

УДК 532.5

## ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЩЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Алексеев Сергей Владимирович<sup>1,2</sup>,  
aleks@itp.nsc.ru

Шторк Сергей Иванович<sup>1,2</sup>,  
shtork@itp.nsc.ru

Юсупов Роман Равильевич<sup>1,2</sup>,  
romansemsk@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт теплофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Актуальность работы обусловлена широким использованием взаимодействующих закрученных потоков в устройствах для гашения энергии и в вихревых камерах сгорания. Чтобы оптимизировать конструкцию таких устройств, необходимо понимание структуры течения и механизмов взаимодействия соосных закрученных потоков. Применительно к горелочным устройствам данные исследования необходимы для наиболее эффективного сжигания топлива, уменьшения загрязняющих выбросов продуктов сгорания и увеличения эксплуатационного срока службы камер сгорания.

**Цель работы:** экспериментальное исследование аэродинамической структуры закрученного течения в изотермической модели двухступенчатой вихревой камеры сгорания. Основное внимание уделено процессу смешения потоков двух последовательно соединённых тангенциальных завихрителей первой и второй ступеней рабочего участка.

**Методы исследования:** визуализация течения с использованием цифровой высокоскоростной камеры для исследования различных режимов работы вихревого горелочного устройства и лазерно-доплеровская анемометрия для получения профилей осреднённых по времени осевой и тангенциальной компонент скорости, а также их пульсационных составляющих (среднеквадратичные отклонения).

**Результаты.** В случае режима с созакруткой потоков между двумя ступенями рабочего участка было выявлено образование вторичной неустойчивости течения в виде прецессирующего вихря. При режиме с противокруткой обнаружено эффективное смешение закрученных потоков. Исходя из результатов проведенных изотермических опытов можно заключить, что вариант с противокруткой является более предпочтительным для использования в двухступенчатой горелке в плане возможности более быстрого смешения горелочных струй первой и второй ступеней. Результирующее течение характеризуется более равномерным заполнением внутреннего объема устройства в сочетании с устойчивой выраженной закруткой потока, которая должна увеличивать время пребывания частиц топлива в зоне активного горения и, соответственно, полноту его выгорания. Последний фактор достигается без развития сильной гидродинамической неустойчивости течения, характерной для аппаратов с сильной закруткой потока.

### Ключевые слова:

Вихревые горелки, соосные закрученные потоки, скоростная визуализация, лазерно-Допплеровская анемометрия, прецессирующее вихревое ядро.

### Введение

Закрученные потоки широко применяются во многих технических устройствах, в том числе для смешения жидкостей, генерации аэрозолей, распыливания жидкого топлива и стабилизации факела. В закрученных потоках интенсифицируются процессы тепло- и массообмена, что используется для охлаждения, нагрева и очистки рабочих жидкостей и газов, для разделения суспензий, сепарации и классификации сыпучих материалов. В настоящее время одной из весьма интересных задач в области закрученных течений является изучение поведения взаимодействующих соосных закрученных потоков [1]. Актуальность подобных исследований вызвана, в частности, применением встречных закрученных потоков в устройствах для гашения энергии [2, 3] и вихревых камерах сгорания [4–9]. Чтобы оптимизировать конструк-

цию таких устройств, необходимо понимание структуры течения и механизмов взаимодействия контрзакрученных потоков. Применительно к горелочным устройствам данные исследования необходимы для наиболее эффективного сжигания топлива, уменьшения загрязняющих выбросов продуктов сгорания и увеличения эксплуатационного срока службы камер сгорания.

Настоящая работа посвящена изотермическому моделированию аэродинамической структуры потока в двухступенчатом вихревом горелочном устройстве с тангенциальной закруткой потока. Ввиду простоты геометрии горелки с тангенциальным или улиточным завихрителем часто используются на практике, например, для сжигания мелкодисперсного пылеугольного топлива [10]. В свою очередь двухступенчатая конструкция горелок может, например, использоваться в схемах сжигания

пылеугольного топлива, когда в первую поджиговую ступень подается более реакционноспособное топливо, подвергнутое механохимической активации, а во вторую – более низкорекреационное угольное топливо, подготовленное обычным способом [11].

Изотермическое моделирование, которое позволяет с относительно небольшими затратами определить направление оптимизации по режимам работы и геометрии рабочего участка, широко использовалось ранее для разработки энергетических установок [12]. Данный подход остается актуальным и в настоящее время, дополненный возможностями современных бесконтактных оптических систем (лазерно-Допплеровская анемометрия (ЛДА), полевые измерители скорости (PIV)) для детального анализа внутренней структуры потоков [13, 14]. При этом физический эксперимент обеспечивает также эмпирическую информацию для верификации результатов математического моделирования [15, 16]. В этом контексте результаты настоящих исследований, проведенных с применением ЛДА, будут использоваться для сопоставления с данными, полученными с помощью коммерческого численного кода. Дальнейшие исследования будут также включать опыты на огневых установках для проверки обоснованности выводов, сделанных на основе изотермических экспериментов.

#### Методика эксперимента

Гидродинамический стенд и рабочий участок

Изотермическое моделирование двухступенчатого горелочного устройства проводилось с использованием воды в качестве рабочей жидкости, что дает более широкие возможности в проведении наглядной визуализации потока [15]. Модель горелочного устройства – 6 подключалась к замкнутому гидродинамическому контуру (рис. 1), состоящему из бака – 1 емкостью 0,5 м<sup>3</sup>, центробежного насоса X100–80–160T153 – 2 с максимальными расходом и напором 100 м<sup>3</sup>/ч и 4 атм., соответственно, линий подачи жидкости в первую и вторую ступени с устройствами измерения расходов по каждой линии (4 – расходомерная шайба, 5 – вихреакустический расходомер Метран-300ПР). Суммарный расход регулировался с помощью частотного преобразователя Веспер Е2–8300–030Н – 3, а расходы через каждую линию – с помощью регулировочных кранов. Для монтажа гидродинамического контура использованы подводящие трубы и разборные компрессионные соединительные элементы, изготовленные из полиэтилена низкого давления (ПЭ 100, ПЭ 80).

Кроме соотношения расходов между ступенями, была предусмотрена возможность изменения закрутки потока во второй ступени модели перекрытием или открытием соответствующих подводящих патрубков с помощью запорных кранов. Суммарный расход в рабочем участке для данной серии экспериментов был порядка 10 м<sup>3</sup>/ч, что со-

ответствовало турбулентному режиму течения с числом Рейнольдса порядка 10<sup>5</sup>. Эти условия, характерные для работы практических устройств, соответствуют области автомодельности, когда структура течения не зависит от числа Рейнольдса [12, 15].

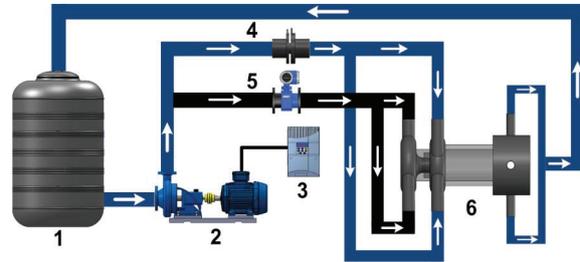


Рис. 1. Схема гидродинамического стенда для моделирования аэродинамической структуры закрученного течения в двухступенчатой горелке: 1 – бак, 2 – насос с двигателем мощностью 22 кВт, 3 – частотный преобразователь, 4 – расходомерная шайба, 5 – вихревой расходомер, 6 – рабочий участок

Fig. 1. Scheme of a hydrodynamic bench for modeling the aerodynamic structure of a swirling flow in a two-stage burner: 1 is the tank, 2 is the pump with 22 kW engine, 3 is the frequency converter, 4 is the flow meter, 5 is the vortex flow meter, 6 is the working area

В качестве рабочего участка используется гидродинамическая модель двухступенчатой вихревой горелки (рис. 2). Для обеспечения оптического доступа рабочая камера изготовлена из прозрачного материала – оргстекла. Входная часть камеры состоит из двух последовательно соединённых завихрителей диаметром 185 мм, в которых реализована закрутка потока при помощи тангенциального подвода через патрубки с внутренним диаметром 40 мм. Поток жидкости получает закрутку на завихрителе – 1 и дальше, пройдя через сопло, попадает в область внезапного расширения. В дальнейшем в этой области он взаимодействует с потоком, который получает закрутку на втором завихрителе – 3. В зависимости от способа подачи жидкости на второй завихрителе создаётся как созакрутка (белые стрелки), так и противозакрутка (чёрные стрелки) двух потоков, сформированных завихрителями первой и второй ступеней рабочего участка. Результирующий поток из цилиндрической области диаметром 104 мм – 4 поступает в выходную секцию – 5, откуда отводится через четыре симметрично расположенных патрубка с внутренним диаметром 26 мм.

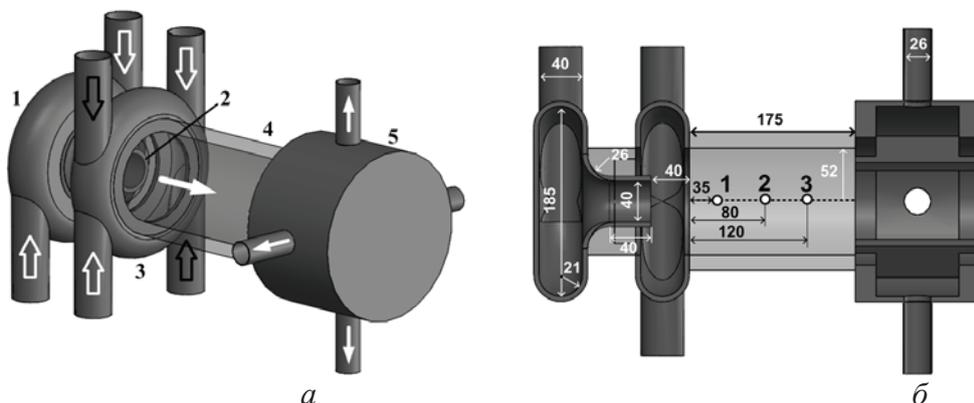
Оптические системы для анализа структуры течения

В процессе опытов на изотермической модели проводилась визуализация потока. В качестве маркеров течения использовались мелкие пузырьки воздуха, которые подсвечивались источником света (светодиодный прожектор для анализа общей картины течения или узкий световой «нож», формируемый разверткой на цилиндрической линзе лазерного пучка от твердотельного лазера,

для визуализации структуры течения в конкретном сечении рабочего участка). Воздух для визуализации подавался на вход центробежного насоса, в котором происходило диспергирование крупных пузырей на более мелкие со средним размером порядка 1 мм. Такие пузыри достаточно точно отслеживают движение потока и, кроме того, за счет эффекта полного внутреннего отражения дают яркие, хорошо заметные треки при освещении источником света. Картина течения регистрировалась на скоростную цифровую камеру PCO 1200hs с максимальным разрешением 1280×1024 пикселей при частоте кадров до 636 Гц.

Для получения количественной информации о поле течения использовался двухкомпонентный лазерно-Доплеровский анемометр (ЛДА) ЛАД-06и, работающий на обратном рассеянии. Оптический блок имеет в своем составе полупроводниковый лазерный источник мощностью 70мВт, излучающий на длине волны 684 нм, и дифференциальную формирующую оптику с фокусным расстоянием 500 мм. Для обеспечения чувствительности системы к направлению скорости применяется частотный сдвиг одного из лазерных пучков на 80 МГц с помощью ячейки Брэгга. Оптический блок, формирующий измерительный объем с размерами 0,05×0,05×1 мм (в воздухе), установлен на 3-координатное программируемое перемещающее устройство с точностью позиционирования измерительного объема не менее 0,1 мм. В качестве трассеров потока при ЛДА-измерениях использовались полистирольные сферические частицы размером 20 мкм с нейтральной плавучестью. В процессе измерений в каждой измерительной точке накапливался статистика из 5000 доплеровских «вспышек» (прохождение трассеров через измерительный объем), что обеспечивает достоверный интервал не меньше 95 % [17].

Следует заметить, что при измерениях с использованием ЛДА в цилиндрическом участке зондирующие лучи, формирующие измерительный объем, подвержены оптической аберрации вследствие того, что они пересекают криволинейные границы раздела сред с различной оптической плотностью [18]. Этот эффект затрудняет измерение поперечной тангенциальной компоненты скорости, когда закрученный поток зондируется вдоль диаметральной линии от передней стенки к тыльной (рис. 2). Причем эффект искажения тем сильнее, чем на большую глубину от ближней боковой стенки цилиндрического канала перемещается измерительный объем. Сильным искажениям также подвержены зондирующие пучки при измерениях радиальной компоненты скорости, когда необходимо перемещать измерительный объем в ортогональном направлении от центра канала вверх и вниз. Только измерение осевой компоненты скорости вдоль горизонтальной меридиональной плоскости не сопряжено с проблемой оптических искажений. Отметим, что в нашем случае эффект оптических искажений существенно уменьшен вследствие двух обстоятельств – плоская наружная граница (рабочий участок с внешней стороны выполнен в виде четырехгранной призмы, а измерение ведется через одну из плоских граней) и вода внутри канала, отличие оптической плотности которой от материала стенок (оргстекло) относительно невелико. Тем не менее, в данной работе не представлены результаты по радиальной компоненте скорости, поскольку оптические искажения при удалении измерительного объема вверх/вниз от продольной оси канала настолько сильные, что приводят к пространственному рассогласованию зондирующих пучков, препятствующему их пересечению. Также, как будет видно из представленных ниже результатов, из-за сильных оптических



**Рис. 2.** Схема гидродинамической модели двухступенчатой горелки: а) 3-d вид: 1 – завихритель первой ступени горелочного устройства, 2 – профилированное сопло, 3 – завихритель второй ступени, 4 – область внезапного расширения, 5 – выходная секция с отводами и системой лопаток; б) продольный разрез: 1, 2, 3 – измерительные сечения при ЛДА-измерениях

**Fig. 2.** Diagram of a hydrodynamic model of a two-stage burner: а) 3-d view: 1 is the swirler of the first stage of the burner, 2 is the shaped nozzle, 3 is the swirl of the second stage, 4 is the sudden expansion area, 5 is the outlet section with taps and blade system; б) longitudinal section: 1, 2, 3 are the measuring sections for LDA measurements

искажений не удалось провести измерения скорости вблизи дальней стенки из-за ухудшения ЛДА сигнала по тангенциальной компоненте (процесс измерения останавливался, как только сигнал по одной из компонент скорости прерывался).

### Результаты эксперимента

#### Визуализация течения

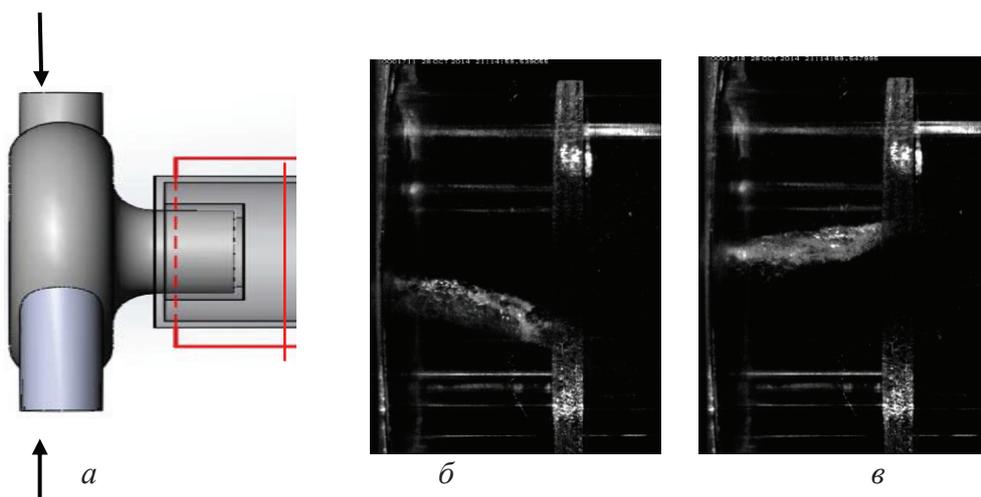
На рис. 3 показана визуализация течения в первой ступени модели горелочного устройства. Для обеспечения визуального обзора вторая ступень при этом не установлена. Сильная закрутка потока в тангенциальном завихрителе первой ступени приводит к эффекту распада закрученной струи на выходе из сопла за счет того, что поток проходит область внезапного расширения. Данный эффект характеризуется образованием центральной зоны возвратного течения. В изотермических условиях также наблюдается развитие сильной гидродинамической неустойчивости потока в виде прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). ПВЯ хорошо выражено внутри сопла и в непосредственной близости от среза сопла, но быстро разрушается в области внезапного расширения и на расстоянии менее половины диаметра сопла уже практически неразличимо (рис. 3). При одноступенчатой конфигурации после дезинтеграции первичного прецессирующего вихря в области внезапного расширения происходит формирование вторичного прецессирующего вихря. В зависимости от длины цилиндрической камеры вторичный вихрь имеет одно- или двухспиральную геометрию [19].

Проведенные ранее опыты с одноступенчатой конфигурацией в условиях горения показали, что образующаяся центральная рециркуляционная

зона способствует надежной стабилизации факела в широком диапазоне режимов работы горелки. Также в условиях горения гидродинамическая неустойчивость хотя и присутствует, но оказывается значительно подавленной, что сказывается на существенном снижении уровня пульсаций потока [20]. Таким образом, выбор данной конфигурации для использования в качестве первой поджиговой ступени в двухступенчатом горелочном устройстве является вполне оправданным. Дальнейшие исследования должны определить оптимальные условия для эффективного смешения потока первой ступени с потоком, подаваемым во вторую ступень.

Далее представлены результаты исследований для режимов работы с включенной второй ступенью. Как первый этап исследований была проведена визуализация режимов течения с созакруткой и противокруткой для различных соотношений расходов жидкости между двумя ступенями рабочего участка. Примеры полученных результатов визуализации режимов с созакруткой и противокруткой потоков представлены на рис. 5 для цилиндрической области, где уже произошло слияние закрученных потоков от двух ступеней (рис. 4). Мгновенная структура течения показана в виде стоп-кадров скоростной видеозаписи, проведенной для двух характерных режимов: с большим расходом в первой ступени –  $Q_1=6$  м<sup>3</sup>/ч,  $Q_2=4$  м<sup>3</sup>/ч (рис. 5, а, в, д); наоборот, с большим расходом через вторую ступень –  $Q_1=4$  м<sup>3</sup>/ч,  $Q_2=6$  м<sup>3</sup>/ч (рис. 5, б, г, е).

В случаях с созакруткой потоков скоростная съемка (рис. 5, а–г) показывает наличие вторичной неустойчивости течения с образованием на границе центральной застойной области одинарного прецессирующего вихря, в результате чего ин-



**Рис. 3.** Визуализация течения в первой ступени вихревой камеры. Направление потока: слева-направо. а) область визуализации (выделена прямоугольником); б, в) стоп-кадры скоростной визуализации в разные моменты времени. Воздух, подаваемый в жидкость для визуализации течения, сепарируется в центр вихревого ядра, образуя газовую полость, которая хорошо видна на кадрах

**Fig. 3.** Visualization of the flow in the first stage of the vortex chamber. Flow direction: from left to right. а) the visualization area (highlighted by a rectangle); б, в) snapshots of high-speed visualization at different times. The air supplied to the fluid for visualization of the flow is separated into the center of the vortex core, forming a gas cavity, which is clearly visible in the frames

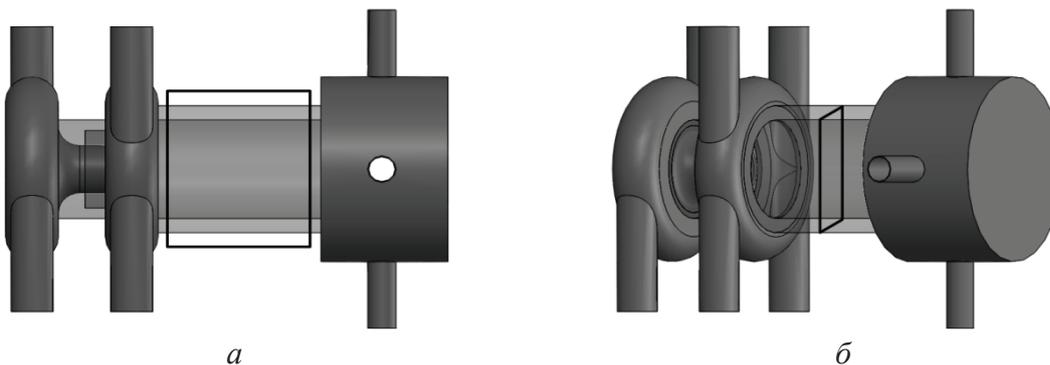


Рис. 4. Схема расположения областей визуализации: а) продольная плоскость, б) поперечное сечение

Fig. 4. Layout of the visualization areas: а) longitudinal plane, б) cross-section

дуцируются мощные низкочастотные пульсации потока с выделенной частотой. Картина течения для созакрутки в целом похожа как для показанных на рис. 5, а–г режимов, так и для других режимов, в частности,  $Q_1=8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_2=8 \text{ м}^3/\text{ч}$ , которые были дополнительно исследованы. Главная особенность структуры потока, именно генерация вторичного прецессирующего вихревого ядра, имеет место для всех исследованных режимов. Визуализация течения в поперечном сечении для одного из этих режимов наглядно показывает классический вид смещенного относительно центра канала вихревого ядра, который вращается в направлении закрутки потока (рис. 6). Эффект отношения расходов через первую и вторую ступени, который можно отметить на основе визуализации, состоит в том, что при увеличении доли расхода через вторую ступень возрастает уровень закрутки потока и, соответственно, интенсивность вторичного прецессирующего вихря. При этом амплитуда прецессии возрастает, как это можно видеть сравнивая пары кадров видеозаписи на рис. 5: а, в и б, г.

Вариант с противокруткой показал эффективное смещение закрученных потоков первой и второй ступеней, следствием чего является существенное гашение закрутки результирующего потока. При таком низком уровне закрутки потока не происходит формирование крупномасштабных нестационарных структур в виде ПВЯ и, соответственно, отсутствуют интенсивные регулярные пульсации течения. Также при противокрутке не образуется центральная зона дефицита осевой скорости, т. е. результирующий поток характеризуется достаточно равномерным распределением осевой скорости вдоль поперечного сечения (рис. 5, д, е). Соотношением расходов в ступенях можно регулировать степень гашения закрутки. Так, при  $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$  реализуется практически прямоточный результирующий поток с нулевой закруткой (рис. 5, д). При увеличении доли расхода через вторую ступень ( $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) поток, сформированный в ней, закручивает поток из первой ступени в обратную сторону и весь результи-

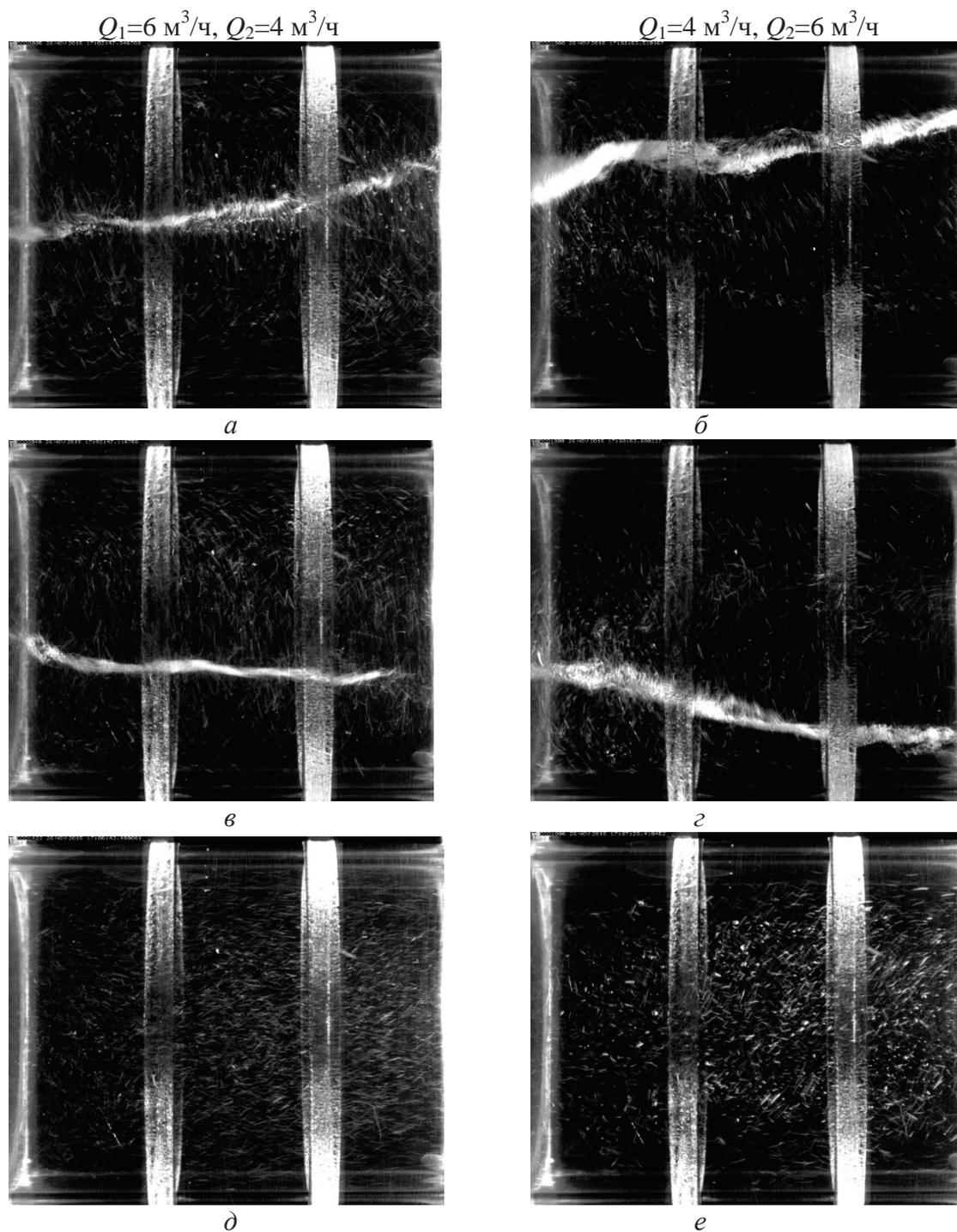
рующий поток приобретает умеренную противокрутку (рис. 5, е).

#### ЛДА-измерения

Дальнейшие исследования проводились при расходе жидкости  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$  на первой и  $6 \text{ м}^3/\text{ч}$  на второй ступенях закрутки потока, что соответствует режиму работы двухступенчатой горелки, когда основной расход топлива подается во вторую ступень, а первая ступень с меньшей загрузкой выполняет функцию поджига основного потока. Измерения с помощью ЛДА-техники должны дать количественные данные для сравнительного анализа режимов с созакруткой и противокруткой потоков и подтвердить выводы, сделанные на основе качественных визуальных опытов.

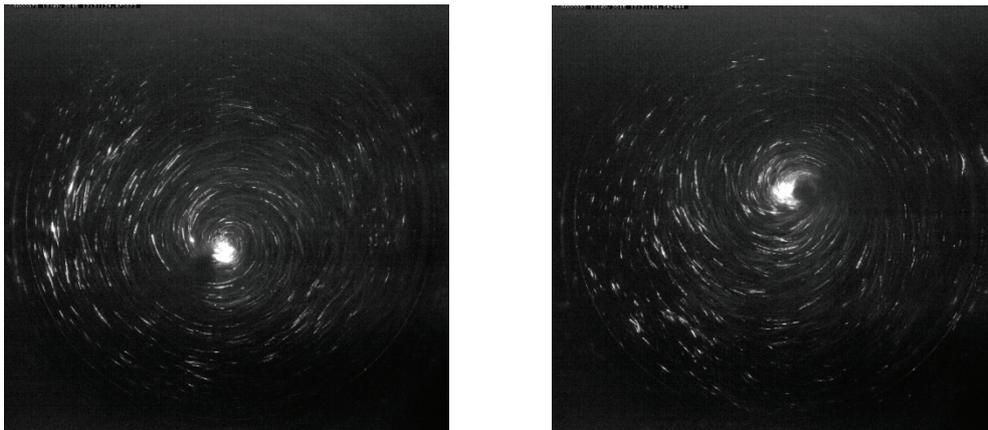
Измерения осреднённой по времени осевой и тангенциальной компонент скорости были проведены вдоль трёх линий 1–3 в поперечном сечении цилиндрической области внезапного расширения (рис. 7). Характерные расстояния от выхода второй ступени закрутки потока до измеряемых сечений 1–3 приведены на рис. 2. На представленных графиках расстояние от центра вдоль оси  $x$  нормировано на радиус цилиндрической области внезапного расширения  $R_0$ . В качестве масштаба скорости использована среднерасходная скорость  $\bar{V}_0$  в цилиндрической области, определенная на основе суммарного расхода через две ступени завихрителей.

На рис. 8–10 представлены профили осевой и тангенциальной компонент скорости и их среднеквадратичные отклонения, измеренные в сечениях 1–3, соответственно. Распределения осевой скорости показывают, что в случаях с созакруткой потоков имеет место формирование неравномерного по поперечному сечению осевого течения с интенсивным протоком вдоль боковых стенок и обширной областью застойного течения вдоль оси камеры. Струя, вытекающая из сопла первой ступени завихрителя, частично заполняет центральный провал, вследствие чего профили осевой скорости вблизи оси имеют обратный выгиб. При режиме с противокруткой потоков результирующая струк-



**Рис. 5.** Визуализация течения в продольной плоскости (рис. 4, а) для различных режимов работы вихревой камеры. Общее освещение светодиодной лампой. Направление потока: слева-направо. Режим с созакруткой потоков – а-г (а, в и б, г – пары кадров в разные моменты времени). Режим с противокруткой потоков – д, е. Слева кадр, соответствующий режиму  $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$ , справа –  $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$

**Fig. 5.** Visualization of the flow in the longitudinal plane (Fig. 4, a) for various modes of operation of the vortex chamber. General lighting with LED lamp. Flow direction: from left to right. Mode with co-swirl flows – a-g (a, v and б, г – pairs of frames at different times). Mode with counter-swirl flows – д, е. To the left – frame corresponding to the mode  $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$ , right –  $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$



**Рис. 6.** Визуализация течения в поперечном сечении (рис. 4, б) в разные моменты времени. Освещение с помощью лазерного «ножа»

**Fig. 6.** Visualization of the flow in the cross section (Fig. 4, б) at different instants of time. Lighting with a laser knife.  $Q_1=Q_2=6 \text{ m}^3/\text{h}$

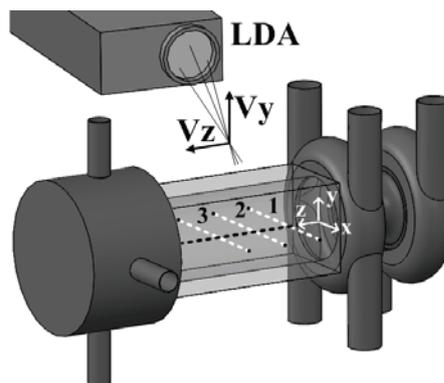
тура течения характеризуется достаточно равномерным распределением осевой скорости вдоль поперечного сечения, за исключением сечения 3, где начинает сказываться влияние выхода из вихревой камеры.

В случае с созакруткой течение отличается высоким уровнем тангенциальной компоненты скорости, что приводит к эффекту распада вихря и генерации выраженного ПВЯ, которое проявляется в профилях RMS тангенциальной скорости в виде отчетливых центральных пиков. Именно эти центральные пики, основной вклад в которые дает когерентная составляющая пульсаций скорости, однозначно указывают на наличие прецессионного движения вихревого ядра [21, 22]. Вместе с тем пики в распределениях RMS осевой скорости соответствуют границе застойной области, видной на профилях средней осевой скорости.

В режиме с противокруткой поток второй ступени, как уже отмечалось выше, раскручивает результирующий поток в обратном направлении. За счет эффекта взаимного гашения закрутки уровень тангенциальных скоростей становится более низким. Причем закрутка больше локализована вблизи боковой стенки, а центральная область имеет очень слабый уровень закрутки, имея тенденцию смены знака вращения в ближнем сечении 1. Распределения среднеквадратичных отклонений обеих компонент скорости не имеют каких-либо особенностей, в том числе центральных пиков на профилях RMS тангенциальной скорости, которые могли бы указывать на наличие прецессии вихря.

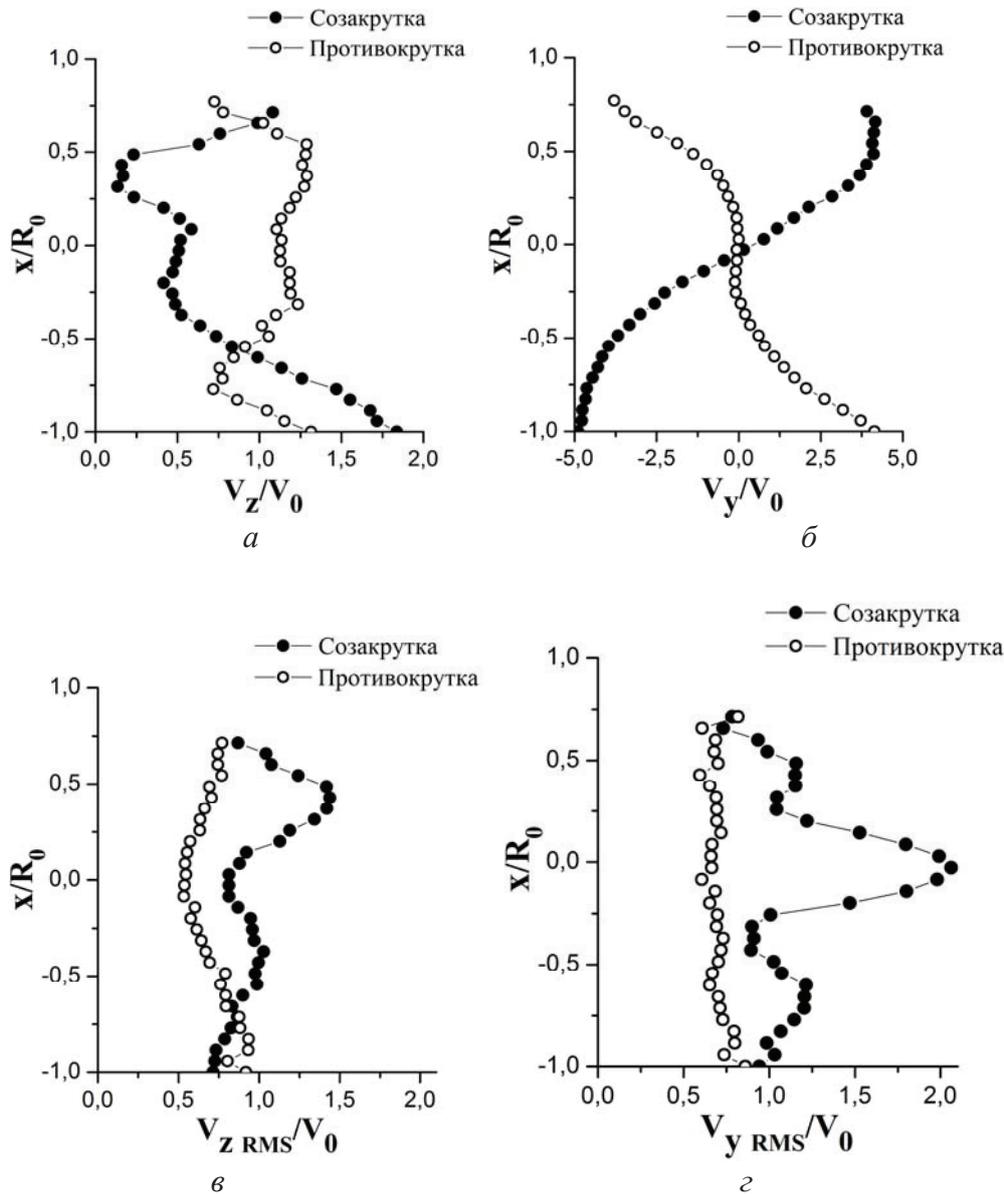
Таким образом, результаты измерений показывают, что противокрутка потоков в первой и второй ступенях способствует формированию более оптимальной аэродинамической структуры течения, характеризующейся равномерным распределением осевой скорости по поперечному сечению в

сочетании с достаточно выраженным общим вращательным движением потока в рабочем участке. Также следует отметить, анализируя распределения пульсационных составляющих скоростей, отсутствие в случае противокрутки сильной нестационарности течения, в отличие от режимов с созакруткой, когда в результирующем потоке происходит образование интенсивного прецессирующего вихря, генерирующего повышенный уровень пульсаций потока. В дополнение к этому, режимы с созакруткой отличаются крайне неравномерным распределением осевой скорости в поперечном сечении вихревой камеры, когда основной проток имеет место вдоль узкой пристенной области, а большая часть проходного сечения камеры занята областью со слабым осевым потоком (застойная область).



**Рис. 7.** Схема эксперимента при ЛДА измерениях и система координат (вид с тыльной стороны рабочего участка).  $V_x, V_y$  – измеряемые компоненты скорости. 1, 2, 3 – измерительные сечения (рис. 2)

**Fig. 7.** Scheme of the experiment for LDA measurements and coordinate system (view from the back of the working area).  $V_x, V_y$  are the measured components of the velocity. 1, 2, 3 – measuring sections (Fig. 2)



**Рис. 8.** Профили осреднённой осевой (а) и тангенциальной (б) компоненты скорости. Профили среднеквадратичного отклонения осевой (в) и тангенциальной (г) компоненты скорости. Сечение 1

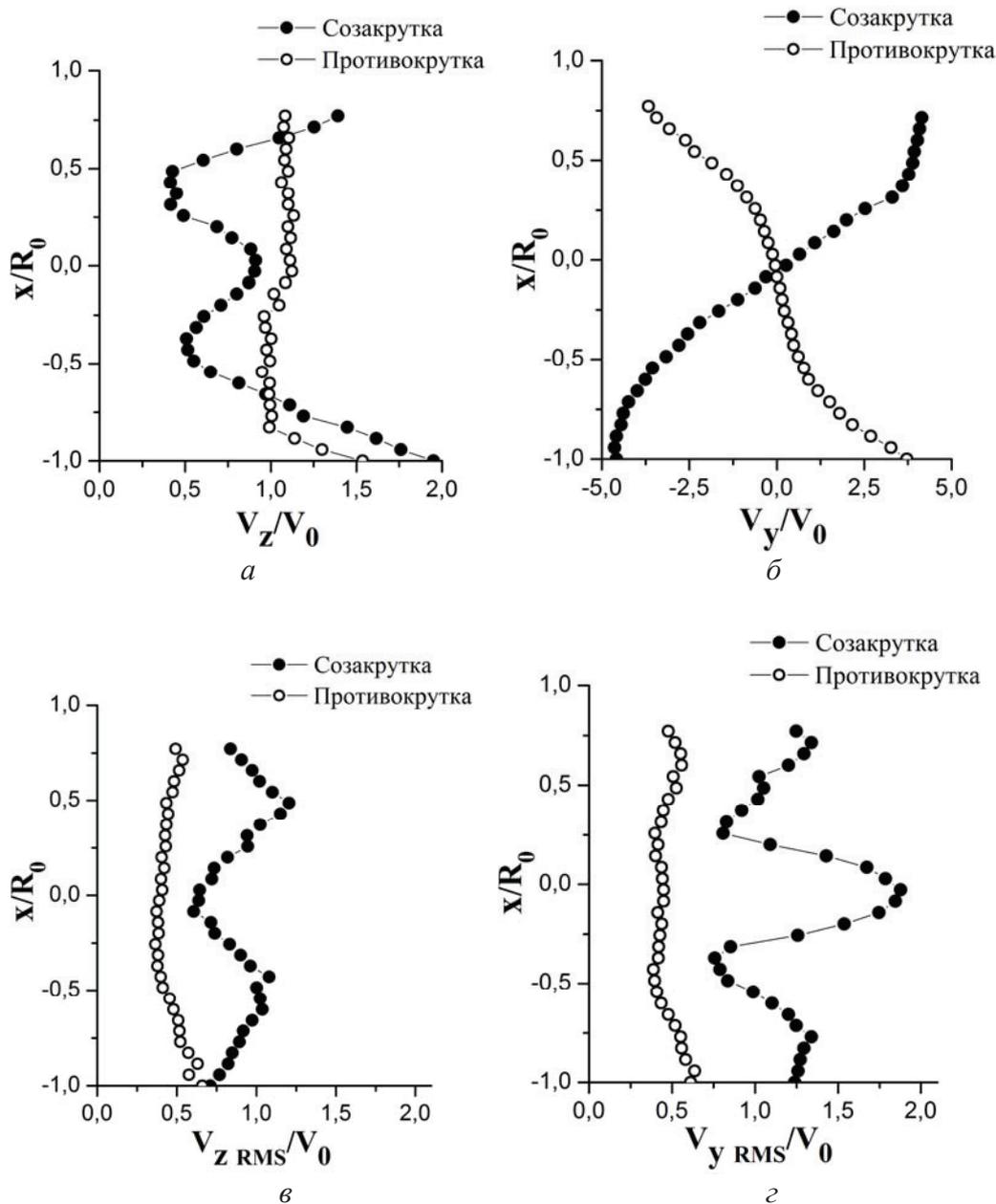
**Fig. 8.** Profiles of the averaged axial (a) and tangential (б) velocity components. Profiles of root-mean-square deviation of the axial (в) and tangential (г) velocity components. Section 1

### Заключение

В ходе работы была проведена высокоскоростная съёмка течения для разных вариантов закрутки потоков в гидродинамической модели двухступенчатого горелочного устройства. При режиме с потоками, закрученными в одном направлении, было выявлено образование вторичного прецессирующего вихря, генерирующего сильные низкочастотные пульсации потока. Режим с потоками, закрученными в разных направлениях, показал равномерное заполнение объема рабочего участка в сочетании с выраженной умеренной закруткой потока и устойчивостью течения. Результаты визуальных наблюдений были подтверждены количе-

ственными измерениями. Полученные при помощи двухкомпонентного ЛДА профили осредненных по времени осевой и тангенциальной компонент скорости продемонстрировали, что в случае созакрученных потоков наблюдается неравномерное распределение осевой скорости в поперечном сечении с ярко выраженным течением вдоль боковых стенок. В свою очередь характерные профили осевой компоненты скорости для случая с противозакрученными потоками показали равномерное распределение, отражающее эффективное смешение двух потоков.

Исходя из результатов проведенных изотермических опытов можно заключить, что вариант с



**Рис. 9.** Профили осреднённой осевой (а) и тангенциальной (б) компоненты скорости. Профили среднеквадратичного отклонения осевой (в) и тангенциальной (г) компоненты скорости. Сечение 2

**Fig. 9.** Profiles of the averaged axial (a) and tangential (б) velocity components. Profiles of root-mean-square deviation of the axial (в) and tangential (г) velocity components. Section 2

противокруткой является более предпочтительным для использования в двухступенчатой горелке в плане возможности более быстрого смешения горелочных струй первой и второй ступеней, а также более равномерного заполнения внутреннего объема устройства в сочетании с устойчивой выраженной закруткой потока, которая должна увеличивать время пребывания частиц топлива в зоне

активного горения и, соответственно, его более полного выгорания. Последний фактор достигается без развития сильной гидродинамической неустойчивости течения, характерной для аппаратов с сильной закруткой потока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150.*

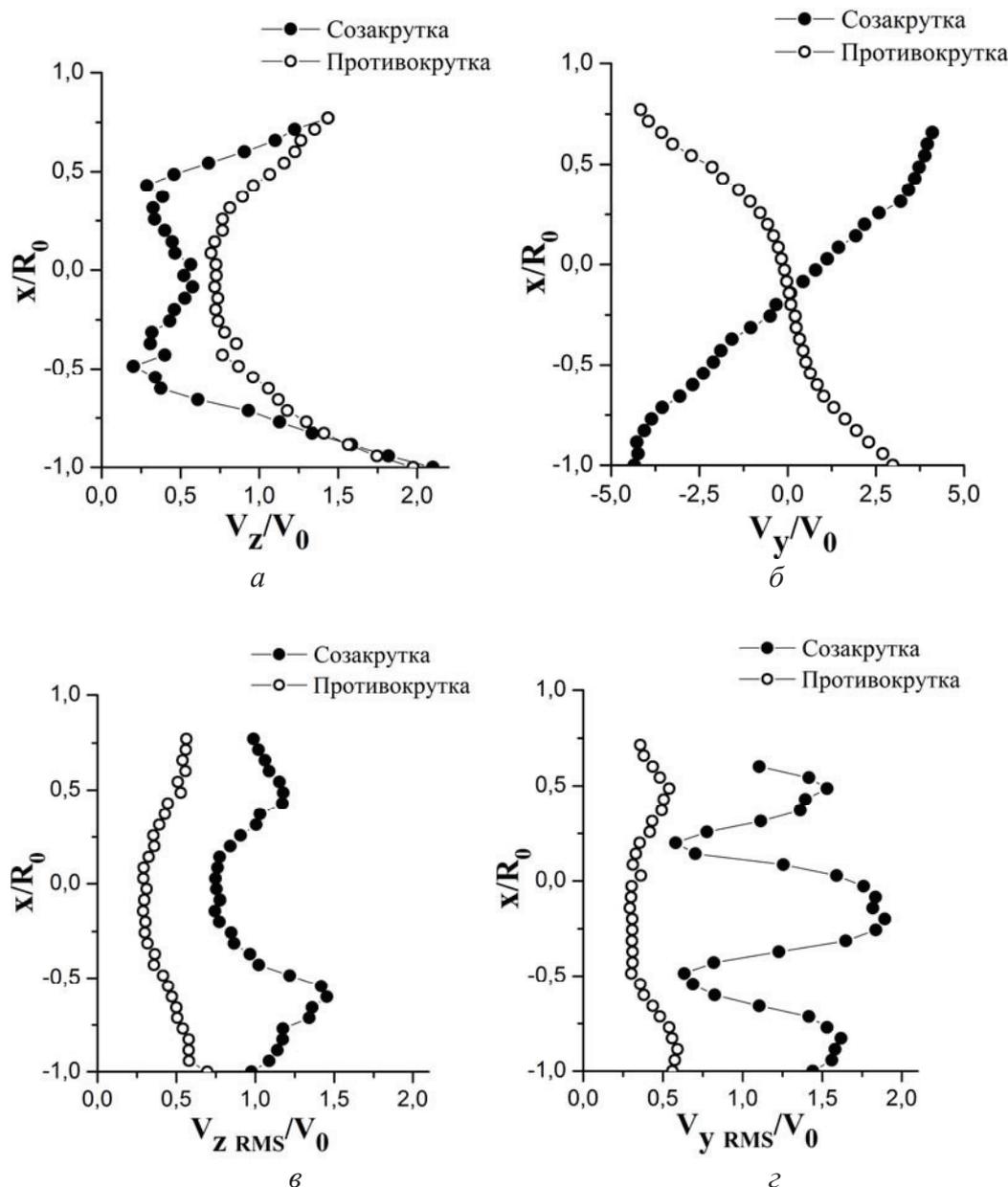


Рис. 10. Профили осреднённой осевой (а) и тангенциальной (б) компоненты скорости. Профили среднеквадратичного отклонения осевой (в) и тангенциальной (г) компоненты скорости. Сечение 3

Fig. 10. Profiles of the averaged axial (a) and tangential (б) velocity components. Profiles of root-mean-square deviation of the axial (в) and tangential (г) velocity components. Section 3

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волшаник В.В., Орехов Г.В. Области применения взаимодействия закрученных потоков жидкостей и газов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 7. – С. 87–104.
2. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях / В.В. Волшаник, А.Л. Зуйков, А.П. Мордасов, Г.И. Кривченко. – СПб.: Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.
3. Моделирование и расчет контрвихревых течений / В.К. Ахметов, В.В. Волшаник, А.Л. Зуйков, Г.В. Орехов / под ред. А.Л. Зуйкова. – М.: МГСУ, 2012. – 252 с.
4. Chao Y.C. Recirculation Structure of the Co-annular Swirling Jets in a Combustor // AIAA Journal. – 1988. – V. 26. – № 5. – P. 623–625.
5. Mehta J., Shin H., Wisler D. Mean Velocity and Turbulent Flow-Field Characteristics Inside an Advanced Combustor Swirl Cup // 27<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting. – Nevada: January 1989. AIAA Paper 89-0215.
6. Effect of co- and counter-swirl on the isothermal flow- and mixture-field of an airblast atomizer nozzle / K. Merkle, H. Haessler, H. Buchner, N. Zarzalis // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2003. – V. 24. – P. 529–537.
7. Hadeif R., Lenze B. Effects of co- and counter-swirl on the droplet characteristics in a spray flame // Chemical Engineering and Processing. – 2008. – V. 47. – P. 2209–2217.
8. Gupta A.K., Lewis M.J., Daurer M. Swirl Effects on Combustion Characteristics of Premixed Flames // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2001. – V. 123. – P. 619–626.

9. Yonmo Sung, Gyungmin Choi. Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner // *Fuel*. – 2016. – V. 174. – P. 76–88.
10. Исследование процессов воспламенения, горения и образования вредных веществ при сжигании твердого органического топлива на стенде с вихревой камерой / А.П. Бурдуков, М.Ю. Чернецкий, А.А. Дектерев, И.С. Ануфриев, П.А. Стрижак., П.Ю. Гребеньков // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 1. – С. 64–70.
11. Способ сжигания угля микропомола и угля обычного помола в пылеугольной горелке и устройство для его реализации: пат. Рос. Федерации № 2460941; заявл. 11.02.11; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25. – 13 с.
12. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергия, 1966. – 350 с.
13. Исследование структуры течения в новой конструкции вихревой топке методом цифровой трассерной визуализации / И.С. Ануфриев, Г.В. Кузнецов, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов, Ю.А. Аникин, С.В. Двойнишников, Д.В. Куликов, В.В. Рахманов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 31–35.
14. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топке / И.С. Ануфриев, П.А. Стрижак, М.Ю. Чернецкий, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов // *Письма в Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 41. – № 15. – С. 25–32.
15. Анализ аэродинамической структуры закрученного течения в моделях вихревых горелочных устройств / Е.С. Гешева, И.В. Литвинов, С.И. Шторк, С.В. Алексеев // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 9. – С. 33–41.
16. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Ч. 1. Аэродинамика течения в вихревой топке / Д.В. Красинский, В.В. Саломатов, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, Е.Ю. Шадрин, Ю.А. Аникин // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 2. – С. 41–46.
17. Yanta W.J., Smith R.A. Measurements of turbulent transport properties with a laser Doppler velocimeter // 11<sup>th</sup> Aerospace Science Meeting. – Washington, 1978. – AIAA Paper 73–169.
18. Zhang Zh. Optical guidelines and signal quality for LDA applications in circular pipes // *Exp. Fluids*. – 2004. – V. 37. – P. 29–39.
19. Юсупов Р.Р., Шторк С.И., Алексеев С.В. Исследование сильнозакрученного газожидкостного потока в гидродинамической вихревой камере // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. – 2016. – Т. 11. – № 1. – С. 45–55.
20. Литвинов И.В., Назаров А.Д., Шторк С.И. Подавление прецессии вихревого ядра в закрученном реагирующем потоке // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23. – № 2. – С. 315–318.
21. Heitor M.V., Whitelaw J.H. Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor // *Combust Flame*. – 1986. – V. 64. – P. 1–32.
22. Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor // *Experiments in Fluids*. – 2006. – V. 40. – P. 177–187.

*Поступила 14.05.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Алексеев С.В.**, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета; директор Института теплофизики СО РАН.

**Шторк С.И.**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования энергетических процессов научно-исследовательской части Новосибирского государственного университета; заведующий лабораторией 7.1 экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики СО РАН.

**Юсупов Р.Р.**, лаборант Института теплофизики СО РАН; магистрант Новосибирского государственного университета.

UDC 532.5

## ISOTHERMAL MODELING OF SWIRLING FLOW AERODYNAMIC STRUCTURE IN A TWO-STAGE BURNER

**Sergey V. Alekseenko**<sup>1,2</sup>,  
aleks@itp.nsc.ru

**Sergey I. Shtork**<sup>1,2</sup>,  
shtork@itp.nsc.ru

**Roman R. Yusupov**<sup>1,2</sup>,  
romansensk@yandex.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Thermophysics SB RAS,  
1, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The work motivation is determined by the extensive use of interacting swirling flows in counter vortex quenchers and vortex combustion chambers. To optimize the design of such devices, it is necessary to understand the structure of the flow and the mechanisms of interaction of co-axial swirling flows. With regard to burner devices, these studies are important for the most efficient combustion of fuel, reducing the polluting emissions of combustion products and increasing the durability of combustion chambers.

**The main aim** of the study is the experimental investigation of aerodynamic structure of the swirling flow in isothermal model of two-stage vortex burner device. The main attention is paid to the mixing of swirling streams formed in two consecutively connected tangential swirlers representing first and second stages of the burner device.

**The methods used in the study.** Flow visualization for various swirl flow configurations were obtained using a digital high-speed camera. Profiles of the time-averaged axial and tangential velocity components as well as their pulsating parts (root mean square deviation) were obtained using a laser-Doppler anemometer.

**The results.** The formation of a secondary instability of the flow in the form of a precessing vortex was revealed in the case of regime with co-swirl of flows between two stages of the working section. Effective mixing of swirl flows was detected in the counter-swirl mode. Based on the results of conducted isothermal experiments it can be concluded that the counter-swirl mode is more preferable for application in a two-stage burner in terms of the possibility of faster mixing of the burner flows of the first and second stages. The resulting flow is characterized by a more uniform flow distribution inside the device in combination with a stable flow swirling, which should increase the residence time of the fuel particles in the active combustion zone and, accordingly, ensures their complete burn-out. The latter factor is achieved without the development of a strong hydrodynamic instability of the flow, which is characteristic of apparatus with a strong flow swirling.

### Key words:

Vortex burners, coaxial swirling flows, high-speed visualization, laser-Doppler anemometer, precessing vortex core.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the RF under agreement on the grant no. 14.607.21.0150.

### REFERENCES

- Volshanik V.V., Orekhov G.V. Areas of use of interacting swirl liquid and gas flows. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 7, pp. 87–104. In Rus.
- Volshanik V.V., Zuikov A.L., Mordasov A.P., Krivchenko G.I. *Zakruchennyye potoki v gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Swirl Flows in Hydraulic Structures]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1990. 280 p.
- Akhmetov B.K., Volshanik V.V., Zuikov A.L., Orekhov G.V. *Modelirovaniye i raschet kontrvikhrevykh techenii* [Modeling and Calculation of Counter Vortex Currents]. Moscow, MGSU Press, 2012. 252 p.
- Chao Y.C. Recirculation Structure of the Co-annular Swirling Jets in a Combustor. *AIAA Journal*, 1988, vol. 26, no. 5, pp. 623–625.
- Mehta J., Shin H., Wisler D. Mean Velocity and Turbulent Flow-Field Characteristics Inside an Advanced Combustor Swirl Cup. *27<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting*. Nevada, January 1989. AIAA Paper 89–0215.
- Merkle K., Haessler H., Buchner H., Zarzalis N. Effect of co- and counter-swirl on the isothermal flow- and mixture-field of an air-blast atomizer nozzle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, vol. 24, pp. 529–537.
- Hafed R., Lenze B. Effects of co- and counter-swirl on the droplet characteristics in a spray flame. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, vol. 47, pp. 2209–2217.
- Gupta A.K., Lewis M.J., Daurer M. Swirl Effects on Combustion Characteristics of Premixed Flames. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, vol. 123, pp. 619–626.
- Yonmo Sung, Gyungmin Choi. Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner. *Fuel*, 2016, vol. 174, pp. 76–88.
- Burdukov A.P., Chernetsky M.Yu., Dekterev A.A., Anufriev I.S., Strizhak P.A., Grebenkov P.Yu. Study of ignition, combustion, and production of harmful substances upon burning solid organic fuel at a test bench with a vortex chamber. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 61–67. In Rus.
- Alekseenko S.V., Burdukov A.P., Popov V.I., Popov Yu.S., Shtork S.I. *Sposob szhiganiya uglya mikropomola i uglya obychnogo pomola v pyleugolnoy gorelke i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of burning micronized coal and regularly milled coal in

- pulverized coal burner and design for the method realization]. Patent RF, no. 2460941, 2012.
12. Kutateladze S.S., Lyakhovskii D.N., Permyakov V.A. *Modelirovanie teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Modeling thermal power equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1966. 350 p.
  13. Anufriev I.S., Kuznetsov G.V., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V., Anikin Yu.A., Dvoynishnikov S.V., Kulikov D.V., Rakhmanov V.V. Study of flow structure in a new construction of vortex furnace by the particle image velocimetry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 31–35. In Rus.
  14. Anufriev I.S., Strizhak P.A., Chernetskii M.Yu., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V. Aerodinamika perspektivnoi konstruktsii vikhrevoi topki [Aerodynamics of a promising vortex furnace design]. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 8, pp. 727–730.
  15. Gesheva E.S., Litvinov I.V., Shtork S.I., Alekseenko C.V. Analyzing the aerodynamic structure of swirl flow in vortex burner models. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 9, pp. 649–657. In Rus.
  16. Krasinskii D.V., Salomatov V.V., Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Yu., Anikin Yu.A. Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. P. 1: Flow aerodynamics in a vortex furnace. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 117–122. In Rus.
  17. Yanta W.J., Smith R.A. Measurements of turbulent transport properties with a laser Doppler velocimeter. *11<sup>th</sup> Aerospace Science Meeting. AIAA Paper*. Washington, 1978. AIAA Paper 73–169.
  18. Zhang Zh. Optical guidelines and signal quality for LDA applications in circular pipes. *Exp. Fluids*, 2004, vol. 37, pp. 29–39.
  19. Yusupov R.R., Shtork S.I., Alekseenko S.V. Study of strongly swirling gas-liquid flows in a hydrodynamic vortex chamber. *Vestnik NGU, Seriya: Fizika*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 45–55. In Rus.
  20. Litvinov I.V., Nazarov A.D., Shtork S.I. Suppression of vortex core precession in a swirling reacting flow. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 305–308. In Rus.
  21. Heitor M.V., Whitelaw J.H. Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor. *Combust Flame*, 1986, vol. 64, pp. 1–32.
  22. Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor. *Experiments in Fluids*, 2006, vol. 40, pp. 177–187.

Received: 14 May 2017.

#### Information about the authors

**Sergey V. Alekseenko**, Dr. Sc., professor, academician RAS, head of the department, Novosibirsk State University; director, Institute of Thermophysics SB RAS.

**Sergey I. Shtork**, Dr. Sc., leading researcher, Novosibirsk State University; head of the laboratory, Institute of Thermophysics SB RAS.

**Roman R. Yusupov**, laboratory assistant, Novosibirsk State University; master, Institute of Thermophysics SB RAS.