УДК 532.525.2

Активное управление потоком в модельной камере сгорания при помощи дополнительной инжекции газа^{*}

А.Д. Кундашкин^{1,2}, Е.В. Палкин^{1,2}, М.Ю. Хребтов^{1,2}, Р.И. Мулляджанов^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск ²Новосибирский государственный университет

E-mail: alexkundashkin@gmail.com

При помощи численного моделирования методом крупных вихрей исследуются изотермические закрученные режимы течения газа в модельной камере сгорания при числе Рейнольдса Re = 15000. Идентифицирована когерентная вихревая структура — прецессирующее вихревое ядро, которое вносит существенный вклад в пульсации давления с максимумом внутри модельного фронтового устройства. В месте расположения наибольшей амплитуды пульсаций предлагается осуществлять вдув газа для подавления этой когерентной структуры. Исследованы три режима с дополнительной инжекцией амплитудой 1–5% от среднерасходной скорости. Анализ мгновенных, средних и спектральных характеристик показал, что предложенный способ управления позволяет подавить амплитуду низкочастотных колебаний более чем в два раза.

Ключевые слова: метод крупных вихрей, прецессирующее вихревое ядро, управление потоком.

В последние годы активно развиваются различные концепции двигателей внутреннего сгорания, позволяющих минимизировать выбросы вредных веществ в атмосферу. Это связано с тем, что экологические требования к газотурбинным двигателям и наземным энергетическим установкам постоянно ужесточаются, вынуждая внедрять новые технологии эффективного и малоэмиссионного сжигания топлива. Одной из таких технологий является «dry-lean combustion», основанная на сжигании топливовоздушной смеси со значительным избытком воздуха. С практической точки зрения внедрение данной технологии в значительной степени ограничено возникновением нестационарных режимов, которые, усиливаясь, могут приводить к вибрационным режимам горения. Это приводит к необходимости изучать различные режимы течения в данных конфигурациях.

Проведение экспериментальных исследований в этой области является, как правило, весьма дорогостоящим и технически сложным. В связи с этим моделирование режимов

^{*} Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-79-10246.

[©] Кундашкин А.Д., Палкин Е.В., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И., 2022

течения газовых смесей в настоящее время — один из важнейших способов изучения вихревой структуры потока в подобных устройствах. Камеры сгорания являются сложными системами. Основные факторы, влияющие на их эффективность: гидродинамическая стабильность потока, подача топлива и его смешение, химические реакции, тепловыделение и колебания давления [1, 2]. Фронтовые устройства камер сгорания создаются таким образом, чтобы они закручивали поток для повышения стабильности пламени [2, 3]. Главная проблема таких конструкций состоит в том, что в рециркуляционной зоне на выходе из фронтового устройства имеется энергонесущая когерентная структура прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), дестабилизирующее пламя. Сильные колебания могут ограничивать условия для безопасной и эффективной работы [3]. В частности, гидродинамическая и термоакустическая неустойчивость в камерах сгорания может привести к повреждению устройства. Методы управления потоком необходимы для подавления когерентных структур [4 – 6].

В связи с этим представляет большой практический интерес изучение различных способов управления и создание новых способов подавления колебаний в турбулентных потоках. В настоящей работе рассмотрена камера сгорания с объемным расходом 398 л/мин в основном потоке. Для подавления когерентных структур предложен метод вдува дополнительного топлива и исследованы три режима с расходами инжекции 3,98, 11,94 и 19,9 л/мин. Данный метод подавления находит применение и при изучении реагирующих течений.

В предлагаемой работе методом крупных вихрей исследуется модельная камера сгорания с фронтовым устройством Turbomeca [7], схема которой приведена на рис. 1. Моделирование аэродинамики потока осуществляется с помощью решения уравнений Навье– Стокса вычислительным алгоритмом pimpleFoam в открытом программном пакете OpenFOAM [8], дискретизация по времени проводится с использованием метода конечных объемов. В расчетном алгоритме используется метод крупных вихрей, причем подсеточная турбулентная вязкость моделируется с помощью модели Смагоринского [9], основанной на гипотезе турбулентной вязкости Буссинеска [10]. Сетка в задаче содержит 13,4×10⁶ ячеек. В предыдущих работах с данной геометрией горелки [11–13] были проведены верификация и валидация результатов численного моделирования путем последовательного сгущения вычислительной сетки и сравнения с экспериментальными данными. В результате анализа была показана хорошая сходимость решения с экспериментальными данными для различных режимов течения (включая реагирующий), что подтверждает правильность выбранной модели.

На рис. 2 приведена изоповерхность давления, которая визуализирует пространственное распределение ПВЯ. Видно, что спиральная вихревая структура берет свое начало внутри фронтового устройства около кромки внутренней стенки. Представлено также



Рис. 1. Конструкция камеры. 1 — выход, 2 — закрученная струя, 3 — место дополнительной инжекции, 4 — основные каналы.

Теплофизика и аэромеханика, 2022, том 29, № 5



Точки 1, 3 — места записи сигнала давления; 2 — место, по разнице с которым строится спектр; U_v — продольная компонента скорости; P_f — пульсации давления в области.

пространственное распределение корня из среднеквадратичных (разрешаемых) пульсаций давления (далее — просто пульсации), которое указывает на максимум в области порождения ПВЯ. В настоящей работе предлагается исследовать стратегию подавления этой когерентной структуры при помощи постоянной инжекции дополнительного газа в области наибольших пульсаций давления. Таким образом, для дальнейших расчетов и анализа выбрана область, показанная на рис. 3. На нем видно векторное поле дополнительной инжекции.



Рис. 3. Место вдува дополнительного топлива (амплитуды показаны стрелками). *P_f* — пульсации давления в области.



Рис. 4. Сравнение амплитуд пульсаций U_p (левые части фрагментов) и модуля мгновенных полей скорости U_{magn} (правые части) для всех рассматриваемых режимов: a — без инжекции, b-d — с инжекцией 1 (b), 3 (c) и 5 (d) %.

Расчеты выполнялись для различной дополнительной инжекции амплитудой 1, 3 и 5 % от среднерасходной скорости в основном канале. Проведено сравнение значения амплитуды корня из среднеквадратичных (разрешаемых) пульсаций и модуля мгновенных полей скорости для режимов без инжекции и с инжекцией 1, 3 и 5 % (рис. 4). Для сравнения полей скорости было проанализировано отношение подсеточной турбулентной вязкости к вязкости газа. В зоне дополнительной инжекции, как и в области рециркуляции, это отношение не превышает 5, следовательно, разрешение выполненного



расчета близко к результатам прямого численного моделирования. Следует отметить, что в случае дополнительной инжекции наблюдается уменьшение амплитуды пульсаций скорости, однако более существенное влияние проявляется при анализе сигнала давления.

Для всех режимов течения были проанализированы поля давления и его спектральные характеристики. На рис. 5 представлена разность минимального давления в зоне рециркуляции (см. рис. 2, точка 2) и значений давления, усредненных по четырем точкам (см. рис. 2, точки 1, 3 и две точки за и перед точкой 2), в которых осуществлялась запись,



Рис. 6. Изоповерхности давления для режимов течения: а — без инжекции, b − d — с инжекцией 1 (b), 3 (c) и 5 (d) %; U_{magn} — модуль скорости на изобарной поверхности.

нормированные на плотность и квадрат среднерасходной скорости, а также их спектры. Точки для фиксации сигнала давления были выбраны на одной окружности в зоне рециркуляции. Между ними имеется угол 90° в азимутальном направлении, точки 1 и 3 указаны на рис. 2 явно, другие две точки находятся за и перед точкой 2.

Показано, что инжекция позволяет существенно уменьшить низкочастотные колебания, при этом наиболее эффективное подавление наблюдается при инжекции 3 %. На рис. 6. приведены изоповерхности давления для всех четырех режимов, которые демонстрируют эффективность предложенного активного способа управления закрученным потоком.

В настоящей работе при помощи численного моделирования методом крупных вихрей были исследованы изотермические закрученные режимы течения газа в модельной камере сгорания при числе Рейнольдса Re = 15000. Обнаружена когерентная структура прецессирующее вихревое ядро, вносящее существенный вклад в пульсации давления. Максимум пульсаций наблюдается внутри модельного устройства. В месте нахождения наибольшей амплитуды предложено осуществлять вдув топлива с целью подавления когерентной структуры. Исследованы три режима дополнительной инжекции амплитудой 1, 3 и 5% от среднерасходной скорости. Проведен анализ мгновенных, средних полей скорости для всех режимов вдува. Показано различное влияние объема инжектируемого потока на подавление низкочастотных когерентных структур. Выполнено сравнение мгновенных скоростей в области и их пульсаций. Показано, что дополнительная инжекция позволяет уменьшить пульсации в зоне рециркуляции. Получены сигналы изменения давления в четырех точках, на основе которых построены усредненные спектры, демонстрирующие наличие низкочастотных колебаний. Отмечено, что при вдуве 1 %о от среднерасходной скорости в основном потоке подавление неэффективно, однако уже при 3 и 5 % наблюдается подавление амплитуды низкочастотных колебаний давления в зоне рециркуляции более чем в два раза.

Список литературы

- Weber R., Dugué J. Combustion accelerated swirling flows in high confinements // Progress in Energy and Combust. Sci. 1992. Vol. 18, No. 4. P. 349–367.
- Straub D.L., Richards G.A. Effect of fuel nozzle configuration on premix combustion dynamics // ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 78644. 1998. Vol. Paper No. 98-GT-492 V003T06A044. 16 p.
- 3. Lieuwen T.C. Unsteady combustor physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. 515 p.
- 4. Syred N., Beer J.M. Combustion in swirling flows: a review // Combustion and Flame. 1974. Vol. 23, No. 2. P. 143–201.
- Correa S.M. Power generation and aeropropulsion gas turbines: From combustion science to combustion technology // Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1998. Vol. 27, No. 2. P. 1793–1807.
- Gad-el-Hak M. The taming of the shrew: why is it so difficult to control turbulence? // Active Flow Control. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 1–24.
- Janus B., Dreizler A., Janicka J. Experimental study on stabilization of lifted swirl flames in a model GT combustor // Flow Turbul. Combust. 2005. Vol. 75. P. 293–315.
- 8. OpenFOAM Home Page. 2004. Available online: http://www.openfoam.com.
- Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, No. 3. P. 99–164.
- 10. Boussinesq J. Essai sur la théorie des eaux courantes. Paris: Impr. Nationale, 1877. 64 p.
- 11. Palkin E.V., Hrebtov M.Y., Slastnaya D.A., Mullyadzhanov R.I., Vervisch L., Sharaborin D.K., Lobasov A.S., Dulin V.M. Influence of a central jet on isothermal and reacting swirling flow in a model combustion chamber // Energies. 2022. Vol. 15, No. 5. P. 1615-1–1615-16.
- Hrebtov M.Y., Palkin E.V., Mullyadzhanov R.I. Large-eddy simulation of a swirling flow in a model combustion chamber // J. of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1677, No. 1. P. 012012-1–012012-5.
- 13. Hrebtov M.Y., Palkin E.V., Slastnaya D.A., Mullyadzhanov R.I., Alekseenko S.V. Large-eddy simulation of a reacting swirling flow in a model combustion chamber // J. of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2119, No. 1. P. 012031-1–012031-4.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2022 г., после доработки — 3 июня 2022 г., принята к публикации 17 июня 2022 г.