

03

Визуализация структуры потока в вихревой топке

© И.С. Ануфриев, Д.В. Красинский, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов

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

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2014 г.

Исследована пространственная структура закрученного потока в перспективной вихревой топке с распределенным вводом горелочных струй. На основе полученных результатов экспериментального и численного исследования трехмерного поля средней по времени скорости в изотермической лабораторной модели топочного устройства проведена визуализация течения. Для идентификации вихревых структур применены критерии λ_2 и Q , а также критерий „минимума полного давления“. В результате выявлена 3D структура вихревого ядра потока, имеющая V-образную форму.

Потребности в создании нового энергоэффективного оборудования для экологически безопасного сжигания угольного топлива обусловлены перспективами развития угольной энергетики. Это вызывает повышение требований к характеристикам проектируемых или модернизируемых топков парогенераторов и определяет необходимость научного обоснования и применения новых подходов при разработке топочных устройств. На сегодняшний день перспективной является технология факельного сжигания пылеугольного топлива в вихревом потоке. Вихревой перенос является основой всего процесса сжигания в вихревой топке. Закрутка потока в топочной камере приводит к его стабилизации, лучшему заполнению смесью объема камеры, интенсификации процессов теплопереноса за счет усиления перемешивания и увеличения времени пребывания частиц топлива в камере горения, что позволяет уменьшить габариты топки и котлоагрегата в целом. Поэтому при разработке или модернизации топочных устройств, использующих вихревую технологию сжигания, необходимо детальное изучение сложной пространственной структуры потока.

В данной работе, в развитие предшествующих работ авторов [1–3], исследуется трехмерная структура закрученного потока в лаборатор-

ной модели перспективной вихревой топки с распределенным вводом воздушных струй (размер $400 \times 1200 \times 300$ mm). Наличие в вихревой топке рассредоточенных по периметру (условной окружности камеры горения) горелочных струй, ориентированных в противоположных направлениях, обеспечивает гибкость управления структурой течения и режимными параметрами, а вращение потока способствует повышению полноты выгорания топлива.

Методика проведения экспериментальных исследований соответствует работе [1]. Измерения поля скорости закрученного течения в модели вихревой топки проведены на основе метода лазерной доплеровской анемометрии. Для диагностики потока использовался 3D полупроводниковый лазерный доплеровский анемометр ЛАД-056 (разработан в ИТ СО РАН), состоящий из двух 2D приборов ЛАД-05 и ЛАД-06 [1,4] с взаимно ортогонально поляризованными лазерными лучами. Каждый из приборов одновременно принимает рассеянный свет только от своего источника излучения за счет поляризационной фильтрации. Восстановление 3D вектора скорости обеспечивается сведением в одну точку измерительных зон приборов, размещенных под известным углом друг к другу. При этом дополнительно обеспечивается возможность верификации компоненты вектора скорости, перпендикулярной плоскости расположения приборов. Компоненты вектора скорости, лежащие в плоскости расположения приборов, восстанавливаются из геометрии лазерных лучей. Фокусное расстояние выходных объективов 0.5 m, диаметр лазерных лучей в измерительной зоне $50 \mu\text{m}$, размер измерительной зоны $50 \times 50 \times 500 \mu\text{m}$, длины волн лазерного излучения 655 и 684 nm (красный свет) для ЛАД-05 и ЛАД-06 соответственно. Максимальная частота коммутации измерительных каналов 300 kHz, однако пропускная способность канала передачи информации между процессором прибора и ЭВМ ограничивает возможности прибора по частоте измерений до 3 kHz. Эксперименты выполнены при числе Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^5$ (рассчитанном по диаметру вихревой топки 300 mm) в центральном объеме камеры сгорания ($70 \times 150 \times 150$ mm) в узлах сетки с пространственным шагом 5 mm (по всем направлениям). Входные скорости на срезе каждого сопла (размер сопла 40×50 mm) были одинаковыми и задавались равными 15 m/s. Таким образом, суммарный объемный расход воздуха через все 4 сопла составлял $432 \text{ m}^3/\text{h}$. Угол наклона верхних сопел к горизонту 15° .

Для синтезированных компонент скорости, в связи с использованием проекций от измеренных компонент, в погрешность измерений добавляется множитель $1/\sin \alpha$ и $1/\cos \alpha$ для z - и x -компонент скорости соответственно (α — угол между оптической осью измерительных блоков и нормалью к плоскости измерения). Поскольку угол α мал, то $\cos \alpha \approx 1$ и для синтезированной x -компоненты не требуется увеличение количества измерений в точке. Однако для z -компоненты используется множитель $1/\sin \alpha$, т.к. $V_z = -(V_1 + V_2)/2 \sin \alpha$ (V_1 и V_2 — скорости, полученные двумя измерительными блоками). Для фиксированного угла $\alpha = 9^\circ$, множитель $1/\sin \alpha \approx 6$. Соответственно для уменьшения среднеквадратичного отклонения в 6 раз требуется увеличение количества измерений в 6^2 раз. Поскольку все три компонента ортогональны, то погрешность для модуля скорости есть сумма погрешностей всех трех компонент. В экспериментах концентрация трассеров (частиц жидкости на основе глицерина) позволяла измерительной системе регистрировать до 500 частиц в секунду, при этом в каждой точке измерение длилось 20 с. Проведенная оценка (по аналогии с работами [1,5]) показала, что погрешность измерения средней скорости в каждой измерительной точке не превышала 10%.

В применяемой для численного исследования физико-математической модели предполагалось, что течение в изучаемой изотермической модели вихревой топки является стационарным, дозвуковым (несжимаемым), турбулентным и имеет существенно пространственный сложный характер. Аэродинамика такого течения определяется осредненными по Рейнольдсу уравнениями неразрывности и количества движения, для замыкания которых на уровне вторых моментов пульсаций использовалась дифференциальная модель переноса рейнольдсовых напряжений [6], позволяющая учесть неизотропность турбулентного поля и тем самым повысить точность моделирования турбулентного поля в трехмерном закрученном потоке [7]. Построенная для конечнообъемной дискретизации уравнений расчетная неструктурированная сетка состоит из 351 784 гексаэдрических ячеек. Для аппроксимации конвективных членов уравнений количества движения использовалась неявная схема второго порядка точности против потока. Для расщепления нелинейной связи между компонентами скорости и давлением применялся высокоэффективный алгоритм PISO [8]. Заданные в численном моделировании входные условия соответствовали экспериментам.

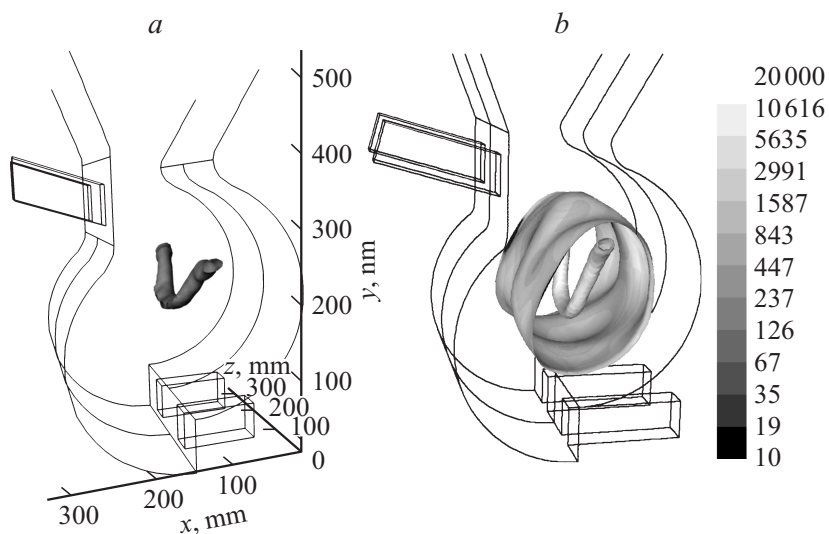


Рис. 1. Изоповерхность динамического давления $p_{dyn} = 1$ Па в вихревой камере горения (эксперимент) (а). Распределение Q -критерия (s^{-2}) на поверхностях уровня $p_0 = 0$ Па и $p_0 = -29$ Па (численное моделирование) (б).

Для идентификации вихревых структур на основе полученных результатов исследований трехмерного поля средней по времени скорости потока применялись критерии λ_2 и Q [9,10], а также критерий „минимума полного давления“ [11]: $p_0 = p - p_{atm} + p_{dyn}$ (где p — статическое давление, p_{atm} — атмосферное давление, $p_{dyn} = \rho \mathbf{u}^2 / 2$ — динамическое давление). λ_2 — второе наибольшее отрицательное собственное число тензора $\mathbf{S}^2 + \mathbf{\Omega}^2$, где \mathbf{S} и $\mathbf{\Omega}$ — симметричная и антисимметричная части тензора градиента скорости $\nabla \mathbf{u}$ ($S_{i,j} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i})$, $\Omega_{i,j} = 1/2(u_{i,j} - u_{j,i})$, здесь для компонент тензора градиента скорости используется общепринятое обозначение $u_{i,j} \equiv \partial u_i / \partial x_j$). Согласно [9], условие $\lambda_2 < 0$ может служить критерием вихря в данной точке потока. Критерий λ_2 успешно применяется для анализа закрученных течений в моделях промышленных установок, например в вихревых горелках [12]. Q — второй инвариант характеристического уравнения $\det(\nabla \mathbf{u} - \sigma I) = 0$, $Q = -1/2 u_{i,j} u_{j,i}$. Критерий Q отражает баланс между

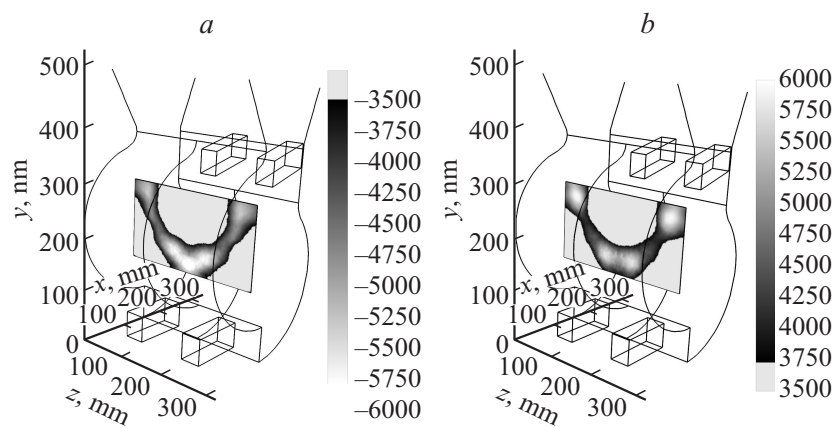


Рис. 2. Результаты экспериментов (сечение ZOY $x = 115$ mm): *a* — распределение критерия $\lambda_2(s^{-2})$, *b* — распределение Q -критерия (s^{-2}).

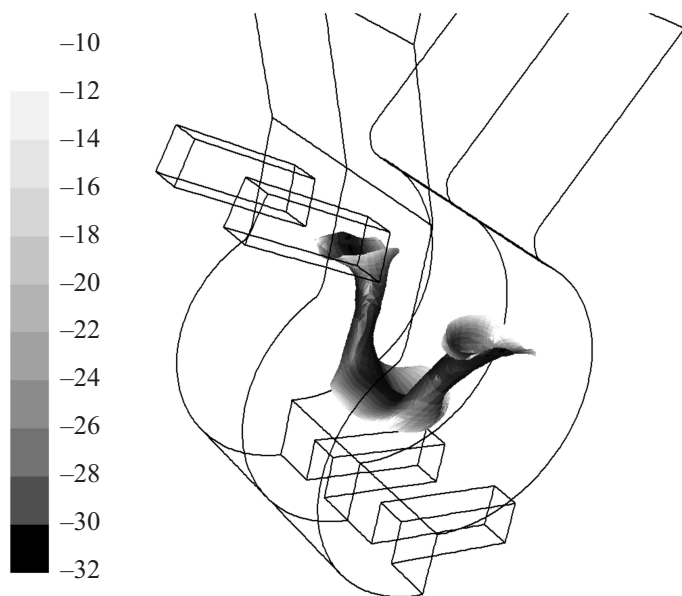


Рис. 3. Распределение полного давления p_0 (Pa) на поверхности уровня $Q = 7000 s^{-2}$ (численное моделирование).

интенсивностью вращения и интенсивностью деформации в какой-либо локальной точке течения $Q \equiv 1/2(\Omega^2 - S^2)$. Согласно работе [10], области $Q > 0$ идентифицируют присутствие вихревого движения. Также можно отметить, что в [11] на основе анализа корреляции между критериями Q и „минимума давления“ для ряда типичных течений делается вывод о том, что выполнение условия „минимума давления“ в той или иной области потока может быть использовано для дополнительной валидации при построении изоповерхностей Q -критерия.

Критерии λ_2 и Q рассчитываются на основе компонент тензора градиента скорости, поэтому с целью их получения при обработке данных необходима информация о производных всех трех компонент вектора средней скорости по трем направлениям. При расчете производных по экспериментальным данным использовалась центрально-разностная схема. Тестирование алгоритма обработки экспериментальных данных по критериям λ_2 и Q проводилось на основе известных аналитических решений для вихря Бюргерса [13]. При обработке экспериментальных данных предполагалось, что статическое давление в центральной области вихревого потока изменяется слабо и минимум p_0 определяется динамическим давлением. На рис. 1, *a* представлена изоповерхность локального скоростного напора, которая визуализирует вихревое ядро потока, имеющее характерную V-образную форму. Обработка результатов численного моделирования с использованием критерия „минимума полного давления“ и Q -критерия дает качественно аналогичный результат: на рис. 1, *b* показана V-образная структура ($p_0 = -29$ Па), расположенная внутри более широкой „трубки“ — изоповерхности $p_0 = 0$ Па. Распределения критериев λ_2 и Q (см. рис. 2) в поперечном сечении модели вихревой топки (вблизи оси вихря) также демонстрируют выраженную V-образную структуру, при этом наблюдается согласование полученных результатов обработки с использованием разных методик. Визуализация на рис. 3 представляет собой суперпозицию двух критериев (Q и „минимума полного давления“): распределение p_0 на изоповерхности $Q = 7000 \text{ s}^{-2}$. Анализ полученных результатов указывает на качественное соответствие V-образной структуры вихревого ядра, выявленной в эксперименте и в численном моделировании.

Для проведения расчетов использовался CFD-пакет FLUENT, установленный на суперкомпьютерном кластере НКС-30Т (ССКЦ СО РАН, г. Новосибирск). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00137).

Список литературы

- [1] Ануфриев И.С., Аникин Ю.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 24. С. 39–45.
- [2] Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 10. С. 36–43.
- [3] Anufriev I.S., Kopyev E.P., Krasinsky D.V., Salomatov V.V., Shadrin E.Yu., Sharupov O.V. // Energy and Power Engineering. 2013. V. 5. P. 306–310.
- [4] Meledin V., Anikin Yu., Bakakin G., Glavniy V., Dvoinishnikov S., Kulikov D., Naumov I., Okulov V., Pavlov V., Rakhmanov V., Sadbakov O., Ilyin S., Mostovskiy N., Pylev I. // Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics and Unsteady Aerodynamics. Ed. by V.A. Skibin, V.E. Saren, N.M. Savin, S.M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2006. P. 446–457.
- [5] Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 2. С. 266–276.
- [6] Launder B.E., Reece G.J., Rodi W. // J. Fluid Mech. 1975. V. 68. N 3. P. 537–566.
- [7] Hanjalic K., Launder B. Modelling Turbulence in Engineering and the Environment: Second-Moment Routes to Closure. Cambridge University Press, 2011. P. 80–83.
- [8] Issa R.I. // J. Comput. Phys. 1986. V. 62. N 1. P. 40–65.
- [9] Jeong J., Hussain F. // J. Fluid Mech. 1995. V. 285. P. 69–94.
- [10] Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P. // Center For Turbulence Research. Proceedings of the Summer Program. 1988. P. 193–208.
- [11] Dubief Y., Delcayre F. // Turbulence. 2000. V. 1. P. 22.
- [12] Cala C.E., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. // Exp. Fluids. 2006. V. 40. N 2. P. 267–276.
- [13] Chakraborty P., Balachandar S., Adrian R.J. // J. Fluid Mech. 2005. V. 535. P. 189–214.