

О ВЛИЯНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА ФОРМУ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ*

Л. М. Чикишев¹, В. М. Дулин², А. С. Лобасов³, Д. М. Маркович⁴

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования когерентных структур в закрученной турбулентной струе с горением метановоздушной смеси с избытком воздуха на основе измерений методами анемометрии по изображениям частиц и плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции. Реализации поля мгновенной скорости в продольном сечении потока зарегистрированы одновременно с распределениями интенсивности флуоресценции формальдегида и гидроксильного радикала. В результате анализа ансамбля из реализаций скорости методом главных компонент установлено наличие когерентной структуры, соответствующей паре винтовых вихрей, коррелированных с крупномасштабными деформациями фронта пламени.

Ключевые слова: горение в закрученной струе; когерентные структуры; прецессирующее вихревое ядро; панорамная лазерно-индуцированная флуоресценция; анемометрия по изображениям частиц; метод главных компонент

DOI: 10.30826/CE18110205

Литература

1. Lean combustion: Technology and control / Ed. D. Dunn-Rankin. — Academic Press, 2007. 280 p.
2. *Lieuwen T. C.* Unsteady combustor physics. — Cambridge University Press, 2012. 426 p.
3. *Михайлов А. И., Горбунов Г. М., Борисов В. В., Квасников Л. А., Марков Н. И.* Рабочий процесс и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей. — М: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1959. 285 с.
4. *Ахмедов Р. Б., Балагула Т. Б., Рашидов Ф. К., Сакаев А. Ю.* Аэродинамика закрученных струй. — М: Энергия, 1977. 240 с.
5. *Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N.* Swirl flows. — Tunbridge Wells, Kent, England: Abacus Press, 1984, 488 p.
6. *Alekseenko S. V., Dulin V. M., Kozorezov Y. S., Markovich D. M.* Effect of high-amplitude forcing on turbulent combustion intensity and vortex core precession in a strongly swirling lifted propane/air flame // *Combust. Sci. Technol.*, 2012. Vol. 184. No. 10-11. P. 1862–1890.
7. *Oberleithner K., Paschereit C. O., Seele R., Wygnanski I.* Formation of turbulent vortex breakdown: Intermittency, criticality, and global instability // *AIAA J.*, 2012. Vol. 50. No. 7. P. 1437–1452.
8. *Syred N.* A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // *Prog. Energ. Combust.*, 2006. Vol. 32. No. 2. P. 93–161.
9. *Eckbreth A. C.* Laser diagnostics for combustion temperature and species. — Combustion science & technology ser. — CRC Press, 1996. Vol. 3. 630 p.
10. *Hassel E. P., Linow S.* Laser diagnostics for studies of turbulent combustion // *Meas. Sci. Technol.*, 2000. Vol. 11. No. 2. P. R37.
11. *Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J.* Particle image velocimetry: A practical guide. — Experimental fluid mechanics ser. — Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 1998. 271 p.
12. *Stella A., Guj G., Kompenhans J., Raffel M., Richard H.* Application of particle image velocimetry to combustor flows: Design considerations and uncertainty assessment // *Exp. Fluids*, 2001. Vol. 30. No. 2. P. 167–180.
13. *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. Vol. 157. No. 8. P. 1510–1525.
14. *Stöhr M., Sadanandan R., Meier W.* Phase-resolved characterization of vortex–flame interaction in a turbulent swirl flame // *Exp. Fluids*, 2011. Vol. 51. No. 4. P. 1153–1167.
15. *Harrington J. E., Smyth K. C.* Laser-induced fluorescence measurements of formaldehyde in methane/air diffusion

* Работа выполнена при финансировании Российским научным фондом (грант № 16-19-10566).

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Новосибирский государственный университет, chl@itp.nsc.ru

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Новосибирский государственный университет, vmd@itp.nsc.ru

³ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Новосибирский государственный университет, alexey.lobasov@gmail.com

⁴ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Новосибирский государственный университет, dmark@itp.nsc.ru

- flame // Chem. Phys. Lett., 1993. Vol. 202. No. 3-4. P. 196–202.
16. Brackmann C., Nygren J., Bai X., Li Z., Bladh H., Axelson B., Denbratt I., Koopmans L., Bengtsson P.-E., Alden M. Laser-induced fluorescence of formaldehyde in combustion using third harmonic Nd:YAG laser excitation // Spectrochim. Acta A, 2003. Vol. 59. No. 14. P. 3347–3356.
 17. Brackmann C., Li Z., Rupinski M., Docquier N., Pengloan G., Alden M. Strategies for formaldehyde detection in flames and engines using a single-mode Nd:YAG/OPO laser system // Appl. Spectrosc., 2005. Vol. 59. No. 6. P. 763–768.
 18. Sirovich L. Turbulence and the dynamics of coherent structures. I. Coherent structures // Q. Appl. Math., 1987. Vol. 45. No. 3. P. 561–571.
 19. 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. Vol. 26. No. 6. P. 065109.
 20. Маркович Д. М., Токарев М. П. Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе stereo PIV // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии, 2008. Т. 9. № 1. С. 311–326.
 21. Kerschen G., Golinval J. C., Vakakis A. F., Bergman L. A. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: An overview // Nonlin. Dyn., 2005. Vol. 41. No. 1. P. 147–169.
 22. Kariuki J., Dowlut A., Yuan R., Balachandran R., Mastorakos E. Heat release imaging in turbulent premixed methane–air flames close to blow-off // Proc. Combust. Inst., 2015. Vol. 35. No. 2. P. 1443–1450.

Поступила в редакцию 19.02.18

ON IMPACT OF LARGE-SCALE VORTEX STRUCTURES ON FLAME SHAPE IN A SWIRLING JET FLOW

L. M. Chikishev^{1,2}, V. M. Dulin^{1,2}, A. S. Lobasov^{1,2}, and D. M. Markovich^{1,2}

¹S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation

²Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation

Abstract: The paper reports on results of the experimental study of coherent structures in a lean premixed swirling jet-flame by particle image velocimetry and planar laser-induced fluorescence. The velocity fields are captured in the longitudinal plane simultaneously with the intensity of HCHO and OH* fluorescence. Based on processing of the velocity fields by principle component analysis, a coherent flow structure is revealed, which corresponds to a pair of helical vortices, correlated to large-scale deformations of the flame front.

Keywords: swirling flames; coherent structure; precessing vortex core; planar laser-induced fluorescence; particle image velocimetry; principle component analysis

DOI: 10.30826/CE18110205

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No 16-19-10566).

References

1. Dunn-Rankin, D., ed. 2007. *Lean combustion: technology and control*. Academic Press. 280 p.
2. Lieuwen, T. C. 2012. *Unsteady combustor physics*. Cambridge University Press. 426 p.
3. Mikhaylov, A. I., G. M. Gorbunov, V. V. Borisov, L. A. Kvasnikov, and N. I. Markov. 1959. *Rabochiy protsess i raschet kamer sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley* [Workflow and calculation of gas turbine engine combustors]. Moscow: Defence Industry Publs. 285 p.
4. Akhmedov, R. B., T. B. Balagula, F. K. Rashidov, and A. Y. Sakaev. 1977. *Aerodinamika zakruchennykh struy* [Aerodynamics of swirling jets]. Moscow: Energy Publs. 240 p.
5. Gupta, A. K., D. G. Lilley, and N. Syred. 1984. *Swirl flows*. Tunbridge Wells, Kent, England: Abacus Press. 488 p.
6. Alekseenko, S. V., V. M. Dulin, Y. S. Kozorezov, and D. M. Markovich. 2012. Effect of high-amplitude forcing on turbulent combustion intensity and vortex core precession in a strongly swirling lifted propane/air flame. *Combust. Sci. Technol.* 184(10-11):1862–1890.
7. Oberleithner, K., C. O. Paschereit, R. Seele, and I. Wygnanski. 2012. Formation of turbulent vortex breakdown: Intermittency, criticality, and global instability. *AIAA J.* 50(7):1437–1452.
8. Syred, N. 2006. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. *Prog. Energ. Combust.* 32(2):93–161.
9. Eckbreth, A. C. 1996. *Laser diagnostics for combustion temperature and species*. Combustion science & technology ser. CRC Press. Vol. 3. 630 p.
10. Hassel, E. P., and S. Linow. 2000. Laser diagnostics for studies of turbulent combustion. *Meas. Sci. Technol.* 11(2):R37.
11. Raffel, M., C. Willert, S. Wereley, and J. Kompenhans. 1998. *Particle image velocimetry: A practical guide*. Experimental fluid mechanics ser. Berlin – Heidelberg – New York: Springer. 271 p.
12. Stella, A., G. Guj, J. Kompenhans, M. Raffel, and H. Richard. 2001. Application of particle image velocimetry to combusting flows: Design considerations and uncertainty assessment. *Exp. Fluids* 30(2):167–180.
13. Boxx, I., M. Stöhr, C. Carter, and W. Meier. 2010. Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor. *Combust. Flame* 157(8):1510–1525.
14. Stöhr, M., R. Sadanandan, and W. Meier. 2011. Phase-resolved characterization of vortex–flame interaction in a turbulent swirl flame. *Exp. Fluids* 51(4):1153–1167.
15. Harrington, J. E., and K. C. Smyth. 1993. Laser-induced fluorescence measurements of formaldehyde in methane/air diffusion. *Chem. Phys. Lett.* 202(3-4):196–202.
16. Brackmann, C., J. Nygren, X. Bai, Z. Li, H. Bladh, B. Axelsson, I. Denbratt, L. Koopmans, P.-E. Bengtsson, and M. Alden. 2003. Laser-induced fluorescence of formaldehyde in combustion using third harmonic Nd:YAG laser excitation. *Spectrochim. Acta A* 59(14):3347–3356.

17. Brackmann, C., Z. Li, M. Rupinski, N. Docquier, G. Pengloan, and M. Alden. 2005. Strategies for formaldehyde detection in flames an engines using a single-mode Nd:YAG/OPO laser system. *Appl. Spectrosc.* 59(6):763–768.
18. Sirovich, L. 1987. Turbulence and the dynamics of coherent structures. I. Coherent structures. *Q. Appl. Math.* 45(3):561–571.
19. Markovich, D. M., S. S. Abdurakipov, L. M. Chikishev, V. M. Dulin, and K. Hanjalić. 2014. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Phys. Fluids* 26(6):065109.
20. Markovich, D. M., and M. P. Tokarev. 2008. Algoritmy rekonstruktsii trekhkomponentnogo polya skorosti v metode stereo PIV [Three-component velocity field reconstruction algorithms in stereo PIV]. *Numerical Methods and Programming* 9(1):311–326.
21. Kerschen, G., J. C. Golinval, A. F. Vakakis, and L. A. Bergman. 2005. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: an overview. *Nonlin. Dyn.* 41(1):147–169.
22. Kariuki, J., A. Dowlut, R. Yuan, R. Balachandran, and E. Mastorakos. 2015. Heat release imaging in turbulent premixed methane–air flames close to blow-off. *Proc. Combust. Inst.* 35(2):1443–1450.

Received February 19, 2018

Contributors

Chikishev Leonid M. (b. 1985) — Master of Science, junior research scientist, S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Acad. Lavrentieva Av., Novosibirsk 630090, Russian Federation; junior research scientist, Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation; chlm@itp.nsc.ru

Dulin Vladimir M. (b. 1983) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of laboratory, S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Acad. Lavrentieva Av., Novosibirsk 630090, Russian Federation; senior teacher, Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation; vmd@itp.nsc.ru

Lobasov Aleksei S. (b. 1989) — Master of Science, junior research scientist, S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Acad. Lavrentieva Av., Novosibirsk 630090, Russian Federation; junior research scientist, Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation; alexey.lobasov@gmail.com

Markovich Dmitriy M. (b. 1962) — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, professor, director, S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Acad. Lavrentieva Av., Novosibirsk 630090, Russian Federation; head of laboratory, Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation; dmark@itp.nsc.ru