

УДК 544.452.42

РЕЖИМЫ ОБЕДНЕННОГО ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОГО ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В РАДИАЛЬНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Е. Ю. Гореликов, И. В. Литвинов, С. И. Шторк

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск,
gorelikoey@gmail.com, litvinov@itp.nsc.ru, shtork@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик закрученного потока с формированием вихревых структур в горелочном устройстве радиального типа в изотермических и реагирующих условиях при различных параметрах крутки потока. Для изотермических условий получены распределения средних и пульсационных полей скоростей, в том числе привязанных к фазе прецессирующего вихря, проведен анализ пульсаций давления, индуцируемых прецессирующим вихрем, а также определен вклад прецессирующей вихревой структуры в общий уровень турбулентности. Исследования проводились с помощью современных бесконтактных экспериментальных методов диагностики потока, таких как оптическая визуализация и PIV (particle image velocimetry). Для регистрации акустического поля, порождаемого прецессией вихревого ядра (ПВЯ), были использованы четыре измерительных микрофона с отборниками давления. Для выявления вклада ПВЯ в общий уровень турбулентности использовался метод разложения на ортогональные моды (proper orthogonal decomposition, POD), который применялся для анализа распределений скорости, полученных методом PIV. Эксперименты показали, что в изотермическом случае ПВЯ, возникающая после преодоления параметром крутки значения $S = 0.6$, представляет собой односпиральную вихревую структуру, вклад которой в общий уровень кинетической энергии турбулентности составляет до 27 %. Для реагирующих условий проведена визуализация факела при различной крутке потока, измерены частотные характеристики ПВЯ, возникающей в потоке при $S \geq 0.6$. Показано, что зависимость безразмерной частоты ПВЯ как функции крутки потока S имеет одинаковый немонотонный характер как в случае горения, так и в изотермическом случае.

Ключевые слова: модель горелочного устройства, прецессия вихревого ядра (ПВЯ), PIV, POD.

DOI 10.15372/FGV20220503

ВВЕДЕНИЕ

Реализация оптимального устройства смешения топливно-воздушной смеси, исследование влияния прецессирующих вихревых структур на процесс горения и акустический шум в горелочном устройстве остаются важными научными проблемами энергетики, основанной на эффективном и экологичном сжигании газовых углеводородов [1–3]. Интенсивная закрутка используется в современных газовых турбинах с низким уровнем выбросов NO_x для улучшения условий стабилизации пламени и интенсификации теплообмена в камере сгорания [4]. Процесс смешения окислителя с топливом определяется не только турбулентными флуктуациями скорости, но и в большей степени круп-

номасштабными вихревыми структурами, такими как прецессирующее вихревое ядро [5], которое формируется вследствие сильной закрутки потока. Предыдущие экспериментальные и численные исследования выявили ряд аспектов таких вихревых структур, а также показали, что условия реагирующего потока могут существенно влиять на динамику вихревых структур [6–9]. Более того, частота прецессии вихревого ядра (ПВЯ) и геометрия вихревых структур сложным образом зависят от мощности факела, стехиометрии, конструкции горелки, параметра крутки, метода инъекции топлива и других параметров [10]. В одних случаях горение может подавлять ПВЯ [6, 11], а в других не оказывать заметного влияния на частотные и амплитудные характеристики пульсаций потока [12, 13]. В недавних экспериментальных работах было показано нелинейное взаимодействие между акустической неустой-

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00769).

© Гореликов Е. Ю., Литвинов И. В., Шторк С. И., 2022.

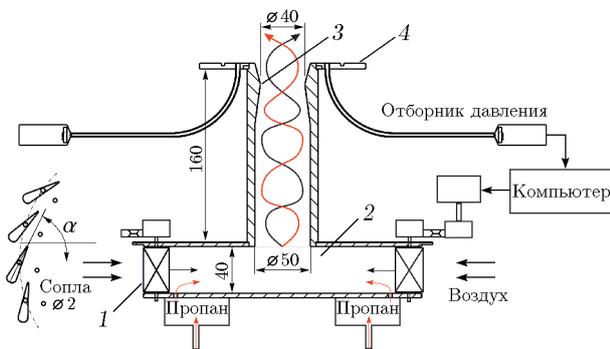


Рис. 1. Схема горелочного устройства радиального типа:

1 — лопатки завихрителя, 2 — камера смешения, 3 — сужающаяся горловина, 4 — защитный экран

чивостью и ПВЯ, которое может существенно уменьшить высокоамплитудные акустические колебания [14, 15]. Взаимодействие вихревой неустойчивости с акустическими колебаниями потока при горении может не только стать причиной сильного шума и вибраций установки, но и значительно снизить ее эксплуатационные характеристики. Таким образом, эффект ПВЯ остается актуальной проблемой при использовании вихревой стабилизации горения.

Цель данной работы — выявить характер влияния ПВЯ на поток в изотермическом и реагирующих случаях при варьировании условий крутки (изменения параметра крутки S) в модели обобщенного горелочного устройства с радиальным завихрителем. В работе проведено исследование частотных характеристик потока и сделаны оценки влияния ПВЯ на общий уровень турбулентности. Новизна работы состоит в установлении нелинейной зависимости безразмерной частоты ПВЯ в радиальном завихрителе от параметра крутки потока S . Зависимость имеет одинаковый немонотонный характер как в реагирующем потоке, так и в изотермическом случае.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема горелочного устройства радиального типа приведена на рис. 1, подробно она описана в работах [16, 17]. Воздух подается вихревой воздуходувкой из комнаты в аэродинамический контур. Расход воздуха измерялся ультразвуковым расходомером с погрешностью 1.5 %. До подачи в рабочий участок воздух проходит через успокоительную камеру диаметром 500 мм и высотой 800 мм. На входе в камеру установлены выравнивающие сетки. Затем по-

ток поступает в радиальный завихритель с поворотными лопатками и через камеру смешения выходит в открытое пространство. На выходе камеры смешения установлены сужающаяся горловина диаметром 40 мм, препятствующая проскоку пламени, и защитный экран диаметром 250 мм для предотвращения эжекции воздуха снизу. Лопаточный завихритель состоит из 20 лопаток длиной 36.5 мм, шириной 9 мм и радиусом закругления хвостовика 4.5 мм. В основании нижнего диска, около каждой лопатки, имеется возможность подачи газообразного топлива через отверстия диаметром 2 мм. Топливо эффективно перемешивается с закрученным воздушным потоком до зоны горения, находящейся за сужающей горловиной.

Для измерения расхода газового топлива использовался регулятор расхода газа (производитель «Bronkhorst»). Он откалиброван на работу с пропаном и поддерживает заданный расход с погрешностью меньше 1 % от максимального расхода. Горелочное устройство работало на смеси чистого пропана (99.6 %) с воздухом при атмосферном давлении. В качестве трассеров в опытах без горения использовались капли растительного масла, полученные при помощи атомайзера Ласкина. Угол поворота лопаток радиального завихрителя α варьировался от 0 до 76.5° и устанавливался с точностью до 1° одновременным вращением лопаток осевого завихрителя с помощью шагового двигателя. Контроль параметров установки и режимов вихревого течения в горелочном устройстве осуществлялся с помощью автоматизированной системы, включающей в себя блок сбора данных. Система управления экспериментом реализована на базе персонального компьютера.

Для того чтобы охарактеризовать влияние интенсивности закрутки на режимы течения, введем параметр крутки S в его классическом определении (здесь, как это часто реализуется на практике, опустим члены с вкладом пульсаций скорости [18]):

$$S = \frac{\int_0^{\infty} V_{ax} V_{tan} r^2 dr}{R \int_0^{\infty} (V_{ax}^2 + (p - p_{\infty})) r dr}, \quad (1)$$

где $V_{ax}(r)$ и $V_{tan}(r)$ — осредненные по времени аксиальная и тангенциальная компонен-

ты скорости, R — радиус вихревой камеры, $p(r) - p(\infty)$ — вклад давления, которое можно определить на основе влияния закрутки на

градиент давления в виде
$$-\int_r^\infty V_{tan}^2 \frac{d\xi}{\xi}.$$

Представленные в статье значения параметра крутки для изотермического и реагирующего течений были определены для потока без горения на основе распределения скоростей, измеренных вблизи выхода из сопла. То есть параметр крутки в нашем случае характеризует условия выходящего из камеры смешения потока, где нет горения. Следует заметить, что формула (1) записана в предположении постоянной плотности среды.

Число Рейнольдса Re определялось как $Re = U_0 D / \nu$, где U_0 — среднерасходная скорость на выходе из сопла, $D = 50$ мм — диаметр выходного сопла, ν — кинематическая вязкость воздуха при 25 °С. Число Струхала Sh определялось как $Sh = f_0 D / U_0$, где f_0 — частота ПВЯ, Гц; $D = 50$ мм. Измерения частоты ПВЯ и соответствующих распределений скорости проводились для изотермического случая при фиксированном числе Рейнольдса $Re = 16\,500$ ($U_0 = 4.95$ м/с). Для реагирующего случая число Рейнольдса, определенное по расходу воздуха, составляло $Re = 11\,500$ ($U_0 = 3.53$ м/с). Здесь так же, как для параметра крутки, использовались свойства воздуха без горения.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для реализации метода стерео-PIV (particle image velocimetry, система цифровой трассерной визуализации) использовалась система ПОЛИС. На рис. 2 показано расположение камер и лазера относительно сопла горелки. Лазер Nd: YAG с двойной головкой (Quantel, EverGreen) освещал частицы масла. Лазерный луч был преобразован в лазерный нож толщиной менее 1 мм с помощью системы цилиндрических и сферических линз. В среднем энергия импульсов перед оптикой лазерного ножа составляла 70 мДж. Изображения частиц были получены парой камер ССД (Bobcat ImperX). Изображения PIV размером 2048×2048 пиксель обрабатывались с помощью программного обеспечения ActualFlow. Временное разрешение между двумя импульсами PIV-лазера составляло

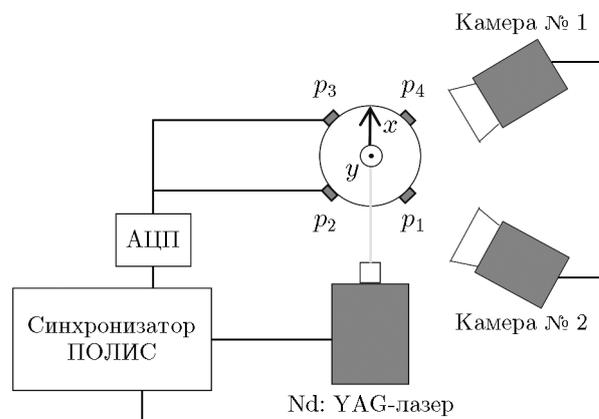


Рис. 2. Схема PIV с отборниками давления

30 мкс. В течение четырех итераций адаптивного алгоритма взаимной корреляции размер области опроса был уменьшен с 32×32 до 16×16 пиксель. Пространственное перекрытие составляло 50 %, а результирующее пространственное разрешение — 0.5 мм. Параметры эксперимента были выбраны таким образом, чтобы итоговое смещение частиц трассеров равнялось примерно 8 пиксель, при этом погрешности не превышали 5 и 8 % для компонент скорости в измерительной плоскости и перпендикулярных к ней соответственно.

Частота периодических пульсаций давления измерялась с помощью четырех акустических датчиков. Они представляли собой отборники давления, соединенные с измерительными микрофонами Behringer ECM8000. Датчики устанавливались на срезе сопла горелочного устройства с двух противоположных сторон по аналогии с работой [19]. Доминирующая частота в спектре пульсаций давления разностного сигнала ассоциировалась с частотой ПВЯ, которая определялась в спектре сигнала по формуле

$$p = p_1 - \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{4}. \quad (2)$$

Для выявления вклада ПВЯ в общий уровень турбулентности использовался метод разложения на ортогональные моды (proper orthogonal decomposition, POD), который применялся для анализа распределений скорости по аналогии с работами [20–22]. Данный метод прошел апробацию для различных сложных турбулентных течений [23–26].

Метод POD основывается на разложении поля скорости по оптимальному базису:

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}) + u'(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^N a_i(t) \Phi_i(\mathbf{x}), \quad (3)$$

где $a_i(t)$ — проекция мгновенной скорости на i -ю POD-моду. Корреляционная матрица $R_{i,j} = \langle u'(\mathbf{x}, t_i), u'(\mathbf{x}, t_j) \rangle / N$ вводится по кадровым методом POD, при этом возникает задача на собственные значения. Собственные векторы (временные коэффициенты $a_i = [a_i(t_1), \dots, a_i(t_N)]$), а также собственные значения λ_i имеют физическое значение вклада в кинетическую энергию турбулентности (КЭТ) отдельных POD-мод, если рассматривать распределения скорости. Тогда функции POD-мод будут представлять собой линейную комбинацию

$$\Phi_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{N\lambda_i} \sum_{k=1}^N a_i(t_k) u'(\mathbf{x}, t_k).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения в реагирующем случае проводились при одинаковых расходах воздуха (24.4 м³/ч) и пропана (0.6 м³/ч), что соответствует коэффициенту избытка топлива $\varphi = 0.58$, т. е. обедненному горению. Число Рейнольдса определялось по параметрам холодного потока и составляло $Re = 11\,500$ ($U_0 = 3.53$ м/с).

На рис. 3 представлена визуализация факела при различных числах крутки потока. Для визуализации горения обедненной газовой смеси использовался цифровой фотоаппарат Canon EOS 7D с разрешением 5 184 × 3 456 (17.9 млн пикселей).

Видно, что при увеличении крутки факел становится более компактным и значительно изменяет свою форму. На фотографиях рис. 3 выдержка составляла 1/3 секунды ISO 500, т. е. фото дают осредненную по времени форму пламени. На рис. 4 представлена мгновенная визуализация пламени при параметре крутки потока $S = 0.86$ и выдержке 1/60 секунды ISO 500.

На серии кадров, полученных в разные моменты времени, ясно выделяются более яркие области пламени. Исходя из результатов фазово-осредненных измерений скорости, представленных ниже, можно предположить, что эти чередующиеся области соответствуют ПВЯ со спиралевидной геометрией. Подобная спиральная (винтовая) геометрия прецессирующего вихря отмечалась ранее в ряде работ [27–31].

С помощью четырех акустических датчиков были получены пульсации давления и, соответственно, идентифицированы режимы с формированием вихревых структур при изменении интегрального параметра крутки S для реагирующего и изотермического случаев. На рис. 5,а представлены спектры пульсаций давления при различных значениях параметра S для изотермического потока. На рис. 5,б при-

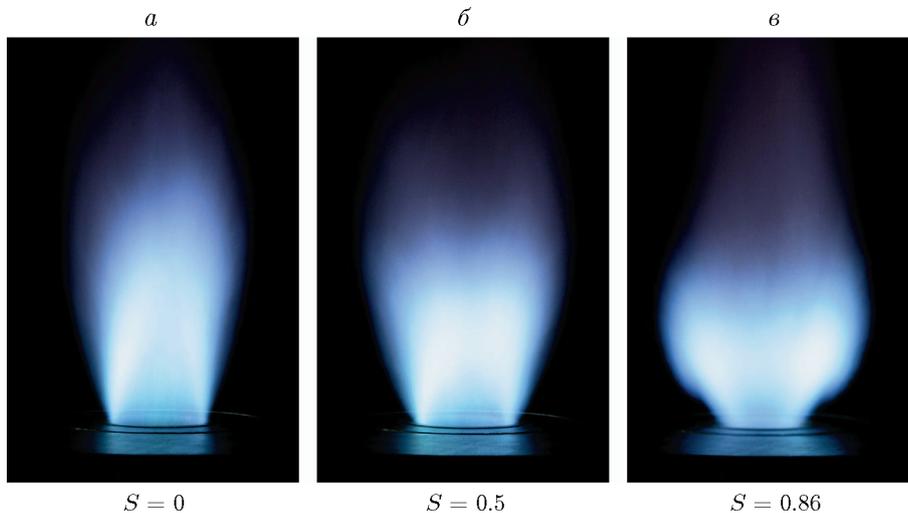


Рис. 3. Визуализация факела при различном параметре крутки

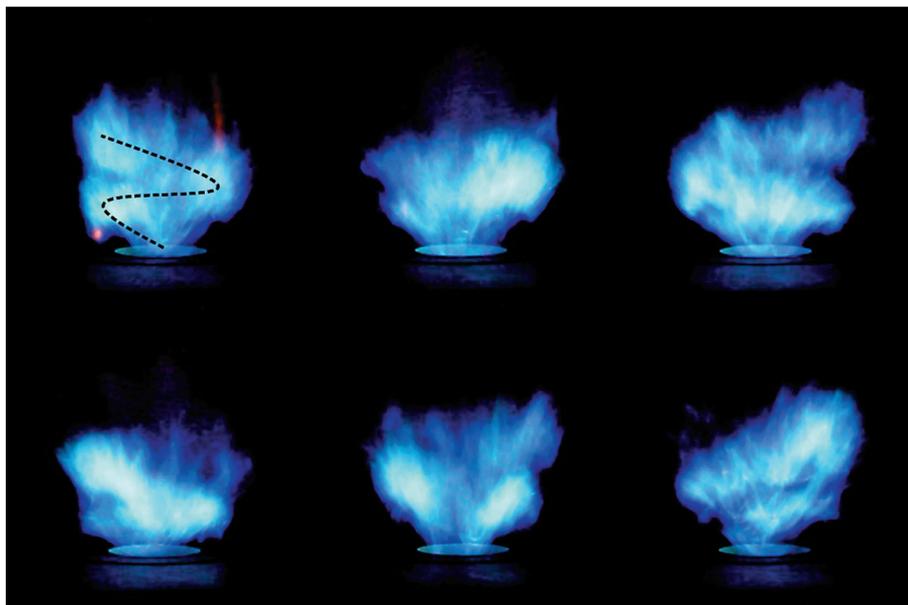
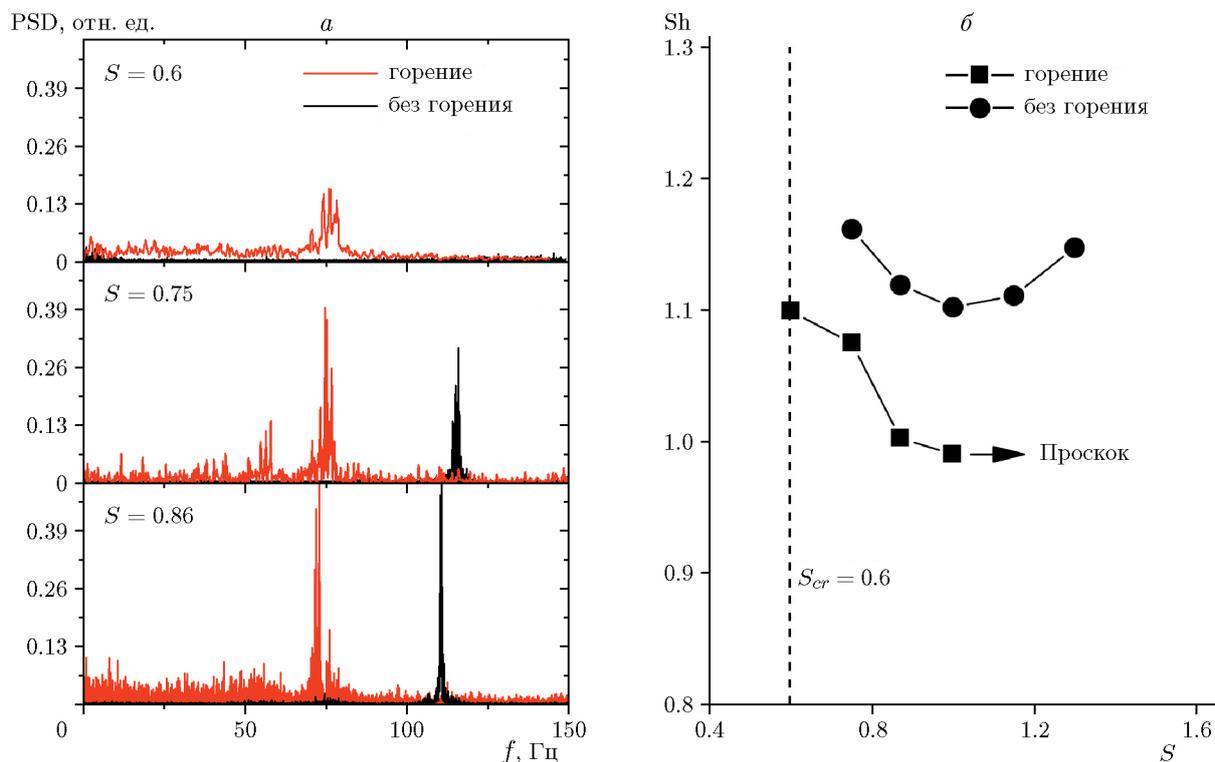
Рис. 4. Визуализация ПВЯ в пламени при $S = 0.86$ 

Рис. 5. Спектры пульсации давления в изотермическом и реагирующем случаях (а); число Струхалия в условиях изотермического и реагирующего потоков (б)

ведены зависимости числа Струхалия от параметра S как в условиях без горения, так и в случае горения.

Как видно на рис. 5, а, при $S > 0.6$ дискретные пики в спектрах давления становятся

четко идентифицируемыми, при этом амплитуды пульсаций увеличиваются. Сильные пульсации давления связаны с развитием ПВЯ в потоке. На зависимости $Sh(S)$ можно выделить две области: в диапазоне $S = 0.6 \div 1.0$, где

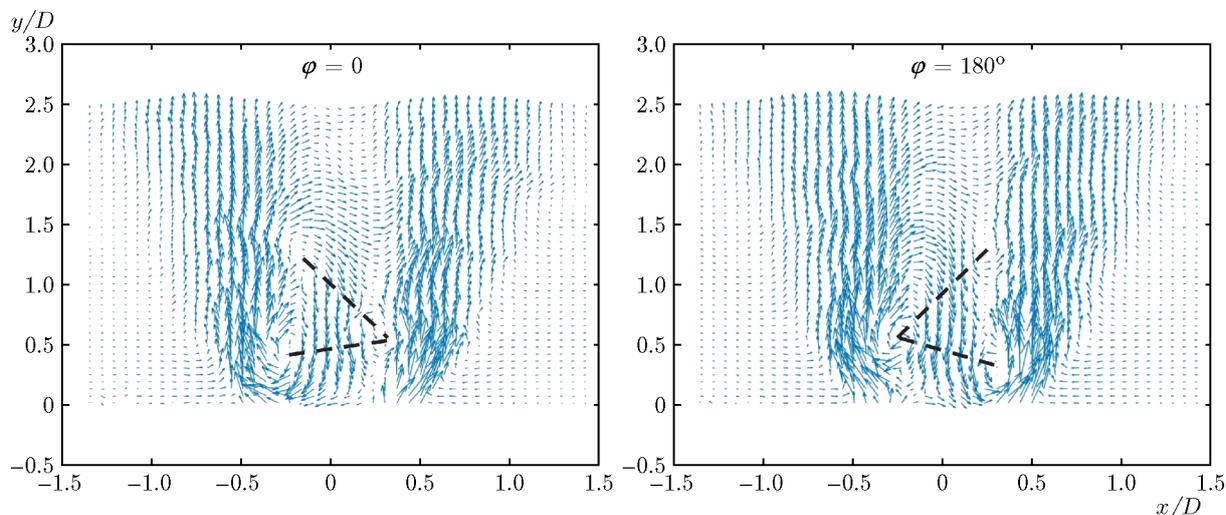


Рис. 6. Векторное фазово-осредненное поле для режима $S = 0.86$

частота прецессии уменьшается, и в диапазоне $S = 1.0 \div 1.5$, где наблюдается монотонный рост. Данный характер зависимости $Sh(S)$ был отмечен ранее в литературе для другого типа вихревого устройства [12, 13]. Частота ПВЯ в изотермическом случае составляла 116 Гц при $S = 0.75$, 109 Гц при $S = 1.0$ и 113.5 Гц при $S = 1.3$ при числе Рейнольдса 16 500 (расход воздуха $35 \text{ м}^3/\text{ч}$). Частота ПВЯ в реагирующем случае составляла 76 Гц при $S = 0.6$ и 73 Гц при $S = 1.0$ при числе Рейнольдса $Re = 11\,500$ (суммарный расход воздуха и газа $25 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Аналогичный тренд снижения частоты прецессии при увеличении параметра крутки потока от 0.6 до 1.0 имел место и в условиях горения. Однако при $S > 1.0$ происходил просок пламени, что для данной установки является аварийным режимом. Поэтому часть зависимости, где, по-видимому, должен быть рост частоты при больших крутках, в экспериментах с горением зафиксировать не удалось. Для исследованных режимов с реализацией горения влияние горения проявляется в некотором снижении частоты прецессии. Заметим, что, хотя изменение частоты в условиях горения достаточно явно выражено, оно в целом не превышает 10%. При этом, говоря о количественном сравнении режимов с горением и изотермического потока, следует помнить, что частотные характеристики получены при разных значениях числа Рейнольдса (для ограничения тепловой мощности факела режимы с горением исследовались при более низком расходе возду-

ха). Несмотря на достаточно большие числа Рейнольдса в обоих случаях, безразмерная частота может иметь некоторую зависимость от числа Re [13]. Кроме того, снижение частоты при горении может происходить за счет изменения параметра крутки вследствие неизотермичности потока, о чем упоминалось выше. Тем не менее, самое главное здесь, что отмеченные тенденции в изменении числа Струхала от крутки потока остаются неизменными и наблюдаются независимо от условий течения (изотермический или реагирующий случай). То есть можно констатировать, что эксперименты с изотермическим потоком дают хорошее приближение режима работы установки с горением. Поэтому дальнейшие исследования с использованием системы PIV были ограничены изотермическими условиями.

Были проведены измерения методом PIV распределений трех компонентов скорости в центральном сечении при параметре крутки потока $S = 0.6 \div 1.3$ в изотермических условиях. Для получения средних полей скоростей, а также распределений пульсационной составляющей скорости потока использовались 5 000 мгновенных изображений. Сигнал, получаемый с синхронизатора, подавался дополнительно на канал АЦП регистратора датчиков давления и позволял детектировать вспышки лазерного ножа системы PIV и определять моменты времени, соответствующие измерениям распределений скорости. Сигнал с микрофона являлся опорным сигналом, отслеживающим фазу ПВЯ. Таким образом, обеспе-

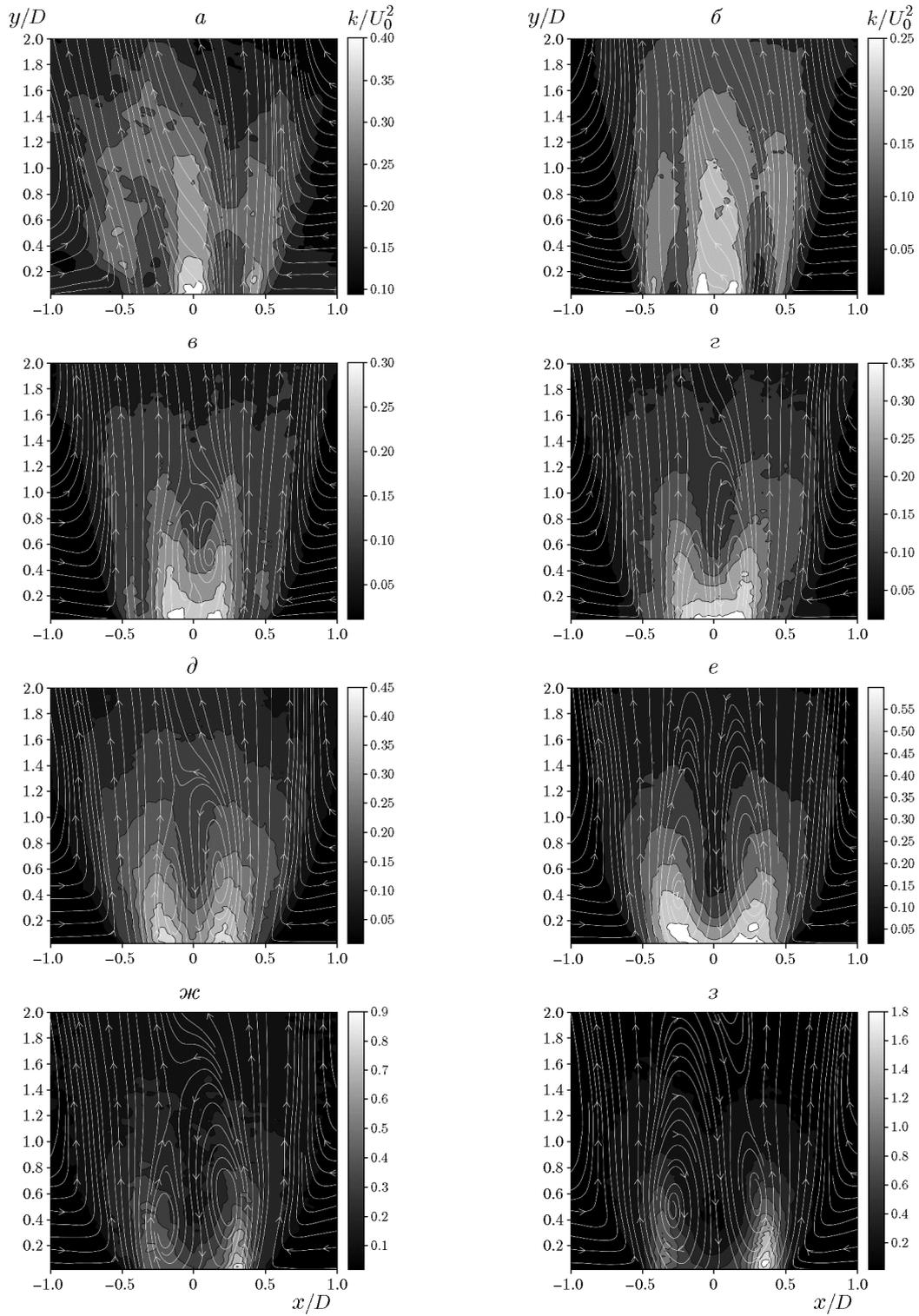


Рис. 7. Распределение КЭТ и визуализация линий тока:

$a - S = 0.5$, $б - S = 0.6$, $в - S = 0.75$, $г - S = 0.86$, $д - S = 1.0$, $е - S = 1.15$, $ж - S = 1.3$, $з - S = 1.5$

чивалась однозначная связь между временем PIV-изображений и фазой движения вихревой структуры. Исходный сигнал, получаемый от датчика давления, отфильтровывался вблизи частоты ПВЯ для данного режима в пределах 15 %. В каждой расчетной точке набиралась статистика около 50 PIV-изображений. На рис. 6 представлено фазово-осредненное поле скорости для режима $S = 0.86$ при двух взаимно противоположных азимутальных положениях ПВЯ.

Как показано в работах [12, 13, 32, 33], чередующееся расположение центров вихрей, которые могут быть определены на основе анализа векторного поля, связано со спиральной геометрией, условно показанной на рис. 6 штриховой линией. Видно, что центры вихрей находятся на удалении в радиальном направлении примерно $0.2D$ от оси сопла, что соответствует границе, разделяющей области прямого и возвратного течений.

На рис. 7 представлены пространственные распределения кинетической энергии турбулентности k (КЭТ), обезразмеренные на квадрат среднерасходной скорости, при различных значениях числа крутки потока S .

На рис. 7, *a, б* максимум КЭТ находится по центру сопла, а зона возвратного течения отсутствует. Однако при $S = 0.6$ (рис. 7, *б*) уже появляется линия, где аксиальная скорость равна нулю, а распределение КЭТ становится двугорбым, что может свидетельствовать о начале формирования ПВЯ.

На рис. 7, *в-е* распределения КЭТ симметричны относительно центральной линии. Максимумы, где наблюдаются наибольшие пульсации тангенциальной компоненты скорости, также расположены симметрично относительно оси. Вид этих распределений согласуется с ранее полученными результатами, что еще раз подтверждает, что в данных режимах ярко выражен эффект ПВЯ. На рис. 7, *ж-з* распределения становятся несимметричными, радиус прецессии вихря приближается к радиусу сопла, а рециркуляционная зона проникает внутрь сопла, что может свидетельствовать о вырождении ПВЯ. В условиях с горением это приводит к проскоку пламени внутрь камеры смещения.

Как было неоднократно отмечено в литературе [9, 23–26], вклад когерентной структуры в форме ПВЯ представляет собой две первые POD-моды. Результаты анализа вклада POD-мод в КЭТ от параметра крутки потока S

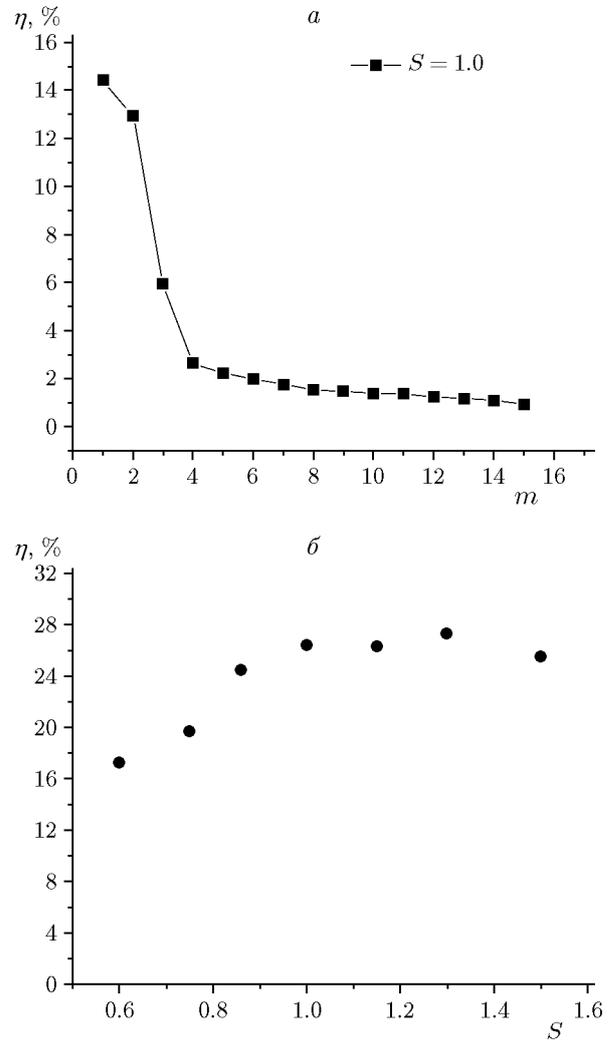


Рис. 8. Вклад POD-мод в КЭТ при $S = 1.0$ (*a*) и суммарный вклад первых двух POD-мод в КЭТ при различных значениях S (*б*)

представлен на рис. 8, где m — порядковый номер POD-моды. На рис. 8, *a* показан результат POD-анализа при $S = 1.0$. Полученные первые две моды с вкладом 14.5 и 13 % близки по своим значениям и намного превышают все остальные моды, что однозначно свидетельствует о наличии ПВЯ. На рис. 6, *б* показан суммарный вклад первых двух мод в КЭТ при различных числах крутки потока. С ростом параметра крутки потока S вклад в КЭТ первых двух мод увеличивается, что свидетельствует об усилении ПВЯ при росте S . При $S > 1.3$ вклад в КЭТ уменьшается, что также свидетельствует о вырождении ПВЯ.

Данный результат хорошо согласуется с наблюдаемым в эксперименте распределением КЭТ, представленным на рис. 7. Рост вклада

первых двух мод в КЭТ с ростом числа крутки потока подтверждает, что в данных режимах наблюдается ярко выраженный эффект ПВЯ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты комплексного экспериментального исследования закрученного потока при варьировании режимов течения и степени закрутки в изотермических условиях и с горением предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси. Исследование распределений скоростей проводилось с помощью современных бесконтактных экспериментальных методов диагностики на базе PIV. Для регистрации акустического поля, порождаемого эффектом ПВЯ, были использованы четыре измерительных микрофона с отборниками давления.

В условиях реагирующего потока показано, что при увеличении крутки факел становится более компактным: изменяет свою форму и длину. При увеличении параметра крутки выше критического $S > 0.6$ формируется ПВЯ.

С помощью акустических датчиков были исследованы пульсации давления и идентифицированы режимы с формированием вихревых структур при изменении интегрального параметра крутки S для реагирующего и изотермического случаев. Зависимости числа Струхала от крутки потока как в реагирующем, так и в изотермическом случае имеют одинаковый немонотонный характер. В обоих случаях минимум достигается при числе крутки $S = 1.0$.

Эффект прецессирующего вихревого ядра был исследован с помощью POD-анализа и фазового осреднения. Результаты фазового осреднения демонстрируют, что прецессирующее вихревое ядро представляет собой односпиральную вихревую структуру. Вклад первых двух POD-мод в общий уровень кинетической энергии турбулентности составляет 27 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Roussillo M., Scoufflaire Ph., Candel S., Franzelli B.** Experimental investigation of soot production in a confined swirled flame operating under perfectly premixed rich conditions // *Proc. Combust. Inst.* — 2018. — V. 37, N 1. — P. 893–901. — DOI: 10.1016/j.proci.2018.06.110.
2. **Stöhr M., Geigle K. P., Hadeff R., Boxx I., Carter C. D., Grader M., Gerlinger P.** Time-resolved study of transient soot formation in an aero-engine model combustor at elevated pressure // *Proc. Combust. Inst.* — 2019. — V. 37, N 4. — P. 5421–5428. — DOI: 10.1016/j.proci.2018.05.122.
3. **Chatterjee S., Gülder Ö. L.** Soot concentration and primary particle size in swirl-stabilized non-premixed turbulent flames of ethylene and air // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2018. — V. 95. — P. 73–80. — DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.01.035.
4. **Lieuwen T. C., Yang V.** *Gas Turbine Emissions.* — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013. — DOI: 10.2514/1.J053061.
5. **Syred N.** A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2006. — V. 32, N 2. — P. 93–161. — DOI: 10.1016/j.peccs.2005.10.002
6. **Oberleithner K., Stöhr M., Im S. H., Arndt C. M., Steinberg A. M.** Formation and flame-induced suppression of the precessing vortex core in a swirl combustor: experiments and linear stability analysis // *Combust. Flame.* — 2015. — V. 162, N 8. — P. 3100–3114. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.02.015.
7. **Valera-Medina A.** Coherent structures and their effects on processes occurring in swirl combustors: PhD Thesis / Cardiff Univ. — Cardiff, 2009.
8. **Steinberg A. M., Arndt C. M., Meier W.** Parametric study of vortex structures and their dynamics in swirl-stabilized combustion // *Proc. Combust. Inst.* — 2013. — V. 34, N 2. — P. 3117–3125. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.015.
9. **Stöhr M., Boxx I., Carter C. D., Meier W.** Experimental study of vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor // *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159, N 8. — P. 2636–2649. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.03.020.
10. **Candel S., Durox D., Schuller T., Bourgouin J.-F., Moeck J. P.** Dynamics of swirling flames // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2014. — V. 46. — P. 147–173. — DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141300.
11. **Литвинов И. В., Назаров А. В., Шторк С. И.** Подавление прецессии вихревого ядра в закрученном реагирующем потоке // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2016. — Т. 23, № 2. — С. 315–318.
12. **Anacleto P. M., Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I.** Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor // *Combust. Sci. Technol.* — 2003. — V. 175, N 8. — P. 1369–1388. — DOI: 10.1080/00102200302354.
13. **Shtork S. I., Vieira N. F., Fernandes E. C.** On the identification of helical instabilities in a reacting swirling flow // *Fuel.* — 2008. — V. 87, N 10–11. — P. 2314–2321. — DOI: 10.1016/j.fuel.2007.10.016.

14. Moeck J. P., Bourgouin J.-F., Durox D., Schuller T., Candel S. Nonlinear interaction between a precessing vortex core and acoustic oscillations in a turbulent swirling flame // *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159, N 8. — P. 2650–2668. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.04.002.
15. Boxx I., Stöhr M., Carter C., Meier W. Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 8. — P. 1510–1525. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.015.
16. Litvinov I. V., Gorelikov E. U., Suslov D. A., Shtork S. I. Analysis of the swirl number in a radial swirler // *AIP Conf. Proc.* — 2020. — V. 2211, N 1. — 040005. — DOI: 10.1063/5.0000777.
17. Litvinov I. V., Gorelikov E. U., Shtork S. I. The unsteady swirling jet in a model of radial burner // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2021. — V. 2119. — 012106.
18. Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N. *Swirl Flows.* — Tunbridge Wells: Abacus Press, 1984.
19. 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 Fluid Flow.* — 2013. — V. 42. — P. 251–264. — DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.02.009.
20. Lückhoff F., Sieber M., Paschereit C. O., Oberleithner K. Phase-opposition control of the precessing vortex core in turbulent swirl flames for investigation of mixing and flame stability // *J. Eng. Gas Turbines Power.* — 2019. — V. 141, N 11. — 111008. — DOI: 10.1115/1.4044469.
21. Holmes Ph., Lumley J. L., Berkooz G. *Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry.* — Cambridge Univ. Press, 2012. — DOI: 10.1017/CBO9780511622700.
22. Sirovich L. Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part I: Coherent structures // *Quart. Appl. Math.* — 1987. — V. 45, N 3. — P. 561–571.
23. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // *Phys. Fluids.* — 2014. — V. 26, N 6. — 065109. — DOI: 10.1063/1.4884915.
24. Gurka R., Liberzon A., Hetsroni G. POD of vorticity fields: A method for spatial characterization of coherent structures // *Int. J. Heat Fluid Flow.* — 2006. — V. 27, N 3. — P. 416–423. — DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.01.001.
25. Oberleithner K., Sieber M., Nayeri C. N., Paschereit C. O., Petz C., Hege H.-C., Noack B. R., Wygnanski I. Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode construction // *J. Fluid Mech.* — 2011. — V. 679. — P. 383–414. — DOI: 10.1017/jfm.2011.141.
26. Schmid P. J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data // *J. Fluid Mech.* — 2010. — V. 656. — P. 5–28. — DOI: 10.1017/S0022112010001217.
27. Litvinov I. V., Shtork S. I. Identification of geometrical vortex parameters in tangential swirler // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2018. — V. 1105. — 012099.
28. Litvinov I., Yoon J., Noren C., Stöhr M., Boxx I., Geigle K. P. Time-resolved study of mixing and reaction in an aero-engine model combustor at increased pressure // *Combust. Flame.* — 2021. — V. 231. — 111474. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111474.
29. Litvinov I. V., Sharaborin D. K., Shtork S. I. Reconstructing the structural parameters of a precessing vortex by SPIV and acoustic sensors // *Exp. Fluids.* — 2019. — V. 60, N 9. — Article ID 139. — DOI: 10.1007/s00348-019-2783-5.
30. Cafiero G., Ceglia G., Discetti S., Ianiro A., Astarita T., Cardone G. On the three-dimensional precessing jet flow past a sudden expansion // *Exp. Fluids.* — 2014. — V. 55, N 2. — P. 1–13. — DOI: 10/1007/s00348-014-1677-9.
31. Markovich D. M., Dulin V. M., Abdurakipov S. S., Kozinkin L. A., Tokarev M. P., Hanjalić K. Helical modes in low- and high-swirl jets measured by tomographic PIV // *J. Turbulence.* — 2016. — V. 17, N 7. — P. 678–698. — DOI: 10.1080/14685248.2016.1173697.
32. Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I. An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor // *Exp. Fluids.* — 2006. — V. 40. — P. 177–187. — DOI: 10.1007/s00348-005-0034-4.
33. Stöhr M., Boxx I., Carter C., Meier W. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor // *Proc. Combust. Inst.* — 2011. — V. 33, N 2. — P. 2923–2960. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.103.

*Поступила в редакцию 07.02.2022.
Принята к публикации 25.05.2022.*