

## ВИХРЕВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В РЕАГИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

**И.В. Литвинов, А.В. Назаров**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск*

Приведен анализ осредненных распределений скорости, измеренных с помощью лазерно-доплеровского анемометра, на выходе из тангенциального горелочного устройства в реагирующем потоке при различных расходах пропан-воздушной смеси (коэффициент стехиометрии,  $\varphi = 0,4$ ). Показано, что частота прецессирующего вихревого ядра в реагирующем потоке не является линейной функцией расхода смеси, как в случае изотермических условий. Предложены возможные причины влияния на частоту прецессии вихря условий реагирующего потока – увеличение размера вихревого ядра за счет заполнения продуктами реакции.

*Ключевые слова: обедненное горение, прецессия вихревого ядра (ПВЯ), лазерно-доплеровский анемометр (ЛДА), пульсации скорости.*

### Введение

В современных камерах сгорания часто используются аэродинамические способы стабилизации пламени, например, закрутка топливно-воздушной смеси. В закрученном потоке формируется центральная рециркуляционная зона (ЦРЗ), которая позволяет вернуть продукты несгоревшего топлива в высокотемпературную область, что, в свою очередь, стабилизирует горение. Формирование ЦРЗ почти всегда сопутствует нестационарному вихревому явлению – прецессии вихревого ядра (ПВЯ) [1]. При этом в литературе отмечается, что ПВЯ может по-разному влиять на стабилизацию пламени: как значительно улучшать перемешивание топливно-воздушной смеси [2–4], уменьшать выбросы NOx [5], так и, взаимодействуя с термоакустическими осцилляциями, негативно влиять на выделяемую мощность горелочного устройства [4, 6]. Эти обстоятельства делают исследование ПВЯ в условиях горения важной и актуальной задачей.

Первое наблюдение эффекта ПВЯ в случае изотермического закрученного потока описано в работах [7, 8]. Авторами был замечен акустический тон, который они связали с прецессионным движением вихря, также в работе была отмечена винтовая структура вихря. Гораздо позднее в работах [9, 10] был предложен возможный механизм формирования эффекта ПВЯ в закрученном потоке с помощью самоиндуцированного движения винтового вихря. В условиях реагирующего потока описать прецессирующее движение вихря, пусть и в модельных горелочных устройствах – задача очень сложная, как для экспериментальных методов, так и для аналитических подходов, например, теории винтовых вихрей [10]. Данная работа ставит перед собой задачу – исследовать эффект ПВЯ в условиях реагирующего потока в модели тангенциального горелочного устройства и установить связь между сильными пульсациями скорости и

проявлением эффекта ПВЯ в случае реагирующего и изотермического потока.

### Экспериментальная установка

Тангенциальная подача топливно-воздушной смеси часто применяется в горелочных устройствах [1, 11]. В данной работе использовалось тангенциальное горелочное устройство, аналогичное по геометрии [12], но выполненное из дюрала и нержавеющей стали (рис. 1, а). В экспериментах конструктивный параметр крутки  $S$  равнялся 2,4 и определялся согласно [1] по формуле

$$S = \frac{\pi D_e D_0}{4 A_T},$$

где  $D_e = 52$  мм и  $D_0 = 145$  мм – диаметры выходного сопла и основной части камеры соответственно,  $A_T$  – площадь тангенциальных входных патрубков с диаметром 40 мм. В качестве безразмерных определяющих параметров, использовалось число Рейнольдса  $Re$ , построенное по изотермическому расходу воздуха  $Q_a$  и вязкости воздуха  $\nu_a$ :

$$Re = \frac{4 Q_a}{\pi D_e \nu_a},$$

а также коэффициент стехиометрии (избытка топлива)  $\varphi$ , характеризующий отличие отношения массовых расходов пропана и кислорода от стехиометрического состава смеси. Учитывая объемное содержание кислорода в воздухе и значения плотности газов,  $\varphi$  имеет следующую зависимость от объемных расходов воздуха  $Q_a$  и пропана  $Q_p$ :

$$\varphi = 24,12 \frac{Q_p}{Q_a}.$$

Для получения распределений скорости использовался лазерно-доплеровский анемометр (ЛДА) «ЛАД-06». Прибор регистрировал до 5 тыс. вспышек в каждой измерительной точке, что по-

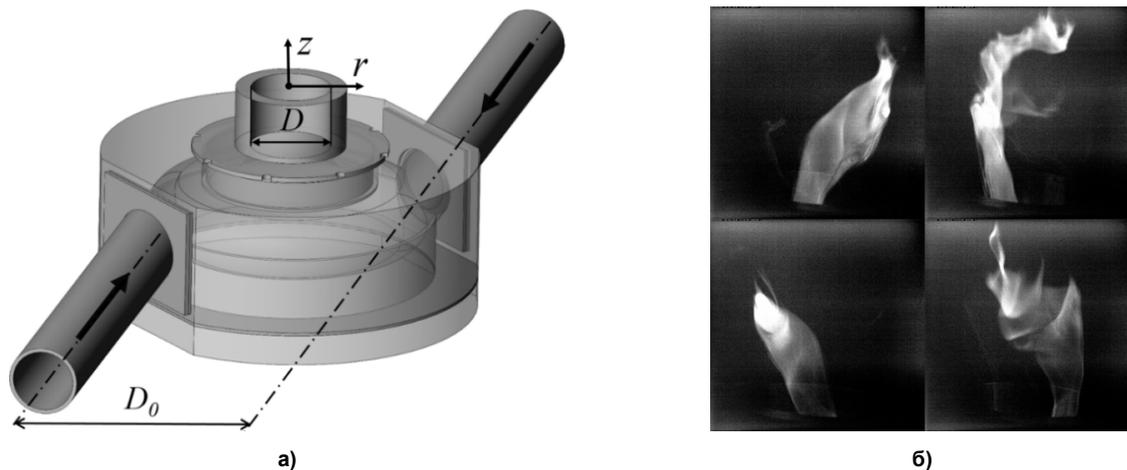


Рис. 1. Тангенциальное горелочное устройство (а), визуализация эффекта КВЯ (б)

зволило достоверно измерить среднеквадратичное отклонение от средней величины скорости. В качестве трассеров в случае изотермического потока использовался аэрозоль парафинового масла, а в случае реагирующего потока использовался оксид титана, который не вступает в реакцию окисления. Средний диаметр трассеров составил 1–3 мкм.

### Результаты

Эффект КВЯ возникает в тангенциальном горелочном устройстве при изотермических условиях в широком диапазоне  $Re$  [12, 13]. Эффект можно визуализировать слабым диффузионным горением пропана внутри вихревого ядра, подавая пропан через аксиальное отверстие на дне камеры.

Из визуализации видно, что вихрь нестационарный и вращается вокруг геометрического центра сопла (рис. 1, б).

В данной работе изучалось влияние на эффект КВЯ горения предварительно перемешанной пропан-воздушной смеси, которая подается в тангенциальные патрубки. На первом этапе было установлено, что при показателе стехиометрии  $\varphi = 0,4$  наблюдается устойчивое горение обедненной смеси. При фиксированном  $\varphi$  проводились измерения распределений скорости при различных расходах смеси 9–14 л/с.

На рис. 2 представлены полупрофили осредненной скорости для аксиальной и тангенциальной компоненты скорости в условиях реагирующего

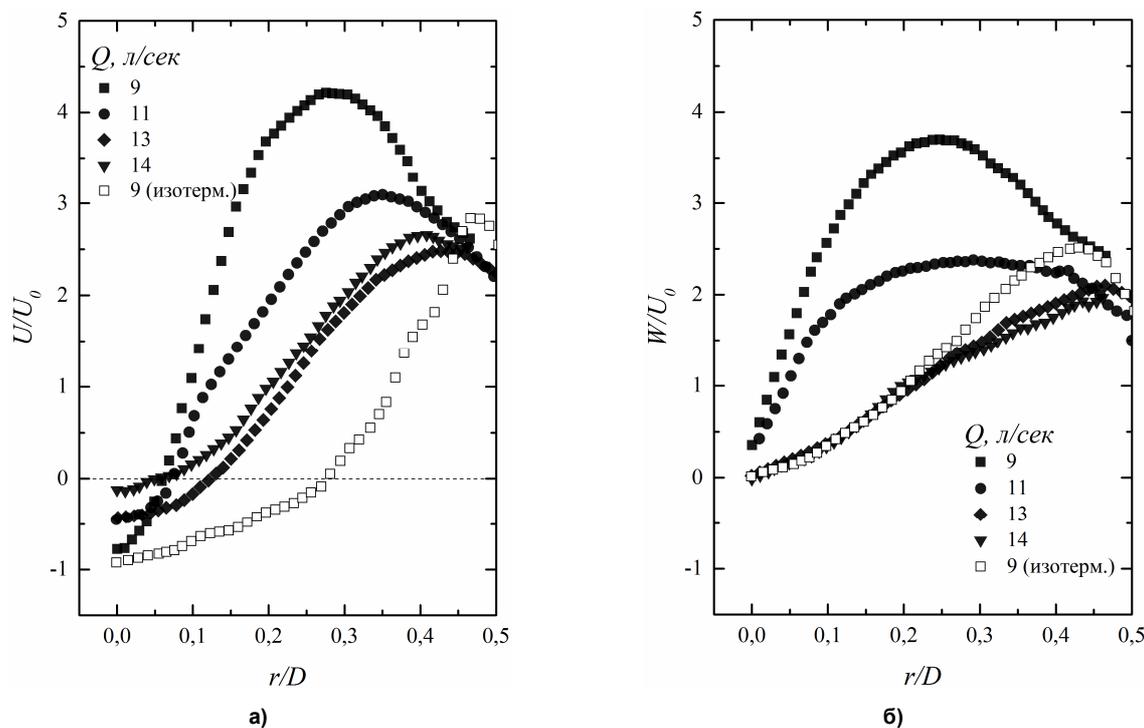


Рис. 2. Осреднённые распределения скорости: аксиальной (а) и тангенциальной (б)

потока для различных расходов смеси, а также приведен один случай изотермического течения. Измерения выполнены на высоте  $z = 3$  мм над соплом горелочного устройства вдоль радиальной координаты  $r$ . Значения скорости обезразмерены на среднерасходную изотермическую скорость  $U_0$ , а радиальное расстояние на диаметр сопла  $D$ .

Результаты показывают, что течение в реагирующем потоке характеризуется более высокими скоростями из-за объемного расширения среды. Увеличивается как степень закрутки (высокий уровень тангенциальной компоненты скорости), так и уровень аксиальной скорости в струе. Также видно, что область рециркуляционной зоны в случае реагирующего потока существенно сокращается по ширине, а максимум тангенциальной скорости смещается с периферии к центру сопла.

Согласно [14], прецессирующая вихревая структура отклоняется от геометрической оси камеры примерно до границы зоны обратного тока, поэтому на основе приведенных осредненных распределений аксиальной скорости можно оценить радиус прецессии  $a$ , размер вихревого ядра также можно оценить, если принять гипотезу о том, что максимальная тангенциальная скорость потока достигает своего максимума на расстоянии, равном  $a + \varepsilon = r|_{w=W_{\max}}$  [10]. Из этих оценок следует, что радиус прецессии в случае реагирующего потока существенно сократился с 0,25 до 0,05D. Радиус ядра вихря увеличился с 0,2 до 0,4D, против 0,15D для изотермического случая при увеличении расхода смеси от 9 до 14 л/с.

По распределениям среднеквадратичных отклонений (СКО) аксиальной и тангенциальной компонент скорости также можно зарегистрировать присутствие эффекта ПВЯ (рис. 3). Радиальное положение, где проходит траектория вихревого ядра, характеризуется максимумом пульсаций аксиальной компоненты скорости (рис. 3, а). По распределениям СКО скорости видно, что радиус прецессии действительно значительно сокращается от края сопла к центру камеры, причем чем меньше общий расход смеси, тем радиус прецессии меньше.

Эффект ПВЯ также всегда сопровождается высоким уровнем пульсаций тангенциальной скорости в центре прецессирующего движения, где вклад когерентной составляющей в СКО скорости наиболее значительный. Это связано с тем, что вектор скорости в центре вращается синхронно с прецессией вихря. То, что в этой точке максимальные пульсации видно по распределениям СКО скорости как в случае изотермического, так и реагирующего потоков (рис. 3, б). Поэтому проанализируем спектры пульсаций тангенциальной компоненты скорости в этой точке для исследуемых режимов.

Для построения спектров неэквидистантных сигналов, а именно такую реализацию значений скорости во времени представляет собой сигнал, полученный с помощью ЛДА, использовался алгоритм Ломба [15]. На рис. 4, а представлены спектры Ломба пульсаций тангенциальной компоненты скорости в центре ( $r = 0$ ), где уровень тангенциальных пульсаций максимален. В спектрах при-

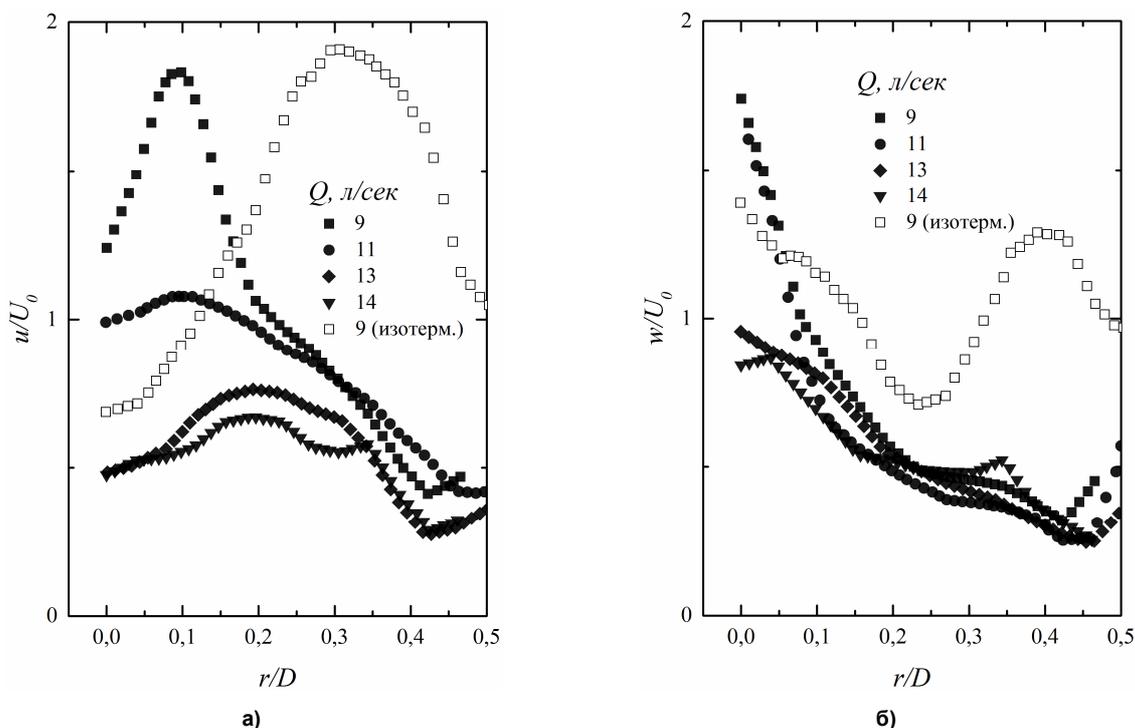


Рис. 3. Распределения среднеквадратичного отклонения от средней скорости: аксиальной (а) и тангенциальной (б)

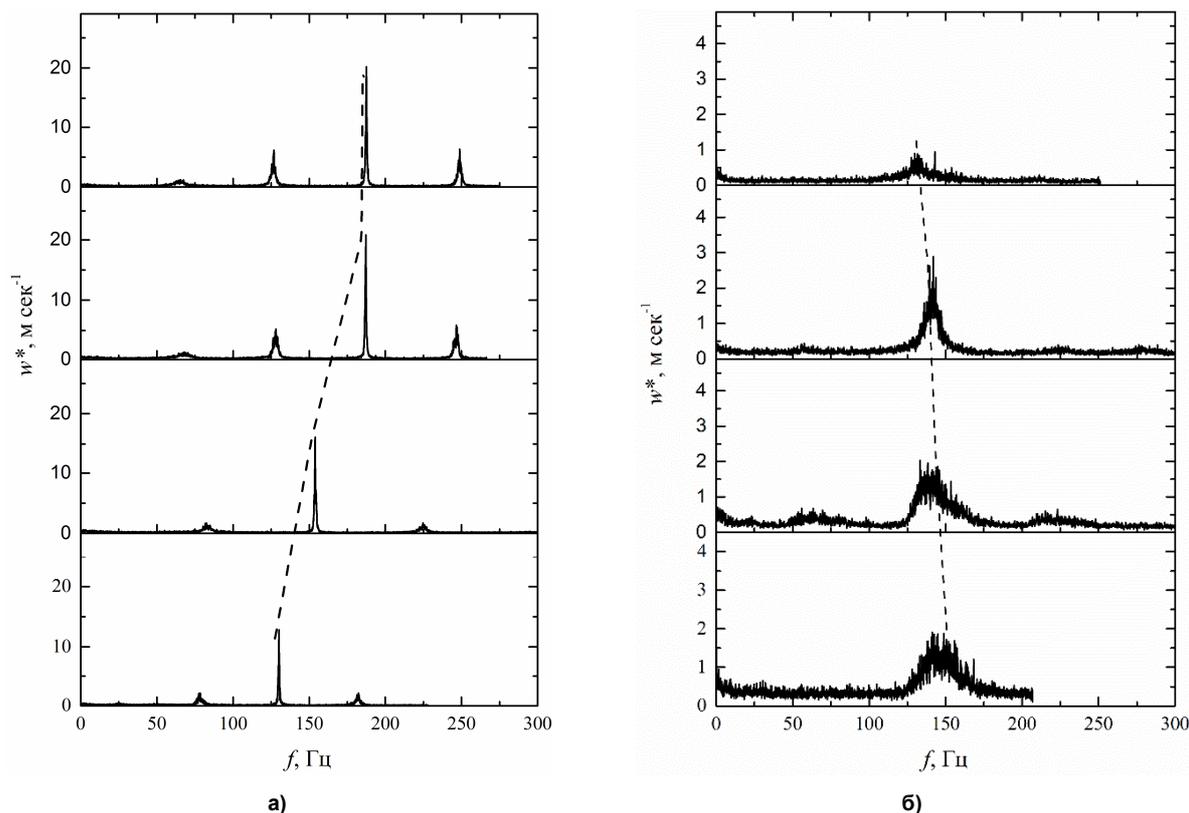


Рис. 4. Спектры пульсаций тангенциальной компоненты скорости для изотермического (а) и реагирующего потока (б) при различных расходах смеси

существует доминирующая частота, которая является частотой прецессии вихревого ядра, и ее амплитуда вносит существенный вклад в СКО тангенциальной скорости в центре. В литературе отмечено, что частота ПВЯ является линейной функцией от объемного расхода [8, 10]. Как видно из спектров частота ПВЯ действительно возрастает при увеличении расхода  $Q$  для изотермического случая.

Для случая реагирующего потока всё гораздо сложнее (рис. 4, б). Как видно из спектров, для 9 л/с частота ПВЯ  $f^* = 150$  Гц против 130 Гц в случае изотермического потока. Можно сделать вывод о том, что, когда смесь вступает в реакцию горения, ЦЗР заполняется продуктами горения и радиус прецессии вихря уменьшается, из-за чего частота ПВЯ возрастает. Интересно, что при дальнейшем увеличении расхода смеси, частота не растет как в случае изотермического потока, а даже уменьшается. Если проанализировать распределение аксиальной компоненты осреднённой скорости, то видно, что радиус прецессии увеличивается при росте расхода смеси, это и объясняет понижение частоты ПВЯ. Вторым возможным механизмом уменьшения частоты ПВЯ является утолщение вихревого ядра (см. рис. 2, б) за счет заполнения продуктами сгорания разреженной области ядра. Аналогичный эффект снижения частоты ПВЯ, описан в работе [16]. Там показано, что подача воздуха в гидродинамическую вихревую

камеру снижает частоту ПВЯ за счет заполнения вихревого ядра газовой фазой.

#### Заключение

В работе были исследованы режимы с формированием ПВЯ в условиях реагирующего потока на выходе из тангенциального горелочного устройства. При фиксированном минимально возможном  $\varphi = 0,4$  варьировался расход смеси. Анализ распределений осредненной и среднеквадратичного отклонения осреднённой скорости показал, что в изотермическом случае на выходе из сопла возникает ярко выраженный эффект ПВЯ и частота прецессии является возрастающей линейной функцией расхода. Важным результатом статьи является тот факт, что в случае реагирующего потока частота ПВЯ – нелинейная функция от расхода смеси. Это впервые отмечается в литературе. Возможным механизмом уменьшения частоты ПВЯ в реагирующем потоке при увеличении расхода смеси может стать заполнение продуктами горения вихревого ядра за счет чего его размер увеличивается, и частота прецессии соответственно снижается.

Исследование выполнено за счет средств гранта РФФИ №14-08-31460 «мол\_а».

## Литература/References

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 588 с. [Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. Swirl Flows. England, Abacus Press, 1984.]
2. M. Freitag, M. Klein, M. Gregor, D. Geyer, C. Schneider, A. Dreizler, et al., Mixing Analysis of a Swirling Recirculating Flow Using DNS and Experimental Data, *Int. J. Heat Fluid Flow*. 27 (2006) 636–643. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.02.020
3. D. Galley, S. Ducruix, F. Lacas, D. Veynante, Mixing and Stabilization Study of a Partially Premixed Swirling Flame Using Laser Induced Fluorescence, *Combust. Flame*. 158 (2011) 155–171. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.08.004
4. M. Stöhr, C.M. Arndt, W. Meier, Transient Effects of Fuel-Air Mixing in a Partially-Premixed Turbulent Swirl Flame, *Proc. Combust. Inst.* 35 (2015) 3327–3335. DOI: 10.1016/j.proci.2014.06.095
5. P.M. Anacleto, E.C. Fernandes, M.V. Heitor, S.I. Shtork, Swirl Flow Structure and Flame Characteristics in a Model Lean Premixed Combustor, *Combust. Sci. Technol.* 175 (2003) 1369–1388.
6. A.M. Steinberg, I. Boxx, M. Stöhr, C.D. Carter, W. Meier, Flow-Flame Interactions Causing Acoustically Coupled Heat Release Fluctuations in a Thermo-Acoustically Unstable Gas Turbine Model Combustor, *Combust. Flame*. 157 (2010) 2250–2266. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.07.011
7. R.C. Chanaud, Observations of Oscillatory Motion in Certain Swirling Flows, *J Fluid Mech.* 21 (1965) 111–127. DOI: 10.1017/S0022112065000083
8. J.J. Cassidy, H.T. Falvey, Observations of Unsteady Flow Arising after Vortex Breakdown, *J Fluid Mech.* 41 (1969) 727–736.
9. S.V. Alekseenko, P.A. Kuibin, V.L. Okulov, S.I. Shtork, Helical Vortices in Swirl Flow, *J. Fluid Mech.* 382 (1999) 195–243. DOI: 10.1017/S0022112098003772
10. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. [Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L. *Vvedenie v teoriju koncentrirovannykh vihrej* (Theory of Concentrated Vortices: an Introduction). Novosibirsk, Institute of Thermophysics SB RAS, 2003.]
11. N. Syred, A Review of Oscillation Mechanisms and the Role of the Precessing Vortex Core (PVC) in Swirl Combustion Systems, *Prog. Energy Combust. Sci.* 32 (2006) 93–161. DOI: 10.1016/j.peccs.2005.10.002
12. I.V. Litvinov, S.I. Shtork, P.A. Kuibin, S.V. Alekseenko, K. Hanjalic, Experimental Study and Analytical Reconstruction of Precessing Vortex in a Tangential Swirler, *Int. J. Heat Fluid Flow*. 42 (2013) 251–264. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.02.009
13. Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеев С.В. Экспериментальное исследование сильнозакрученного течения в тангенциальном завихрителе. Вестник КузГТУ. 2012. С. 129–135. [Litvinov I.V., Shtork S.I., Alekseenko S.V. (Experimental Study of Strongly Swirling Flow in a Tangential Swirler Device). *Vestnik KuzGTU* (The Bulletin of KuzSTU), 2012, pp. 129–135. (in Russ.)]
14. S.I. Shtork, C.E. Cala, E.C. Fernandes, Experimental Characterization of Rotating Flow Field in a Model Vortex Burner, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 31 (2007) 779–788. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2006.08.008
15. N.R. Lomb, Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, *Astrophys. Space Sci.* 39 (1976) 447–462. DOI: 10.1007/BF00648343.
16. A.P. Vinokurov, S.I. Shtork, S.V. Alekseenko, The Influence of the Dispersed Gaseous Phase on Characteristics of Vortex Precession in a Swirling Gas-Liquid Flow, *Tech. Phys. Lett.* 41 (2015) 844–846. DOI: 10.1134/S1063785015090114

**Литвинов Иван Викторович**, младший научный сотрудник, лаборатория 7.1, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск; litvinov@itp.nsc.ru.

**Назаров Айдар Вилданович**, инженер-исследователь, лаборатория 7.1, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск; aydar15@gmail.com.

*Поступила в редакцию 14 января 2016 г.*

## VORTEX INSTABILITY IN REACT FLOW OF TANGENTIAL COMBUSTOR

*I.V. Litvinov, litvinov@itp.nsc.ru,  
A.V. Nazarov, aydar15@gmail.com*

*T.F. Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk, Russian Federation*

The analysis of the averaged velocity distributions measured with the laser Doppler anemometer at the exit of the tangential burner in the reactant stream at different flow rates of the propane-air mixture (stoichiometric ratio,  $\varphi = 0,4$ ) is described. The frequency of the precessing vortex core in the reactant stream is shown to be not a linear function of the mixture in contrast to isothermal conditions. The paper proposes possible reasons for the effect of reacting flow conditions on the frequency of the precessing vortex core: increasing size of the vortex core due to its filling with reaction products.

*Keywords: lean premixed flame, precessing vortex core (PVC), laser Doppler anemometer (LDA), velocity pulsations.*

*Received 14 January 2016*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Литвинов, И.В. Вихревая неустойчивость в реагирующем потоке в тангенциальном горелочном устройстве / И.В. Литвинов, А.В. Назаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 13–18. DOI: 10.14529/power160102

### FOR CITATION

Litvinov I.V., Nazarov A.V. Vortex Instability in React Flow of Tangential Combustor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 13–18. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160102

---