

УДК 621.18, 533.6.08, 534.631

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В МОДЕЛИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ

<sup>1</sup>Шадрин Е.Ю., <sup>1</sup>Ануфриев И.С., <sup>2</sup>Глушков Д.О., <sup>1,3</sup>Папулов А. П.

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, e-mail: evgen\_zavita@mail.ru;

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск;

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В статье представлены результаты экспериментального исследования пульсаций давления и скорости в модели усовершенствованной вихревой топki с распределенным вводом потока и вертикально расположенными соплами вторичного дутья. Исследование аэродинамических характеристик закрученного течения при различных режимных параметрах проводилось в изотермической лабораторной модели (в масштабе 1:25) вихревой топki с использованием лазерной доплеровской измерительной системы и анализатора пульсаций давления. Полученные результаты выявили ряд особенностей структуры потока, а проведенный спектральный анализ пульсаций давления и скорости позволяет сделать вывод об отсутствии нестационарных крупномасштабных вихревых структур в исследуемой конструкции.

**Ключевые слова:** вихревая топка, физическое моделирование, пульсационные характеристики, изотермическая модель

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PULSATION CHARACTERISTICS OF THE SWIRLED FLOW IN A VORTEX FURNACE MODEL

<sup>1</sup>Shadrin E. Yu., <sup>1</sup>Anufriev I.S., <sup>2</sup>Glushkov D.O., <sup>1,3</sup>Papulov A.P.

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, e-mail: evgen\_zavita@mail.ru;

<sup>2</sup>Tomsk Politechnical University, Tomsk;

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

The article presents the results of an experimental study of pressure and velocity pulsations in the model of improved vortex furnace with distributed air supply and vertically oriented nozzles of the secondary blast. Investigation of aerodynamic characteristics of a swirling flow with different regime parameters was conducted in an isothermal laboratory model (in 1:25 scale) of vortex furnace using laser Doppler measuring system and pressure pulsations analyzer. The obtained results have revealed a number of features of the flow structure, and the spectral analysis of pressure and velocity pulsations allows to speak about the absence of large-scale unsteady vortical structures in the studied design.

**Keywords:** vortex furnace, physical modeling, pulsation characteristics, isothermal model

Важнейшим источником получения электрической и тепловой энергии в настоящее время является сжигание угля. Актуальная задача широкого использования в энергетике низкосортных углей требует создания новых энергоэффективных и экологически безопасных технологий сжигания. Одной из перспективных технологий в данном направлении является факельное сжигание пылеугольной смеси в вихревом потоке. Закрутка потока позволяет решить ряд задач: увеличить время пребывания топливных частиц в камере сгорания, что позволяет снизить механический недожог; уменьшить количество вредных выбросов до удовлетворяющего экологическим нормам уровня; оптимизировать конструкцию котельного оборудования, тем самым упростить и снизить затраты на конструирование и производство; обеспечить эффективное управление процессом сжигания топлива. Одним из этапов при разработке топков, использующих вихревую

технологии сжигания, является изучение их внутренней аэродинамики на лабораторных моделях. Детальное исследование основных особенностей структуры изотермического потока позволяет оптимизировать конструкционные и режимные параметры топочного устройства. Известно, что для интенсивно закрученных потоков при определенных условиях свойственна потеря устойчивости стационарного режима, которая может выражаться в возникновении прецессии вихревого ядра (ПВЯ). Интенсивные пульсации давления, связанные с ПВЯ, являются причиной износа энергоустановок и ухудшения рабочих характеристик вихревых аппаратов и оказывают негативное влияние на протекание топочных процессов. Поэтому для повышения эффективности и надежности работы вихревых топочных устройств на стадии разработки необходимо исследование возможных нестационарных эффектов, возникающих в рабочих участках.

В предыдущих работах авторов [2, 3] была визуализирована вихревая структура потока в модели усовершенствованной вихревой топки с распределенной подачей топливно-воздушной смеси и вертикально расположенными соплами вторичного дутья. Полученные результаты основывались на измерениях осредненных по времени характеристик потока и не позволяли сделать однозначный вывод о динамике вихревого ядра. Целью данной работы является экспериментальное исследование пульсационных характеристик потока в данной модели вихревой топки.

### Материалы и методы исследования

Исследование структуры потока и его пульсационных характеристик проводилось на автоматизированном экспериментальном стенде. На рис. 1, а представлена схема экспериментального стенда с установленной на нем трехкомпонентной 3D-ЛДА системой. Основными элементами данного стенда являются: магистраль подачи сжатого воздуха с контрольно-регулирующими приборами; модель усовершенствованной вихревой топки; генератор тумана (для засева исследуемого потока частицами-трассерами); измерительные приборы и компьютер со специализированным программным обеспечением. Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Поток воздуха подается через магистраль в изотермическую модель вихревой топки. Перед попаданием в модель поток засеивается специальными частицами-трассерами – микрокаплями жидкости на основе глицерина. Воздух с трассерами подается в модель через основные и дополнительные сопла, где создает интенсивно закрученный поток со сложной пространственной структурой. Изучение ха-

рактеристик потока проводится на основе современных оптических методов.

Основными элементами исследуемой вихревой топки являются (рис. 1, б): футерованная вихревая камера сгорания с тангенциальным подводом струй аэросмеси, создающих вихревой факел; диффузор; камера охлаждения, заканчивающаяся горизонтальным газоходом. Размеры модели составляют XYZ 320×1200×256 мм (масштаб 1:25), диаметр вихревой камеры горения 320 мм. Отличительной особенностью данной конструкции от ранее исследованной [4] (в которой дополнительный тангенциальный ввод расположен в нижней части камеры сгорания), является вертикальное расположение сопел вторичного дутья, а также наличие «козырька» внутри вихревой камеры для предотвращения выноса топливных частиц из камеры сгорания. Наличие рассредоточенных по периметру условной окружности камеры сгорания горелочных струй в данной топке позволяет управлять структурой течения и режимными параметрами. Преимущества данной конструкции вихревой топки описаны в работах [2, 3].

Измерения пульсаций давления проведены при помощи анализатора шума Bruel&Kjaer (предел измерения давления – до 103.5 кПа, частота измерений 4.2 Гц±20 кГц, чувствительность 54.9 мВ/Па). Датчик помещался внутрь вихревой камеры сгорания при помощи металлического отборника – тонкостенной трубки с диаметром 2.2 мм и длиной 160 мм. Передаточная функция отборника представлена в работе [7], где показана его применимость без корректировки до частот ~ 100 Гц. Измерения проводились вблизи условного центра вихревой камеры ( $x = y = 160$  мм,  $z = 126$  мм) при различных режимных параметрах ( $\gamma = 1 \div 4$ , где  $\gamma$  – соотношение расходов через основные и дополнительные сопла). Сигнал, оцифрованный с помощью АЦП (L-CARD E14-440), раскладывался в спектр с использованием быстрого преобразования Фурье.

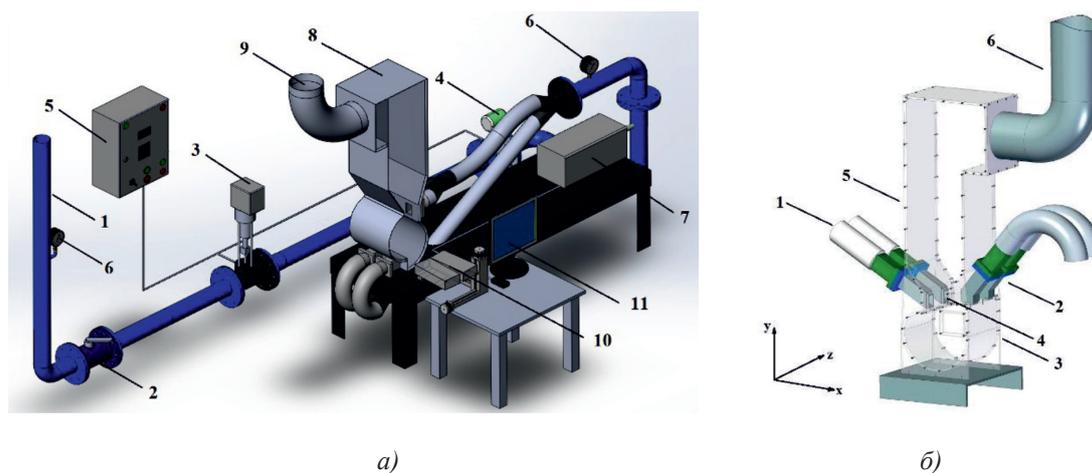


Рис. 1. (а) Схема экспериментального стенда: 1 – магистраль подачи сжатого воздуха, 2 – запорный кран, 3 – запорно-регулирующий клапан с электроприводом, 4 – преобразователь расхода, 5 – шкаф управления, 6 – манометры, 7 – дымогенератор, 8 – модель вихревой топки, 9 – вентиляция, 10 – измерительная система, 11 – компьютер. (б) Схема лабораторной модели усовершенствованной вихревой топки: 1 – основные сопла, 2 – вторичные сопла, 3 – камера сгорания, 4 – диффузор, 5 – камера охлаждения, 6 – газоход

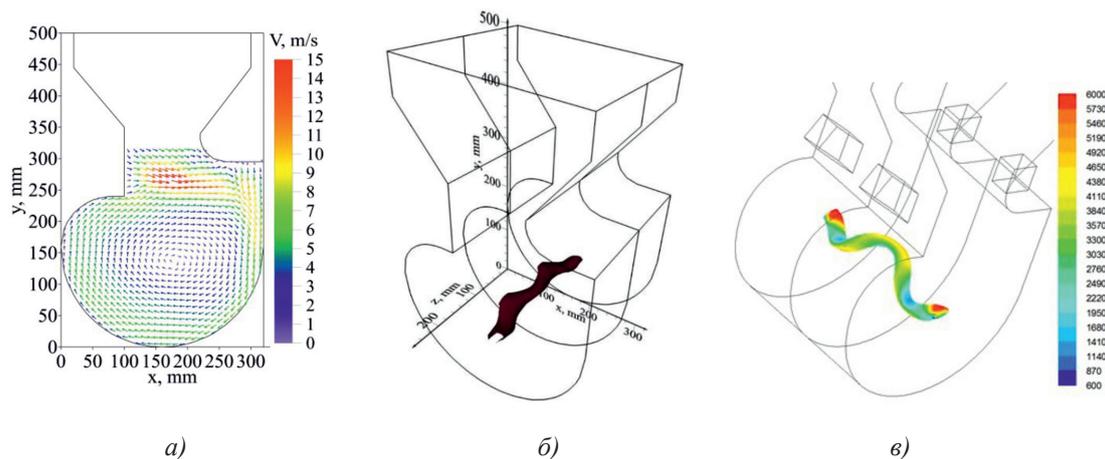


Рис. 2. Векторное поле скорости в сечении «по центру сопла» (а); изоповерхность динамического давления (б); изоповерхность полного давления (в)

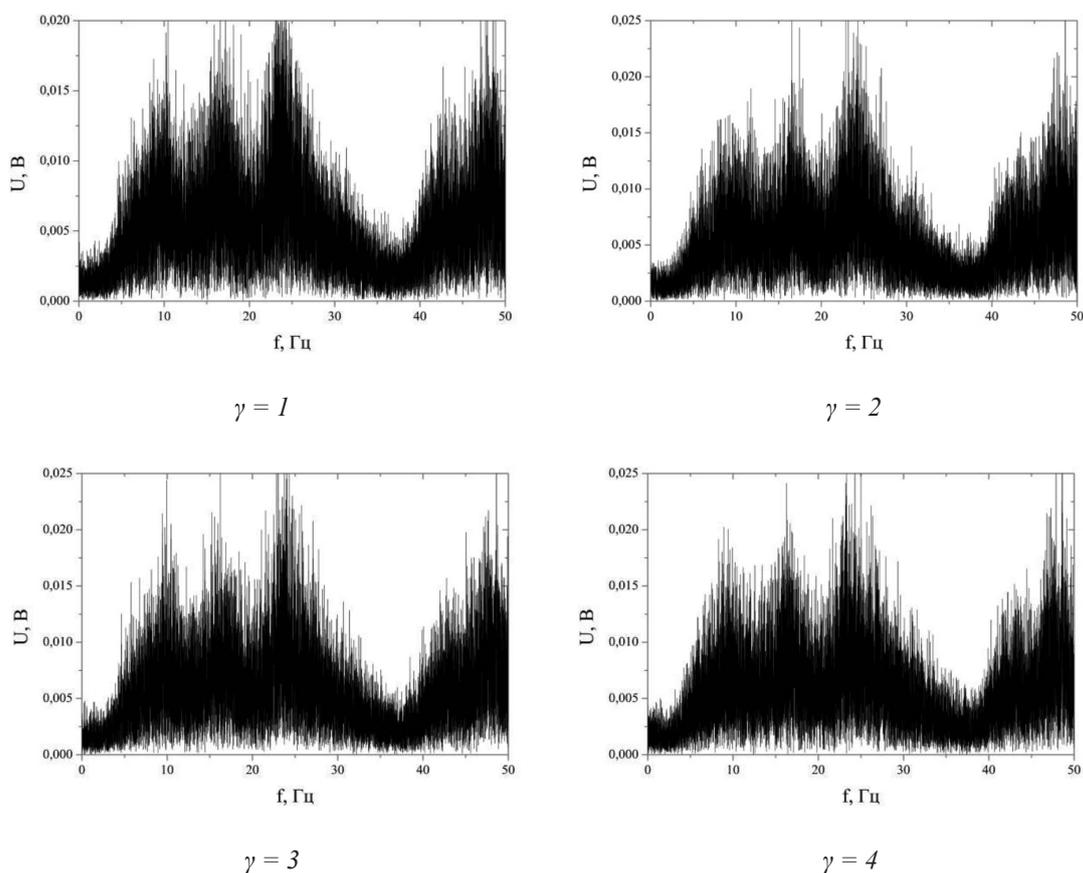


Рис. 3. Спектры пульсаций давления в центре камеры сгорания при различном соотношении расходов через основные и дополнительные сопла ( $\gamma$ )

Для диагностики пульсаций скорости потока был использован двухкомпонентный (2D-) лазерный доплеровский анемометр ЛАД-05 (частота до 3 кГц), разработанный в ИТ СО РАН. В основе метода лазерной доплеровской анемометрии лежит измерение скорости перемещения взвешенных в потоке частиц (трассеров). Лазерный блок формирует интерферен-

ционное поле с известной периодической структурой. Трассеры, пересекая это поле, рассеивают лазерное излучение во всех направлениях. Сигнал отраженного света, частота которого прямо пропорциональна скорости движения микрочастиц, а, следовательно, и потока в целом, регистрируется при помощи оптоэлектронного блока.

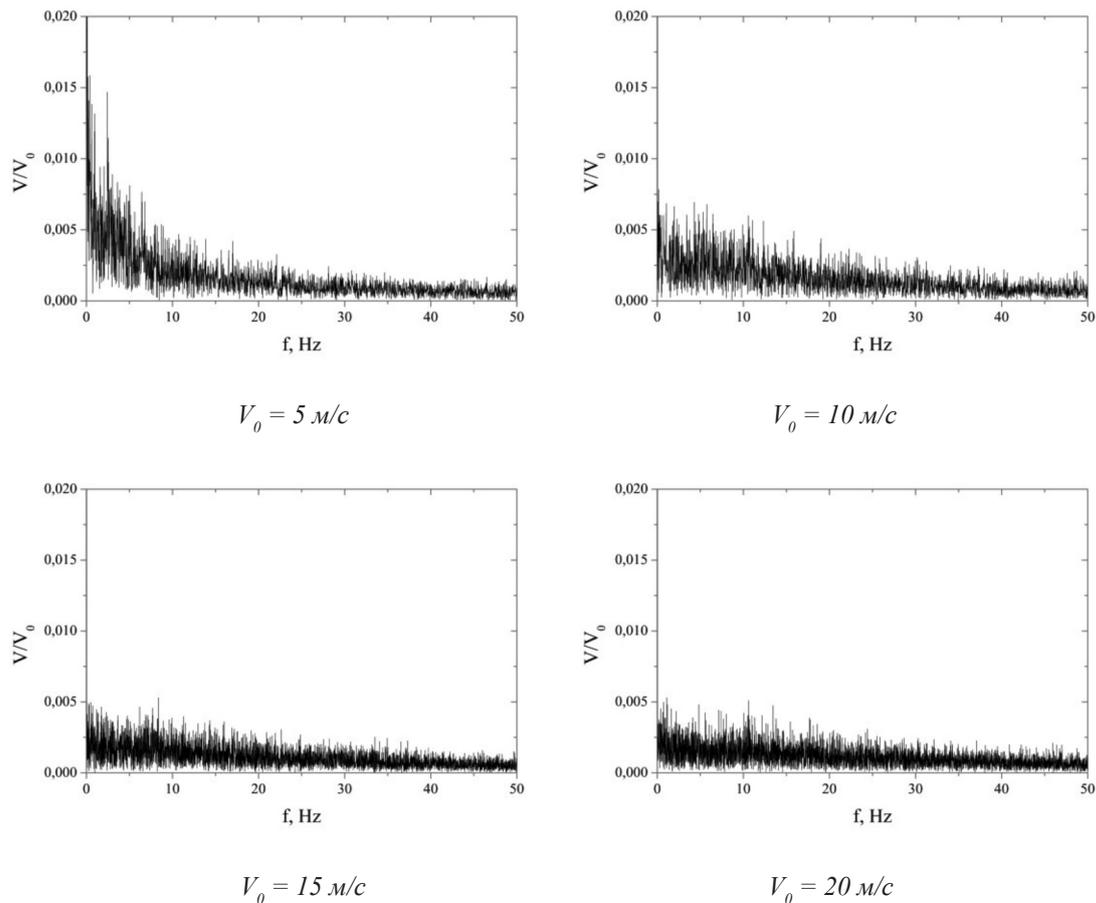


Рис. 4. Спектры пульсаций  $x$ -компоненты скорости при различных значениях начальной скорости,  $\gamma = 1$

Измерения выполнены в диапазоне чисел Рейнольдса  $3 \times 10^5 < Re < 6 \times 10^5$ , рассчитанном по диаметру вихревой камеры (320 мм) и модулю скорости в верхних горелках ( $V_0 = 5 \div 25 \text{ м/с}$ ). При этих условиях ( $Re > 10^4$ ) обеспечивается автомодельность режима и применимость результатов физического моделирования для анализа структуры изотермического течения в полноразмерной топке. Измерения проводились в течение времени (около 1 мин), достаточного для получения 16384 измерений на каждую компоненту ( $2^{14}$ ) для удобства дальнейшей обработки. Данные, полученные при помощи анемометра, были интерполированы на эквидистантную по времени сетку при помощи пакета Origin 8.0. Далее к обработанным данным была применена процедура быстрого преобразования Фурье для анализа спектральных характеристик.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Ранее на основе независимых методов измерений с использованием 3D-LDA- [2] и Stereo PIV-систем (Particle Image Velocimetry) [3] авторами была исследована аэродинамика исследуемой модели вихревой топки с распределенной тангенциальной подачей воздуха. На основе «критерия минимума полного давления» [5] визуализи-

зирована вихревая структура потока. На рис. 2, а представлено векторное поле скорости (сечение «по центру сопла»), полученное по результатам PIV-измерений [2], на рис. 2, б – изоповерхность динамического давления ( $p_{\text{дин}} = 0.25 \text{ Па}$ ), визуализирующая вихревое ядро потока [3]. Оно имеет выраженную W-образную форму, которая характерна также для широко известной вихревой топки ЦКТИ [1]. Для сравнения на рис. 2, в приведена изоповерхность полного давления и нанесенное на нее распределение Q-критерия, полученные по результатам численного моделирования [6].

Для анализа стационарности выявленной вихревой структуры были проведены измерения пульсаций давления в центральной области камеры сгорания. Спектры для сигнала с микрофона ( $U$ , в вольтах), полученные для различных соотношений расходов через основные и дополнительные сопла ( $\gamma$ ), представлены на рис. 3. Они имеют сложный вид с несколькими пиками. Однако положение этих пиков не зависит ни от соотношения расходов, ни от величины

суммарного расхода, что свидетельствует об отсутствии нестационарных вихревых структур (таких как прецессирующее вихревое ядро или др.). Представленные в спектре пики характеризуют модель как акустический резонатор [1].

Используемый в измерениях анализатор шума имеет ограничения по диапазону частот. Поэтому анализ пульсаций на низких частотах (до 5 Гц) проводился с использованием лазерного доплеровского анемометра ЛАД-05. Измерения проводились в различных точках модели, вблизи условной оси искривленного вихревого ядра и возле входных сопел, при различных значениях начальной скорости. На рис. 4 представлены характерные спектры пульсаций горизонтальной компоненты скорости  $V$ , нормированной на начальную скорость  $V_0$ , в точке ( $x = 150$  мм;  $y = 100$  мм,  $z = 64$  мм) в плоскости, проходящей через центры сопел. Полное отсутствие пиков подтверждает сделанный ранее вывод об отсутствии ПВЯ. Данные спектры являются характерными для всех точек, в которых проводились измерения.

#### Заключение

С применением современных методов измерений исследованы пульсационные характеристики закрученного потока в усовершенствованной модели вихревой топки с распределенной подачей топливно-воздушных струй и вертикально расположенными соплами вторичного дутья. Результаты проведенного спектрального анализа пульсаций давления и скорости турбулентного закрученного потока при различных режимных параметрах свидетельствуют

об устойчивости стационарной структуры вихревого ядра потока в исследуемой усовершенствованной модели вихревой топки. Отсутствие негативных эффектов, связанных с прецессией вихревого ядра служит одним из важных практических достоинств исследуемой конструкции топки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-38-50049-«мол\_нр»).*

#### Список литературы

1. Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Диагностика пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 6. – С. 815–818.
2. Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топки // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 15. – С. 25–32.
3. Ануфриев И.С., Куйбин П.А., Шадрин Е.Ю., Шарборин Д.К., Шарыпов О.В. Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топки стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 4.
4. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 1. Аэродинамика течения в вихревой топке // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 41–46.
5. Dubief Y., Delcayre F. On coherent-vortex identification in turbulence // J. of Turbulence. 2000. Vol. 1, No. 11. – P. 1–22.
6. Krasinsky D.V., Sharypov O.V. Numerical modeling of pulverized coal combustion in the vortex furnace with dual upper-port loading // Journal of Engineering Thermophysics – 2015. – Vol. 24, No. 4. – P. 348–356.
7. 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.