, рис 1, *b*). Модель выполнена из оргстекла в масштабе 1:25 реального топочного устройства. Габаритные размеры модели 320 × 1200 × 256 mm. Диаметр вихревой камеры горения 320 mm. На фронтальной стенке под углом 30° к горизонту симметрично расположены 2 прямоугольных сопла, соответствующие горелочным амбразурам. На задней стенке вертикально расположены дополнительные сопла. Отношение ширины горловины диффузора к диаметру камеры сгорания составляет 0.375. Углы раскрытия диффузора составляют 40°. Вихревая топка содержит „козырек“, расположенный под основными соплами и выполненный в виде дуги окружности (радиус в 2 раза меньше радиуса камеры сгорания), что препятствует подпиранию основных струй и выносу потока из камеры горения.

Исследования внутренней аэродинамики усовершенствованной конструкции вихревой топки выполнялись на модернизированном экспериментальном стенде. Поток сжатого воздуха из магистрали подавался в модель вихревой топки через вихревой расходомер, синхронизированный с запорно-регулирующим клапаном с электроприводом, с целью стабилизации заданного расхода при измерениях [1]. При этом контролировались давление и температура до и после клапана. До входа в модель поток засеивался трассерами (микрокапли глицерина).

Измерения поля скорости закрученного течения в модели вихревой топки проведены на основе современных бесконтактных методов: цифровой трассерной визуализации (PIV) и лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Методика проведения PIV-экспериментов соответствует работе [3], а методика ЛДА-экспериментов — работе [2]. Эксперименты выполнены при числе Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^5$ (рассчитанном по диаметру вихревой камеры 320 mm). Входные скорости на срезе каждого сопла (размер сопла 32 × 42 mm) были одинаковыми и задавались равными 15 m/s. Суммарный объемный расход воздуха через все 4 сопла поддерживался на уровне 290 m³/h.

Для 2D-PIV-измерений использовался измерительный комплекс „Полис-2С-140-4М-PIV“ [3]. Измерения проводились в трех сече-

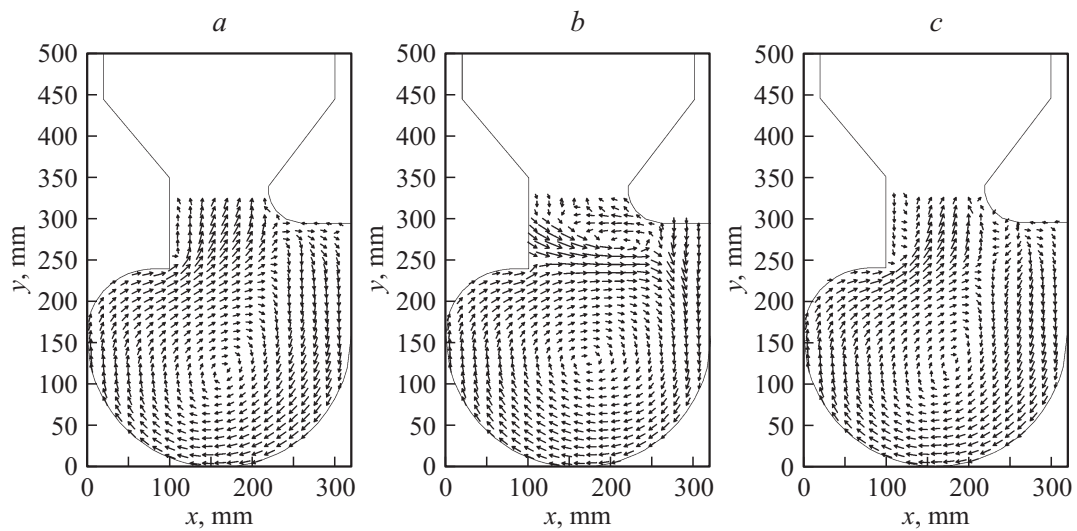


Рис. 2. Векторное поле средней скорости в сечениях XOY (результаты PIV-измерений): *a* — $z = 15 \text{ mm}$; *b* — $z = 64 \text{ mm}$; *c* — $z = 128 \text{ mm}$.

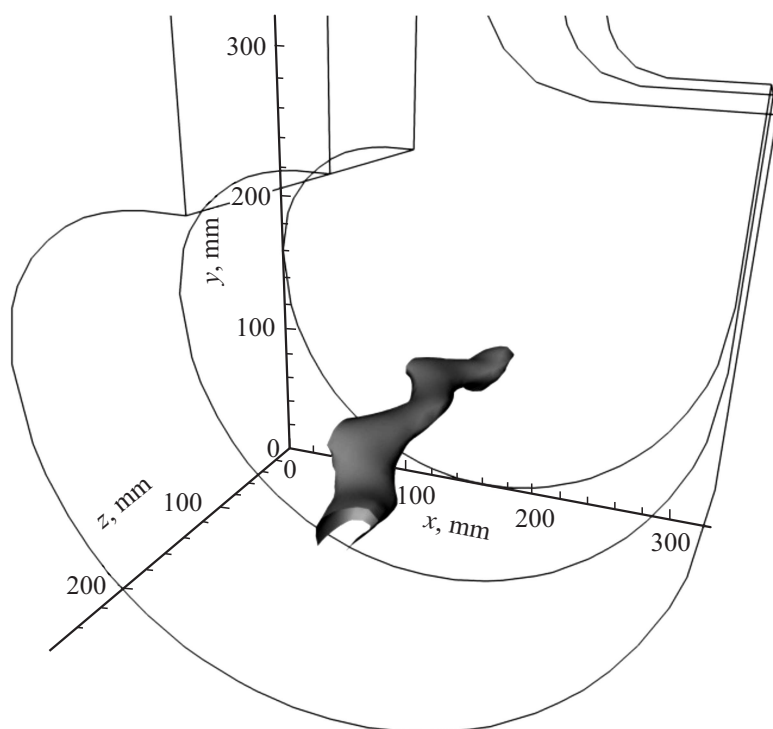


Рис. 3. Изоповерхность динамического давления $p_{dyn} = 0.25$ Pa (результаты 3D-ЛДА-измерений).

ниях XOY : вблизи торцевой стенки ($z = 15$ mm), по центру сопла ($z = 64$ mm), в плоскости симметрии ($z = 128$ mm). На рис. 2 представлены поля средней скорости, полученные в результате статистической обработки 500 мгновенных распределений. Анализ результатов показывает, что течение обладает трехмерной пространственной структурой: положение центра вихря зависит от поперечной координаты z , что указывает на искривление вихревого ядра потока. Тем самым особый интерес представляет детальное исследование структуры течения в центральной области камеры горения.

Для 3D-диагностики структуры потока использовался трехмерный полупроводниковый лазерный доплеровский анемометр ЛАД-056 (раз-

работанный в ИТ СО РАН), состоящий из двумерных приборов ЛАД-05 и ЛАД-06 со взаимно ортогонально-поляризованными лазерными лучами. На основе полученных PIV-данных в качестве измерительного объема (для ЛДА-измерений) выбрана центральная часть камеры горения $60 \times 60 \times 120$ mm (вблизи горизонтальной оси вращения потока) как область локализации вихревого ядра потока. Измерения проведены в узлах сетки с пространственным шагом 5 mm. В экспериментах концентрация трассеров позволяла измерительной системе регистрировать до 500 частиц в секунду, при этом в каждой точке измерение длилось 20 s.

С целью визуализации характерной пространственной структуры вихревого ядра закрученного потока использовался критерий „минимума полного давления“ p_0 (сумма инкремента статического давления и локального скоростного напора) [11]. При обработке полученных данных предполагалось, что статическое давление в центральной области вихревого потока изменяется слабо и минимум p_0 определяется динамическим давлением p_{dyn} . На рис. 3 представлена изоповерхность динамического давления, которая визуализирует вихревое ядро потока, имеющее выраженную W-образную форму. Подобная форма вихревого ядра характерна и для вихревой топки ЦКТИ [12], в которой его положение является устойчивым. Отсутствие прецессии вихревого ядра потока на практике является одним из важных достоинств исследуемой схемы вихревой топки.

Полученные экспериментальные данные достаточно полно характеризуют внутреннюю аэродинамику предложенной конструкции вихревой топки и позволяют провести верификацию математических моделей, используемых для численных расчетов процессов переноса в турбулентных закрученных потоках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00137).

Список литературы

- [1] Ануфриев И.С., Аникин Ю.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 24. С. 39–45.
- [2] Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 10. С. 36–43.

- [3] *Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 19. С. 104–110.
- [4] *Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 5. С. 47–57.
- [5] *Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Filkov A.I.* // J. Therm. Anal. Calorim. 2014. V. 117. N 3. P. 1497–1508.
- [6] *Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P.* // Infrared Phys. Technol. 2014. P. 566–573.
- [7] *Кузнецов В.Т., Лобода Е.Л.* // ФГВ. 2010. Т. 46. № 6. С. 86–92.
- [8] *Chernetskiy M.Yu., Dekterev A.A., Burdukov A.P., Hanjalić K.* // Fuel. 2014. V. 135. P. 443–458.
- [9] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 40. В. 12. С. 11–18.
- [10] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. V. 79. P. 838–845.
- [11] *Dubief Y., Delcayre F.* // J. Turbulence. 2000. V. 1. 22 p.
- [12] *Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В.* // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 6. С. 815–818.