УДК 536.464

НЕУСТОЙЧИВЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ВИХРЕВОМ УСТРОЙСТВЕ

Назаров А.В., Литвинов И.В.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-08-31460 «мол_а».

АННОТАЦИЯ

В работе изложены результаты экспериментального исследования процесса горения пропано-воздушной смеси в вихревом горелочном устройстве тангенциального типа. Эксперименты включали в себя исследование неустойчивого режима горения предварительно перемешанной топливовоздушной смеси на выходе из сопла вихревой камеры диаметром 30 мм при низкой мощности горелочного устройства (10% от номинальной мощности). В работе приведены распределения средних и пульсационных компонент скорости закрученного потока, а также спектры и кросскорреляционные функции пульсаций давления на выходе из сопла горелочного устройства. Показано, что возможно возникновение нескольких режимов горения, различающихся по структуре. Обнаружено, что в диапазоне чисел Рейнольдса $Re \approx 9300\text{-}19400$ при низком коэффициенте стехиометрии $\varphi \approx 0{,}6$ возникает режим с сильными пульсациями давления в случае реагирующего потока, который вызван термоакустическими осцилляциями и не связан с образованием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ).

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день на тепловые электростанции приходится 68% от общего объема произведенной в России электроэнергии. При этом образование вредных продуктов реакции горения остается основной проблемой данной области. Одним из основных компонентов выхлопного газа являются пары оксида азота NO_x, которые образуются при высоких температурах. Обедненное горение перемешанных газообразных топлив позволяет снизить уровень NO_x-загрязнений при низких температурах сгорания [1].

Основное преимущество обеднённого горения заключается в том, что газообразное топливо полностью вступает в реакцию с окислителем. Это обеспечивается высоким расходом потока воздуха, вследствие чего понижается температура горения [2]. Уменьшение температуры горения не влияет на эффективность устройства, так как продукты сгорания охлаждаются быстрее, чем в случае стехиометрического пламени, таким образом корпус горелки рассеивает подводимое тепло. Хорошее смешение компонентов позволяет исключить образование зон воспламенений с повышенным значением топливовоздушного отношения. При этом развитие вихревых устройств позволяет организовать процесс сгорания обеднённых смесей в широком диапазоне мощностей [3].

Главным недостатком использования обеднённой смеси в вихревых горелочных устройствах является высокая чувствительность пламени к различным неустойчивостям [4]. Здесь можно выделить два типа неустойчивости: прецессию вихревого ядра (ПВЯ), имеющую гидродинамическую природу, а также термоакустические колебания, вызванные взаимодействием потока с акустическими волнами внутри вихревого устройства. Эти типы неустойчивости генерируют сильные пульсации в потоке, что может привести к поломке горелочного устройства. Таким образом, чтобы увеличить срок службы и эффективность устройства, необходимо тщательно изучать природу возникающих пульсаций и уметь их предсказывать.

Цель данной работы заключается в поиске нерасчетных режимов горения в тангенциальной вихревой камере при низкой мощности (10% от номинальной), при которых возникают нежелательные эффекты, такие как прецессия вихревого ядра, проскок и срыв пламени [5].

© Назаров А.В., Литвинов И.В.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовалось тангенциальное горелочное устройство, аналогичное описанному в [3], но выполненное из дюрали и нержавеющей стали. Процесс горения происходил на выходе из сопла камеры диаметром D=30 мм и конструктивным параметром крутки S=1.4, определенным в работе [6]. В качестве безразмерных определяющих параметров использовались число Рейнольдса, построенное по расходу $Q_{воздух}$,

$$Re = \frac{4Q_{воздух}}{\pi D \nu_{воздух}},$$

вязкость воздуха $\upsilon_{воздух}$ и коэффициент стехиометрии (избытка топлива) φ, характеризующий отношение объемных расходов пропана и воздуха от стехиометрической смеси и имеющий следующую зависимость от расходов воздуха $Q_{воздух}$ и пропана $Q_{пропан}$:

$$\varphi = 24{,}13\frac{Q_{пропан}}{Q_{воздух}}$$

Подача воздуха осуществлялась с помощью воздуходувки. Расход воздуха измерялся ультразвуковым расходомером «ИРВИС-Ультра РС-4» и регулировался частотным преобразователем «Danfoss FC-51». Расход по пропану измерялся и регулировался калиброванными ротаметрами фирмы «Aalborg». Для измерения профилей скорости потока за выходом из сопла использовалась система ЛДА (лазерно-допплеровский анемометр) «ЛАД 06-и». В качестве трассеров скорости применялись частицы оксида алюминия (средний диметр 1-2 мкм). В каждой измерительной точке набиралась статистика не менее 2.5 тысяч значений скорости. Для измерения пульсаций давления использовались акустические датчики, как в работе [3], представляющие собой измерительные микрофоны «Behringer ECM8000» и отборники давления - тонкие трубки, надвинутые на головку микрофона. Использование отборников позволило произвести измерения пульсаций давления в локальных точках, не внося существенных возмущений в исследуемое течение. С другой стороны, в условиях горения, это позволило отдалить чувствительную часть микрофона от области высоких температур. Сигналы с акустических датчиков оцифровывались с частотой 5 кГц и подвергались Фурье-анализу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены две компоненты осредненной скорости потока и среднеквадратичного отклонения (СКО) для трех выделенных режимов: V-тип горения (1), реализующийся при расчетных показаниях мощности горелки; режим акустического резонанса (2) и изотермический режим – без горения (3).

В случаях (1) и (2) можно выделить три различные области потока, имеющие характерные особенности. Область I включает в себя центральное возвратное течение и заканчивается за пограничным слоем возвратного течения; область II включает в себя зону, характеризующуюся высокими скоростями потока; область III включает в себя пограничный слой потока вместе с окружающим воздухом.

В случае (1) образуется широкая область I внутри V-образного фронта пламени, относительная ширина которого составляет 0,6D. Область II находится на границе с пограничными слоями областей I и III от 0,3D до 0,46D, что видно по высоким пульсациям скоростей, и содержит “холодную” топливовоздушную смесь, которая воспламеняется выше по потоку на высоте ≈D. За областью высоких скоростей находится область III, характерная скорость потока в которой идентична скорости изотермического потока. Граница между фронтом пламени области I и неразогретой смесью области II также выделяется по высоким значениям пульсаций скорости (рис. 1).

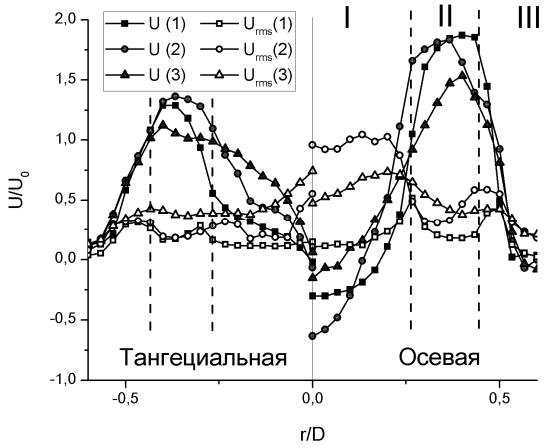

Рис. 1 Распределение средних и СКО двух компонент скорости на высоте 3 мм от сопла.

Режим (2) представляет собой акустическое пламя, генерирующее сильный звуковой тон. В области I зона возвратного течения у́же и интенсивнее в отличие от V-образного течения. Ширина области I составляет 0,52D. В этой области наблюдается резкое повышение пульсаций скорости, как на границе, так и внутри. Такая картина течения также характерна для случая изотермического потока (3), и можно

ожидать появление ПВЯ в этой области. Область II находится на расстоянии от 0,26D до 0,4D от центра сопла, ее воспламенение происходит на высоте 0.5D. В области III скорость потока идентична изотермическому случаю.

На рисунке 2 представлены распределения скоростей и их среднеквадратичные отклонения на высоте D. Здесь также можно выделить три области, имеющие характерные особенности. Область I является областью с центральным возвратным течением и заканчивается за пограничным слоем возвратного течения; область II характеризуется высокими скоростями потока; область III включает в себя пограничный слой потока вместе с окружающим воздухом.

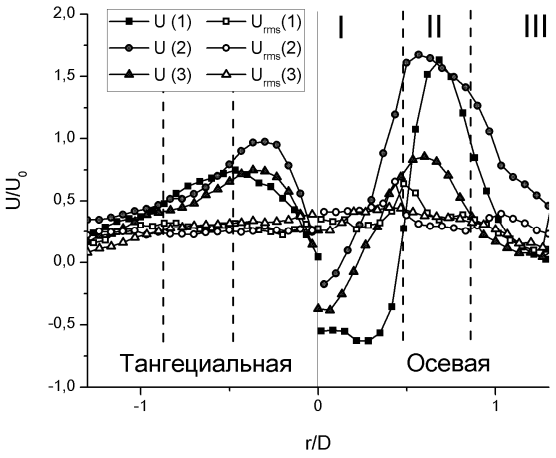

Рис. 2 Распределение средних и СКО двух компонент скорости на высоте D от сопла.

В случае (1) V-образного пламени область I выражена сильнее, чем на высоте 3 мм. Ширина области I составляет 1,2D, а на расстоянии 0,3D имеет особенность. Эта особенность связана с тем, что область возвратного течения имеет V-образный вид фронта пламени в пограничном слое. Область II находится от 0,6D до 0,8D и на данной высоте поток ещё не вступает в реакцию горения, однако скорость потока увеличивается из-за разогрева смеси вблизи пограничного слоя области I. Скорость потока в области III также оказалась выше из-за увеличения скорости потока в области II.

В случае (2) ширина области I составила 0,96D. Зона возвратного течения уменьшилась за счет увеличения пограничного слоя фронта пламени. Область II слегка сместилась и находится на расстоянии от 0,48D до 0,83D от центра сопла. Границы между областями II и III размыты. Это связано с тем, что образовался второй фронт пламени в пограничном слое области III, из холодной смеси области II и окружающего воздуха. На графике осевой скорости область III внесла усиление к существующему пику из области II, и на границе пограничного слоя и окружающего воздуха наблюдается резкое повышение пульсаций скорости, связанное с близостью границы второго фронта пламени.

В изотермическом случае ширина области I составила до 0,9D в диаметре. Пик скорости области II сместился с 0,4D до 0,6D от центра сопла.

Для измерения амплитудно-частотных характеристик пламени использовалась пара акустических датчиков, помещенных диаметрально друг другу на срезе сопла. Известно, что в случае изотермического потока (3) частота основной гармоники в спектре пульсаций давления или частота ПВЯ линейно возрастает при увеличении расхода воздуха [3].

В присутствии пламени можно выделить три характерных вида спектров пульсации давления (рис. 3). Первый случай представляет собой V-образное пламя с высокой устойчивостью в широких пределах Re. Второй случай, являющийся переходным, свидетельствует о смене режима. Пламя вызывает сильные звуковые колебания, интенсивность которых выше случая изотермического потока. Третий случай возникает после проскока пламени внутрь горелочного устройства. Данный режим является крайне нежелательным, так как вызывает сильный разогрев дюралевого корпуса горелки. Четвертая спектральная кривая представляет собой изотермический случай.

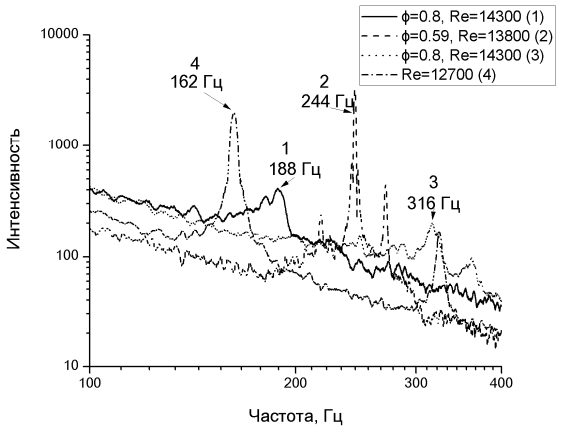

Рис. 3 Спектр пульсаций давления.

Кросскорреляционный анализ между сигналами с двух акустических датчиков показал, что причины пульсаций давления в описанных ранее случаях различны (рис. 4). В случае изотермического течения сигналы отстают друг от друга по времени на половину периода ПВЯ, что свидетельствует о присутствии эффекта ПВЯ на выходе из сопла. Для 1-го и 3-го случая пульсации были незначительны.

В случае акустического пламени (2) пульсации ярко выражены и сигналы приходят на микрофоны синфазно. Изменение положения микрофонов в этом случае никак не сказывается на характере кросскорреляционных кривых.

Второй случай является наиболее интересным для изучения, так как пламя вызывает довольно сильный звуковой тон, который не связан с образованием ПВЯ, к тому же в этом режиме усиливается теплообмен со стенками, возникает проскок и срыв пламени. Режим наблюдается в довольно ограниченном диапазоне, при 9300 < Re <18300 и φ ≈ 0,6 для сопла 30 мм и обычно является переходным между V-образным пламенем и горением внутри закручивающего устройства горелки.

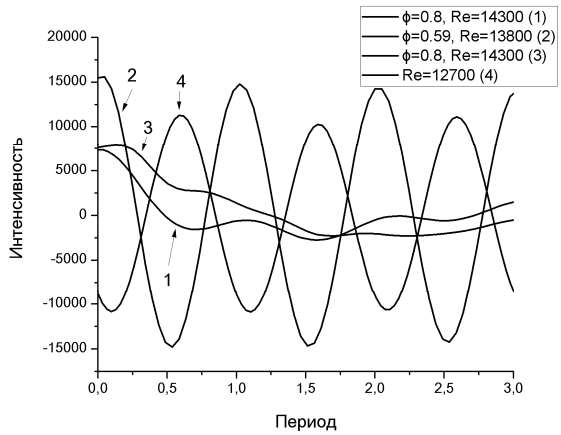

Рис. 4 Кросскорреляционная функция пульсаций давления с двух акустических датчиков при различных режимах горения.

На рисунке 5 приведены спектры пульсаций давления для режимов с акустическим резонансом при варьировании Re. Как видно по спектральным кривым, режимы ярко выраженного резонанса лежат в пределах 11000 < Re < 15800, а крайние режимы уже схожи с режимами V-образного пламени (1) и горения внутри устройства (5). В литературе такие режимы связаны с термоакустическим вибрационным горением и могут объясняться множеством факторов, таких как конструктивные особенности горелки, её материала или особенности потока [2].

Смещение крайних пиков от частоты резонанса может объясняться формой области возвратного течения. Для меньших расходов форма области возвратного течения схожа с V-образным пламенем, а для больших расходов смещается вглубь сопла (рис. 1, случаи (1) и (2)).

Еще одним доказательством акустической природы максимального пика в спектре пульсаций давления стали эксперименты на сопле с другим диаметром (D=40мм, S=1.8, рис. 6). Частоты акустического резонанса для случаев (1) и (2) относятся как линейные размеры сопел. Также у основных пиков имеются характерные пики-сателлиты, которые отстают на равноудаленные дистанции от основных пиков. Для сопла 30 мм это расстояние составляет около 27 Гц, для сопла 40 мм – 39 Гц. Появление пиков-сателлитов скорее всего вызвано биением частот вблизи резонанса.

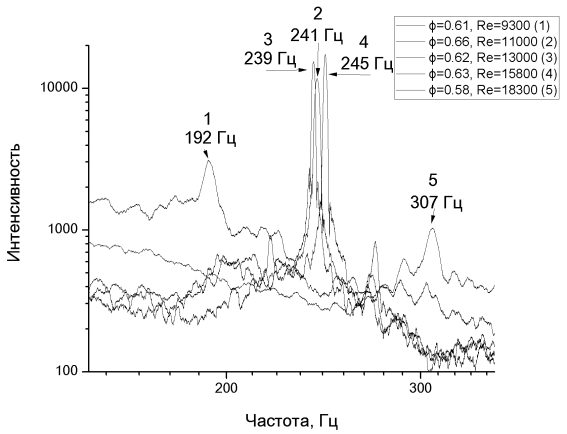

Рис. 5 Спектры пульсаций давления при различных Re для режима термоакустического резонанса.

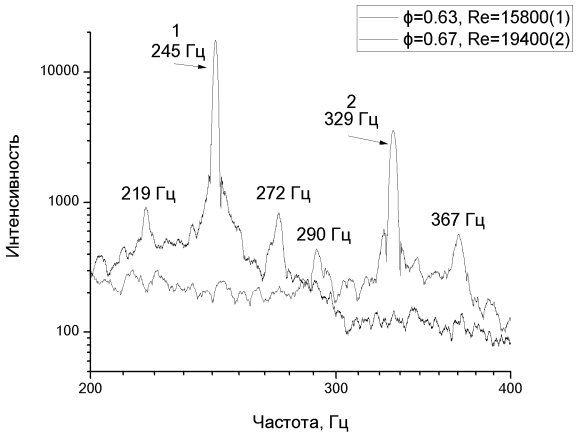

Рис. 6 Спектры пульсаций давления для режима акустического резонанса: (1) – D=30мм, (2) –D=40 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования показали, что при нерасчетных режимах работы горелочного устройства (10% от номинальной мощности) может возникать, как устойчивый тип пламени (V-образный), так и неустойчивый режим с термоакустическим резонансом. Было показано, что:

- В случае V-образного пламени существенно подавляются эффект ПВЯ и термоакустические осцилляции;

- Частота термоакустических осцилляций не зависит от Re и определяется линейными размерами сопла, тем не менее область их существования лежит в узком диапазоне чисел Re;
- Природа колебаний акустического пламени не связана с образованием эффекта ПВЯ, как в случае изотермического потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhengqi Li, Song Li, Qunyi Zhu, Xiqian Zhang, Guipeng Li, Yong Liu, Zhichao Chen and Jiangquan Wu (2014) "Effects of particle concentration variation in the primary air duct on combustion characteristics and NOx emissions in a 0.5-MW test facility with pulverized coal swirl burners", *Applied Thermal Engineering*, Vol.73, no.1, pp. 859 – 868.
2. Pożarlik, A. (2010), "Vibro-acouustical instabilities induced by combustion dynamics in gas turbine combustors", PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
3. Syred N. (2006) "A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.32, pp. 93 – 161.
4. Moeck J.P., Jean-François Bourgouin, Daniel Durox, Thierry Schuller and Sébastien Candel (2012) "Nonlinear interaction between a precessing vortex core and acoustic oscillations in a turbulent swirling flame", Combustion and Flame, Vol.159, pp. 2650 – 2668.
5. Litvinov I.V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V. and Hanjalic K. (2013) "Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.42, pp. 251 – 264.
6. Gupta A.K., Lilley D.J. and Syred N. (1984), Swirl flows, Abacus Press, Tunbridge Wells, UK.

© Назаров А.В., Литвинов И.В.