

PIV-ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В МОДЕЛИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ

Ануфриев И.С.¹, Шадрин Е.Ю.^{1,2}

¹ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия (630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1), e-mail: anufriev@itp.nsc.ru

²ФГАОУ ВО "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет" (НГУ), г.Новосибирск, Россия (630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2) evgen_zavita@mail.ru

Исследована внутренняя аэродинамика в модифицированной конфигурации вихревой топки с горизонтальной осью вращения потока и рассредоточенным тангенциальным вводом горелочных струй, ориентированных в одном направлении и расположенных на одной боковой поверхности камеры сгорания. С использованием метода цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry) проведены измерения полей мгновенной скорости в разных сечениях лабораторной модели при различных режимных параметрах. Для PIV измерения скорости турбулентного течения в модели вихревой топки использовался измерительный комплекс «ПОЛИС»-2С-140-4М-PIV. Полученные результаты показали, что одностороннее расположение горелок оказывает отрицательное влияние на внутреннюю аэродинамику вихревой топки, поскольку приводит к выносу основной части потока в камеру охлаждения, что на практике означает повышение механического недожога топлива.

Ключевые слова: вихревая топка, эксперимент, PIV, поле скорости

PIV-MEASUREMENT OF SWIRL FLOW VELOCITY IN A MODEL OF VORTEX FURNACE

Anufriev I.S.¹, Shadrin E.Y.^{1,2}

¹Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia (630090, Novosibirsk, Lavrentev av., 1), e-mail: anufriev@itp.nsc.ru

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia (630090, Novosibirsk, Pirogov str., 2), evgen_zavita@mail.ru

The internal aerodynamics of the modified configuration of a vortex furnace with a horizontal axis of flow rotation and dispersed tangential inlet of burner jets oriented in one direction and disposed on one side surface of the combustion chamber has been investigated. Using the method of particle image velocimetry (PIV) the instantaneous velocity fields in different sections of the laboratory model under various operating parameters measured. For PIV-measuring of the turbulent flow velocity in the model of vortex furnace used measuring complex "POLIS"-2C-140-4M-PIV. The results showed that a unilateral arrangement of burners have a negative impact on the internal aerodynamics of the vortex furnace because it leads to removal of the main part of the flow in the cooling chamber, it means increasing the mechanical underburning of fuel in practice.

Keywords: vortex furnace, experiment, PIV, velocity field

В проекте исследуется новая вихревая топка, согласно патенту РФ № 2042084. В отличие от ранее исследованной авторами усовершенствованной конструкции топочного устройства (рис.1-а) с горизонтальной осью вращения и рассредоточенным тангенциальным вводом горелочных струй, ориентированных в противоположном направлении [1-4], в данной топке сопла направлены в одну сторону и расположены на одной боковой поверхности камеры сгорания, за счет этого отсутствует «перчаточная» схема потока. Целью исследований являлось изучение структуры потока в горизонтальной вихревой топке такой конфигурации.

Главными элементами модифицированной конструкции вихревой топки являются (рис.1-б): вихревая камера горения с горизонтальной осью вращения, диффузор и камера

охлаждения, заканчивающаяся горизонтальным газоходом. На фронтальной стенке вертикально расположены сопла для подачи топливовоздушной смеси, а нижние сопла для подачи вторичного окислителя расположены горизонтально и ориентированы в том же направлении, что и верхние. Габаритные размеры лабораторной модели 300×1200×300 мм. Диаметр вихревой камеры сгорания 300 мм. Углы раскрытия диффузора 30°. Ширина горловины диффузора составляет 30% от диаметра камеры горения. Размеры сопел 40×50 мм.

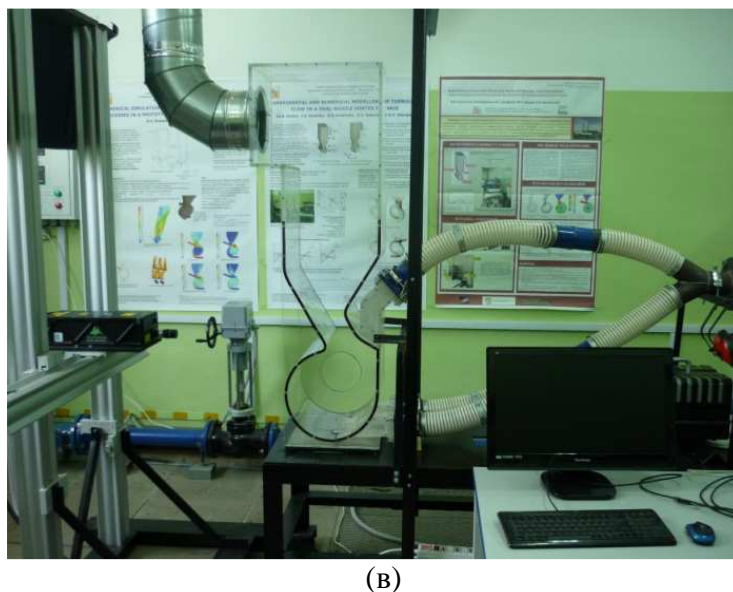
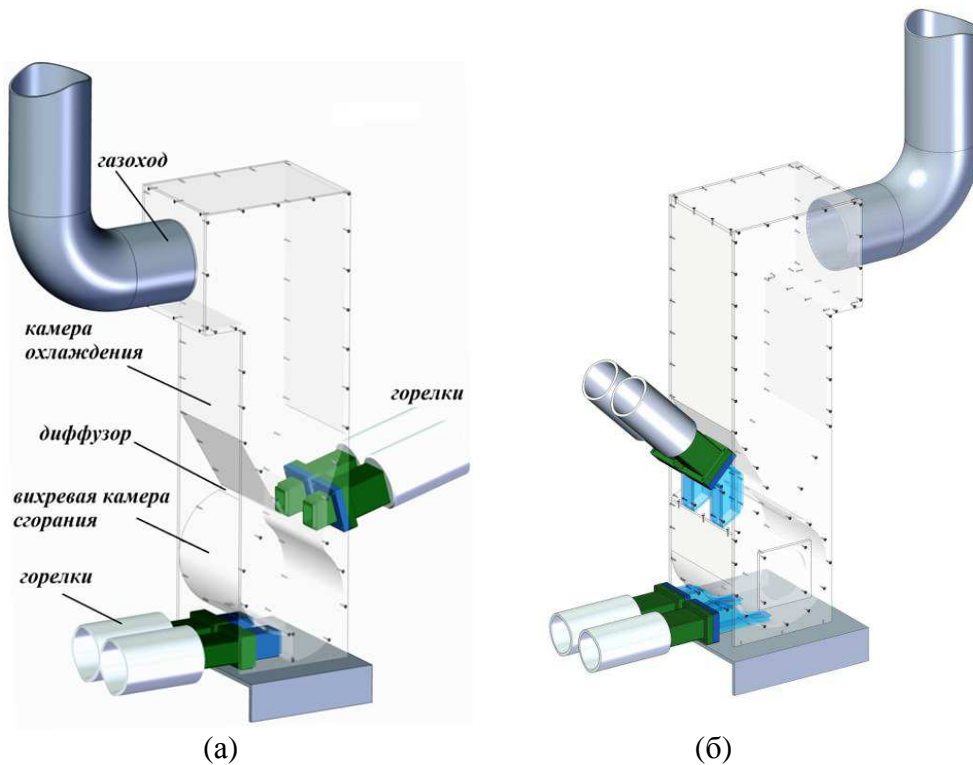


Рис.1. Схема модели усовершенствованной вихревой топки (а) [1]; схема модели новой (исследуемой) вихревой топки (б); экспериментальный стенд для исследования аэродинамики в вихревой топке, оснащенный PIV-системой «Полис» (в)

Диагностика потока в исследуемой конструкции вихревой топки осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry – PIV). Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, зафиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Размер, плотность и объемная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны [5]. Измерительной областью потока считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на цифровую камеру, последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры.

Для PIV измерения скорости турбулентного течения в исследуемой модели вихревой топки использовался измерительный комплекс «ПОЛИС»-2С-140-4М-PIV (разработанный в ИТ СО РАН). Измерительный PIV-комплекс включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG лазер QuantelEverGreen с энергией в импульсе 145 мДж (длина волны 532 нм, частота до 15 Гц, длительность импульса 10 нс); объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросс-корреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей (кадровая частота до 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя кадрами 12 мкс, время экспозиции от 3,5 мкс до 296 с); широкоугольный объектив Nikkor 28mm F/2.8 D (диаметром 52 мм); синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow. В данной работе в качестве трассеров были выбраны частицы глицерина (1-5 мкм), создаваемые дымогенератором. Их использование позволило равномерно засеивать поток во всей измерительной области с требуемой концентрацией (5-10 штук для элементарной расчетной ячейки 32×32 пикселя) и успешно провести PIV измерения с используемой измерительной системой.

Измерения проводились в нескольких сечениях XOY. Исследования проведены для трех различных режимов работы: варьировалась величина отношения расхода воздуха через верхние и нижние сопла в диапазоне от 1 до 3 (при этом суммарный расход оставался постоянным и составлял 432 м³/час, $Re=3 \cdot 10^5$). Для 1:1 среднерасходные скорости на входном срезе сопел составляли 15 и 15 м/с, для 2:1 – 20 и 10 м/с соответственно, для 3:1 – 22,5 и 7,5 м/с соответственно. Согласно используемому алгоритму в программе ActualFlow задержка между кадрами выбирается из тех соображений, что за время между кадрами

изображение частицы должно смещаться не более чем на четверть размера элементарной ячейки, т.е. не более 8 пикселей для ячейки 32×32 . При этом необходимо учитывать трехмерные эффекты, из-за которых за время между парой кадров частица успеет уйти из лазерного ножа. В таком случае задержка подбирается под конкретные условия (как правило, уменьшается). В экспериментах задержка между парой кадров составляла 50 мкс (для расчетной ячейки 64×64 пикселя), между парами кадров – 800 мс (т.е. с частотой 1,25 Гц). Размер кадра составил $\sim 320 \times 320$ мм (размер измерительной области 300×300 мм). При этом была измерена физическая область размером 300×400 мм, для этого измерения в каждом сечении проводились в двух зонах по высоте. После чего в процессе обработки выполнялась «сшивка» данных с приведением их к одной системе отсчета.

Для каждого сечения была проведена серия измерения по 100 реализаций. Сбор данных и их обработка выполнялись в программе ActualFlow. Для обработки данных использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм расчёта полей скорости с разбиением расчётной области на ячейки размером 64×64 пикселей. Таким образом (при разрешении камеры 2048×2048 пикселей) получалось 64×64 вектора. Т.е. пространственный шаг сетки составил ~ 5 мм. Визуализация векторных полей выполнена в пакете Surfer. Для более наглядной демонстрации векторных полей часть векторов исключалась из построения (чтобы не загромождать рисунок). Ниже представлены результаты проведенных PIV-измерений.

На рисунке 2 для примера показаны поля мгновенной скорости в последовательные моменты времени, демонстрирующие сложный турбулентный характер течения в вихревой топке. Поля скорости, представленные на рисунках 3-5, изображают среднюю во времени картину потока. Анализ результатов показывает, что сильной закрутки течения не наблюдается: на первом же обороте поток стремится выйти в камеру охлаждения.

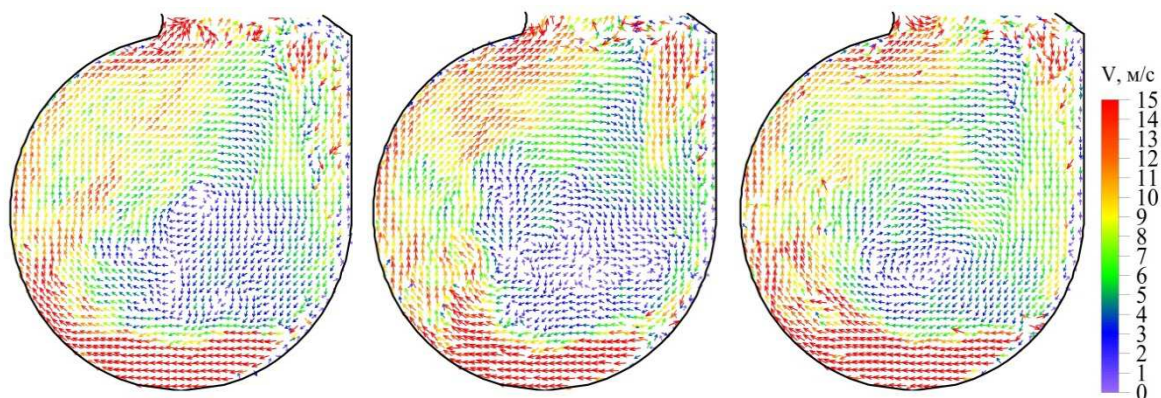


Рис.2. Поля мгновенной скорости в последовательные моменты времени с интервалом в 800 мс (расход 1:1, сечение XOY по центру сопел – $z=80$ мм)

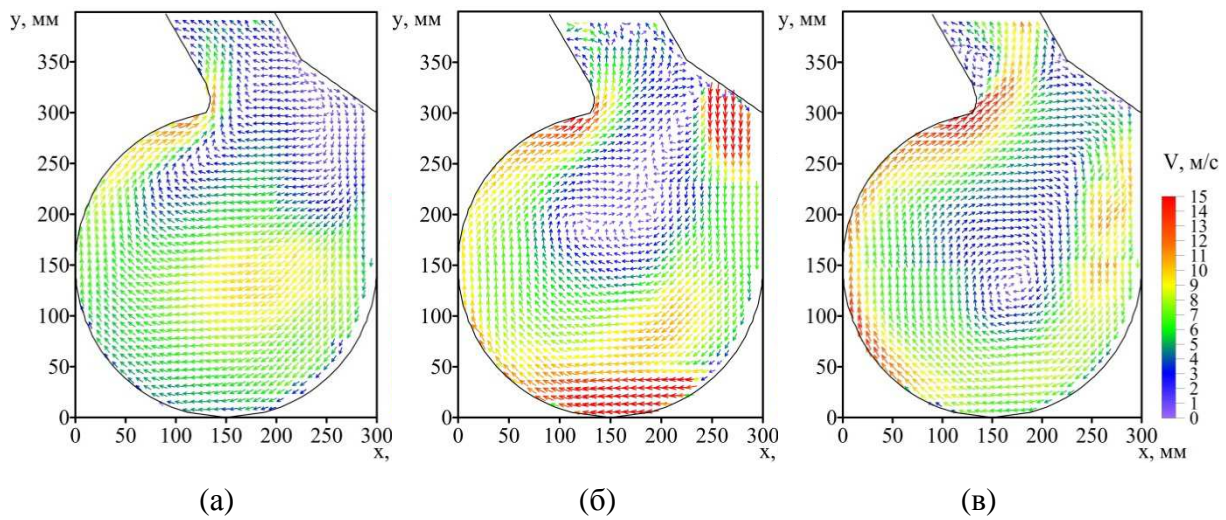


Рис. 3. Векторные поля средней во времени скорости (расход 1:1):

(а) вблизи торцевой стенки; (б) по центру сопел; (в) в плоскости симметрии

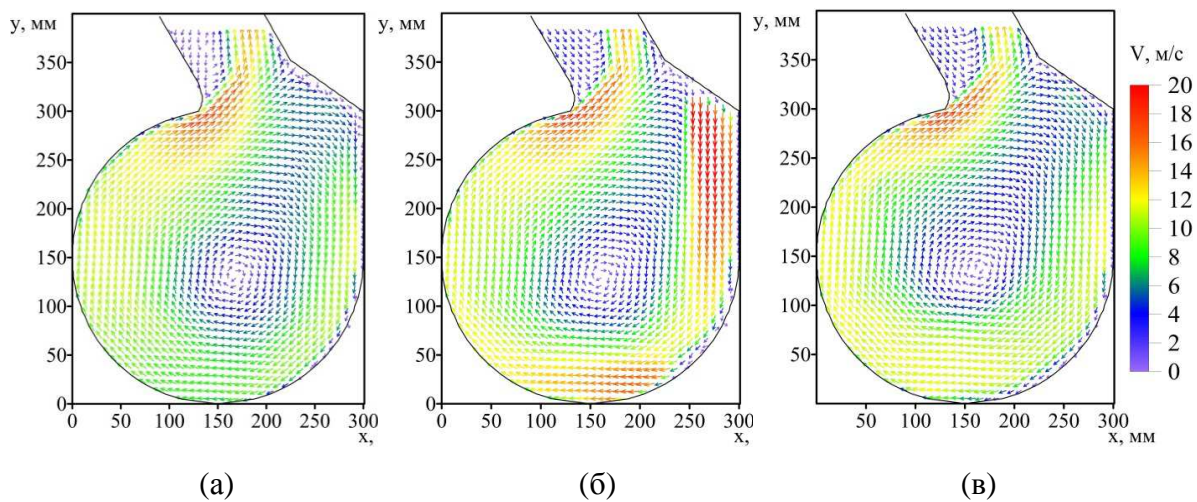


Рис. 4. Векторные поля средней во времени скорости (расход 2:1):

(а) вблизи торцевой стенки; (б) по центру сопел; (в) в плоскости симметрии

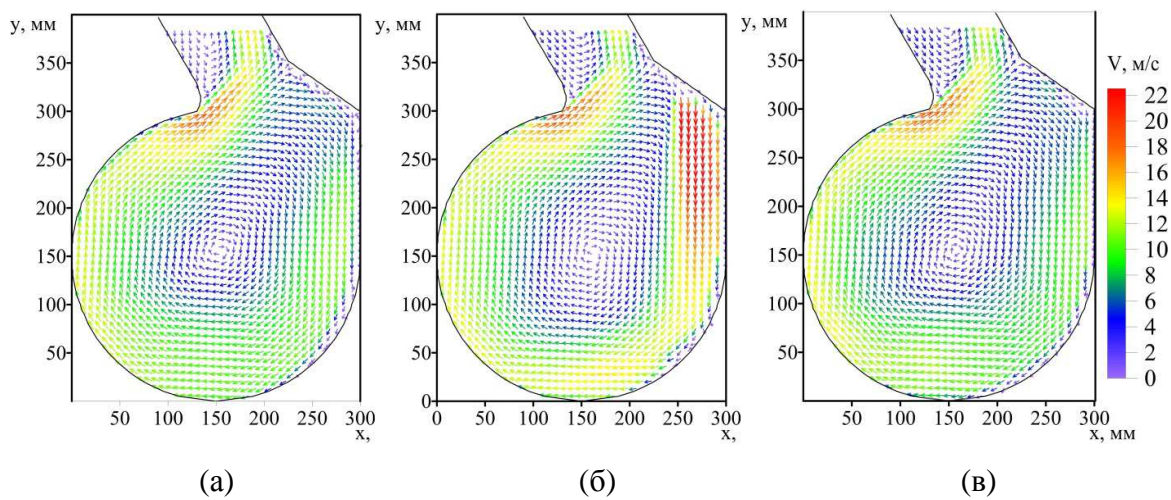


Рис. 5. Векторные поля средней во времени скорости (расход 3:1):

(а) вблизи торцевой стенки; (б) по центру сопел; (в) в плоскости симметрии

Это связано с отсутствием «перчаточной» схемы течения. Сравнение структуры потока в разных сечениях свидетельствует о том, что входящие струи сильно размываются вдоль вогнутых стенок камеры сгорания в поперечном направлении. Это обусловлено конструктивными особенностями вихревой топки. Для соотношения расходов 2:1 и 3:1 положение условной оси центра вихря не зависит от поперечной координаты, что указывает на прямолинейную форму вихревого ядра потока.

Проведенные исследования показали, что одностороннее расположение горелок оказывает отрицательное влияние на внутреннюю аэродинамику вихревой топки, поскольку приводит к выносу основной части потока в камеру охлаждения, что на практике означает повышение механического недожога топлива.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00137).

Список литературы

1. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А. и др. Исследование структуры закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания методом лазерной доплеровской анемометрии // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т.38, вып.24. – С.39-45.
2. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Копьев Е.П., Красинский Д.В., Саломатов В.В., Шадрин Е.Ю. Управление аэродинамикой закрученного потока в вихревой топке // Современные проблемы науки и образования. – 2013, № 5.
3. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Визуализация структуры потока в вихревой топке // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т.40, вып.19. – С.104-110.
4. Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т.39, вып.10. – С.36-43.
5. Шарыпов О.В. Диссипативные эффекты и детонация в запыленных средах // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 54-60.

Рецензенты:

Шарыпов О.В., д.ф.-м.н., профессор ФГБОУ ВПО "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет", г.Новосибирск;

Куйбин П.А., д.ф.-м.н., ученый секретарь ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г.Новосибирск.