

УДК 621.18, 533.6.08

## Диагностика пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки\*

Ю.А. Аникин<sup>1,2</sup>, И.С. Ануфриев<sup>1</sup>, Е.Ю. Шадрин<sup>1,2</sup>, О.В. Шарыпов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

На основе метода лазерной доплеровской анемометрии исследована пространственная структура закрученного турбулентного потока в изотермической лабораторной модели вихревой топке ЦКТИ. С применением критерия “минимума полного давления” визуализирована структура вихревого ядра потока, имеющая характерную W-образную форму. Спектры пульсаций давления и скорости, измеренные в широком диапазоне изменения режимных параметров, свидетельствуют об отсутствии прецессии вихревого ядра.

**Ключевые слова:** вихревая топка, лазерная доплеровская анемометрия, структура вихревого ядра.

Разработка перспективных топочных устройств для сжигания пылеугольного топлива является актуальной задачей, направленной на интенсификацию процессов смесеобразования и воспламенения, повышение полноты сгорания топлива при уменьшенных габаритах топочной камеры и снижении выбросов токсичных продуктов сгорания. Обеспечивается это, в частности, за счет использования факельных вихревых технологий. Они реализуются в различных типах топочных устройств, среди которых можно выделить: топку с пересекающимися струями (МЭИ), полуоткрытую топку с встречно-наклонным расположением горелок (ВТИ), вихревую топку с горизонтальной осью закрученного потока (ЦКТИ), низкотемпературную вихревую топку (ЛПИ) и др. Каждая из конструкций обладает своими преимуществами и недостатками [1], которые обычно выявляются только на стадии полномасштабных стендовых испытаний или опытно-промышленной эксплуатации. Современная измерительная техника позволяет детально исследовать характеристики топочных устройств на уровне лабораторного физического моделирования, что важно на стадии научного обоснования предлагаемых перспективных технических решений. Это относится, в том числе, к решению задач оптимизации конструктивных и режимных параметров топочных устройств, принципиальные схемы которых известны уже не одно десятилетие. В продолжение предыдущих работ [2, 3] проведено исследование пространственной структуры потока в вихревой топке ЦКТИ. Перспективность этого типа вихревой

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00093).

топки подробно обоснована в работе [4]. Поскольку внутренняя аэродинамика определяет весь процесс сжигания в топочном устройстве, то ее детальное исследование необходимо при разработке научных основ путей повышений эффективности вихревых технологий сжигания топлив и контроля их экологических показателей.

Исследования проводились на лабораторной воздушной изотермической модели вихревой топки (размеры  $300 \times 1300 \times 330 \text{ мм}^3$ ), выполненной в масштабе 1:15 к одной из секций опытно-промышленного котла ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3 (см. рис. 1а). Методика проведения экспериментов соответствует описанию в работе [5]. Измерения выполнены с помощью трехмерного полупроводникового лазерного доплеровского анемометра ЛАД-056 (разработанного в Институте теплофизики СО РАН), состоящего из двумерных приборов ЛАД-05 и ЛАД-06 со взаимно ортогонально поляризованными лазерными лучами (см. рис. 1б).

С учетом предварительно полученных данных [2, 3] в качестве измерительного объема выбрана центральная часть камеры горения  $100 \times 100 \times 160 \text{ мм}^3$  (вблизи горизонтальной оси вращения потока) как область локализации вихревого ядра потока. Измерения проведены в узлах сетки с пространственным шагом 5 мм. Среднерасходные скорости на срезе каждого сопла ( $40 \times 60 \text{ мм}^2$ )  $u_0 = 15 \text{ м/с}$ , расход составлял  $260 \text{ м}^3/\text{ч}$  (число Рейнольдса  $3 \cdot 10^5$  обеспечивает подобие аэродинамики модели и вихревой топки реального масштаба [6]). В каждой точке в течение десяти секунд проводилось до 2000 измерений для каждой компоненты скорости (до 400 отсчетов в секунду).

На рис. 2а для наглядности представлено векторное поле средней по времени скорости потока в сечении  $XOY$  по центру сопла. Для идентификации вихревых структур на основе полученных результатов исследований трехмерного поля средней по времени скорости потока по аналогии с работой [5] применялся критерий “минимума полного давления” [7]:  $p_0 = p - p_{\text{atm}} + p_{\text{dyn}}$ , где  $p$  — статическое давление,  $p_{\text{atm}}$  — атмосферное давление,  $p_{\text{dyn}}$  — динамическое давление. При обработке полученных данных предполагалось, что статическое давление в центральной области вихревого потока изменяется слабо и минимум  $p_0$  определяется динамическим давлением. На рис. 2б представлена изоповерхность динамического давления, которая визуализирует вихревое ядро потока, имеющее характерную W-образную форму.

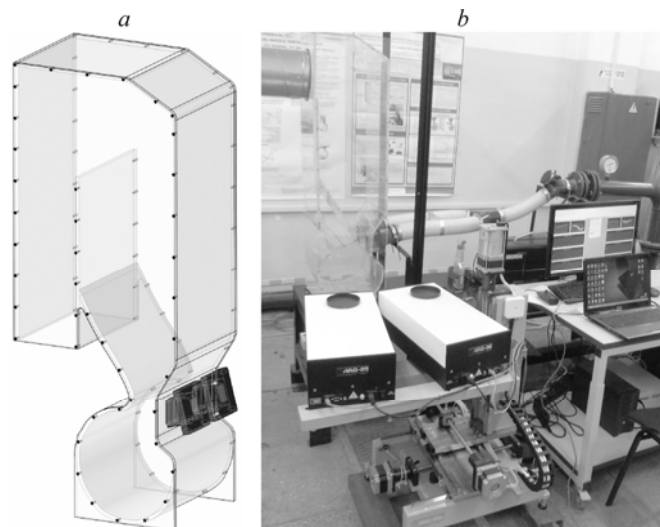


Рис. 1. Схема модели вихревой топки ЦКТИ (а), экспериментальный стенд для исследования аэродинамики и процессов смешения в вихревой топке (б).

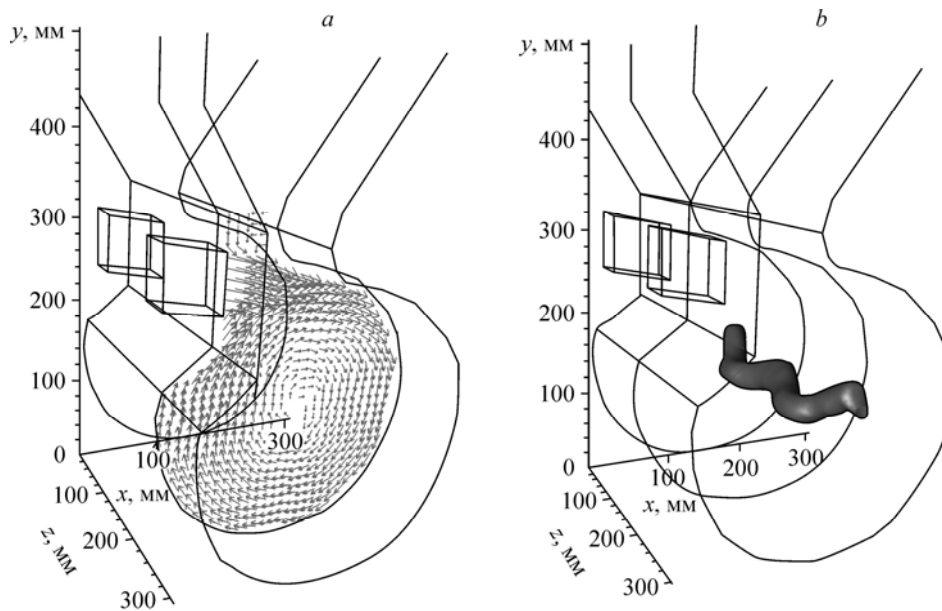


Рис. 2. Результаты измерений: поле средней скорости (а), изоповерхность динамического давления  $p_{\text{dyn}} = 1$  Па (b).

Измерения пульсаций давления проводились при помощи анализатора шума Briel&Kjaer (давление — до 103,5 кПа, частота измерений — 4 Гц–20 кГц, чувствительность — 54,9 мВ/Па) аналогично [8]. Датчик помещался в измерительный объем при помощи отборника — тонкостенной металлической трубки диаметром 2,2 мм и длиной 160 мм. Передаточная функция отборника представлена в работе [8], где показана его применимость без корректировки до частот  $\sim 100$  Гц. Сигнал обрабатывался с помощью АЦП (L-CARD E14-440). Измерения проводились вблизи условного центра вихревой камеры ( $x = 145$  мм,  $y = z = 150$  мм) при различных режимных параметрах ( $u_0 = 5\text{--}20$  м/с) с длительностью 14 с. На рис. 3а представлен характерный спектр давления с основным пиком на частоте около 60 Гц и меньшими пиками на кратных и иных частотах. Спектр имеет сложный вид, в нем представлены собственные частоты различных колебательных

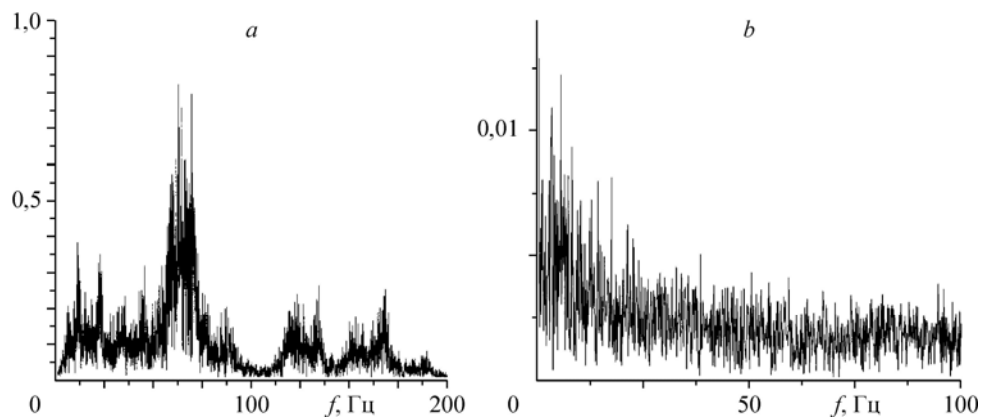


Рис. 3. Спектры пульсаций давления при  $u_0 = 15$  м/с (а) и вертикальной компоненты скорости, нормированной на  $u_0$  (b).

систем, которые можно оценить по формуле собственной частоты резонатора Гельмгольца для характерных параметров модели, воздушного и вентиляционного трактов. Диапазон этих частот — 5–200 Гц. Основная частота, представленная в спектре, не изменяется в широком диапазоне расхода, т.е. соответствует собственным колебаниям системы как акустического резонатора. Амплитуды регистрируемых пиков в спектре очень малы, что характерно для слабых случайных шумов, но не для организованной динамики. Тем самым заметных пульсаций давления с частотой, зависящей от расхода, которые могли бы свидетельствовать о прецессии вихревого ядра потока (как, например, в работе [9]), не обнаружено. Это подтверждается и представленным на рис. 3*b* спектром вертикальной компоненты скорости потока, измеренной ЛАД-056 в той же точке, где регистрировалось давление.

Результаты проведенных экспериментальных исследований внутренней аэродинамики модели вихревой топки позволили на основе критерия “минимума полного давления” визуализировать пространственную структуру вихревого ядра потока. Его характерная W-образная форма соответствует симметричному расположению горелочных струй. Спектральный анализ пульсаций давления и скорости свидетельствует об устойчивости (стационарном положении) вихревого ядра потока в данной конструкции топочного устройства. Для иных типов вихревых топок, имеющих вертикальную ось закрученного потока и тангенциальную подачу топливовоздушной смеси, характерна прецессия вихревого ядра, в результате чего при определенных условиях возможно возбуждение мощных термоакустических колебаний. Предотвращение этого потенциально опасного эффекта предполагает дополнительные ограничения, накладываемые на режимные параметры (такие как расход и закрутка потока), определяющие энергоэффективность и экологические характеристики топочного устройства. С этим связано одно из принципиальных преимуществ перспективных конструкций топок с горизонтальной осью вихря.

### Список литературы

1. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 140 с.
2. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топки парогенератора // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 2. С. 266–276.
3. Саломатов В.В., Шарыпов О.В., Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Энхжаргал Х. Физическое моделирование внутренней аэродинамики вихревой топки энергетического парогенератора // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2011. Т. 6, вып. 1. С. 60–65.
4. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 853 с.
5. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Визуализация структуры потока в вихревой топке // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 19. С. 104–110.
6. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М.: Энергия, 1966. 350 с.
7. Dubief Y, Delcayre F. On coherent-vortex identification in turbulence // J. Turbulence. 2000. Vol. 1, No. 1. P. 011.
8. Litvinov I.V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V., Hanjalic K. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2013. Vol. 42. P. 251–264.
9. Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеенко С.В. Экспериментальное исследование сильнозакрученного течения в тангенциальном завихрителе // Вестник КузГТУ. 2012. № 3(91). С. 129–135.

*Статья поступила в редакцию 12 августа 2014 г.,  
после доработки — 10 сентября 2014 г.*