УДК 536.46

## РЕАКЦИЯ ПЛАМЕНИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ТУРБОДВИГАТЕЛЕЙ

Ф. Х. Мангодех, А. М. Тахсини

Иранский научно-технологический университет, Тегеран, Иран E-mails: fatemeghavidel83@gmail.com, am\_tahsini@iust.ac.ir

Численно исследуется достоверность результатов испытаний при атмосферном давлении, в которых изучалась реакция пламени на изменение рабочего давления. Установлено, что при изменении атмосферного давления форма и реакция пламени значительно изменяются, поэтому результаты испытаний, проведенных при атмосферном давлении, не позволяют получить достоверную информацию об устойчивости процесса горения.

Ключевые слова: испытания при атмосферном давлении, камера сгорания, реакция пламени, численные методы, вихревое движение, турбомашина.

DOI: 10.15372/PMTF20220603

Введение. Если фазы возмущения скорости выделения энергии близки к фазам колебания давления, то может возникнуть связь между скоростью тепловыделения и акустическими колебаниями камеры сгорания, в результате чего процесс горения становится неустойчивым. Появление неустойчивости более вероятно при горении с предварительным смешиванием, используемым для повышения КПД и уменьшения выбросов загрязняющих веществ. Неустойчивость горения приводит к возникновению шумов и больших амплитуд колебаний, что может вызвать повреждение турбодвигателя. При моделировании этого сложного явления применяются различные подходы [1–6]. Результаты экспериментальных исследований используются при оценке математических моделей и позволяют более полно исследовать причины возникновения неустойчивости горения.

Камеры сгорания турбодвигателей работают при высоком давлении и большой температуре на их входе. Эксперименты, проводимые при таких условиях, являются сложными и дорогостоящими. Поэтому широко используются испытательные стенды, на которых проводятся эксперименты при атмосферном давлении. Результаты этих экспериментов используются при проектировании камер сгорания и изучении причин возникновения неустойчивости горения. Использование испытательных стендов низкого давления обусловлено сложностью разработки стендов высокого давления. Физико-химические характеристики камер сгорания таковы, что некоторые свойства потока газа в них не зависят от рабочего давления. Например, температура пламени практически не зависит от рабочего давления [7]. Поэтому некоторые результаты испытаний, проведенных при атмосферном давлении, могут быть достоверными. Во многих известных компаниях по производству турбодвигателей на ранних стадиях проектирования используются стенды низкого давления, несмотря на наличие испытательных установок высокого давления. В экспериментах при низком давлении массовый расход воздуха нормируется отношением фактического рабочего давления к необходимому давлению, поток воздуха поступает в камеру сгорания с теми же скоростью и температурой, какие имеют место при работе реального двигателя. Для этого воздух нагревается с помощью электронагревателя или другой соответствующей системы [8]. В экспериментах при низком давлении число Маха поддерживается постоянным и равным его значению в реальных условиях, а давление и число Рейнольдса уменьшаются. Несмотря на то что значения давления и числа Рейнольдса в камере сгорания меньше реальных значений, некоторые характеристики потока существенно не меняются, поэтому результаты экспериментов могут быть использованы при исследовании процесса горения [9].

Из анализа результатов экспериментов, проведенных при атмосферном давлении, следует, что полученное значение перепада давления является достоверным, но уровень оксидов азота ниже фактического [10]. В целом можно утверждать, что при проведении экспериментов при атмосферном давлении можно получить достоверную информацию о форме пламени, если в ходе эксперимента она не меняется [11]. В ряде экспериментов обнаружено влияние давления на форму пламени [12], однако зависимость формы пламени от давления, меньшего по сравнению с рабочим, изучена недостаточно.

В данной работе приведены результаты исследования влияния давления и его колебаний на форму пламени. Используемая в эксперименте камера сгорания представляет собой вихревую горелку. Такие горелки разрабатывались для уменьшения выброса загрязняющих веществ за счет использования предварительно смешанного пламени. В таких горелках входной вихрь создает тороидальный вихрь, который стабилизирует пламя и уменьшает его длину [13].

1. Основные уравнения и алгоритм численного решения. При моделировании горения используются уравнения трехмерного осесимметричного потока. Несмотря на то что в этих уравнениях искомые величины не зависят от окружной координаты, при моделировании необходимо учесть наличие вихря и момента количества движения. Для потока сжимаемой жидкости три уравнения движения, уравнение неразрывности, уравнение энергии и уравнение химической реакции веществ в дивергентной форме записываются следующим образом:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (F + F_v)}{\partial x} + \frac{\partial (G + G_v)}{\partial r} + \frac{G + G' + G_v + G'_v}{r} = S_T;$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho w \\ \rho m_j \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + p \\ \rho u v \\ \rho u w \\ \rho u m_j \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ \rho v v + p \\ \rho v w \\ \rho v m_j \end{bmatrix},$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xr} \\ -\tau_{xr} \\ -\tau_{xr} \\ -\tau_{xr} \\ -\tau_{xr} \\ -\rho D_{eff} m_{jx} \end{bmatrix}, \quad G_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{rx} \\ -\tau_{rr} \\ -\tau_{rr} \\ -\rho D_{eff} m_{jr} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

 $F_v$ 

G' =	$\begin{bmatrix} 0\\ 0\\ -\rho ww - p\\ \rho vw\\ 0\\ 0\\ 0 \end{bmatrix}$	,	$G'_v =$	$\begin{array}{c} 0\\ 0\\ \tau_{\theta\theta}\\ -\tau_{r\theta}\\ 0\\ 0\end{array}$	,	$S_T =$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_j \end{bmatrix}$	.
------	--	---	----------	---	---	---------	--	---

Здесь u, v, w — скорость потока в осевом, окружном и поперечном направлениях соответственно;  $\rho$  — плотность; e — удельная внутренняя энергия; h — удельная энтальпия;  $m_j$  — массовая доля j-го вещества; p — давление;  $D_{eff}$  — коэффициент массовой диффузии; t — время.

Горение смеси метана и воздуха в вихревой горелке моделируется с использованием многоступенчатой химической реакции Уэстбрука — Драйера при наличии в потоке пяти веществ. В таблице приведены параметры реакции Уэстбрука — Драйера (A — коэффициент в уравнении Аррениуса, E — энергия активации) [14].

Помимо уравнений (1), (2) для вычисления характеристик переноса применяется модель турбулентности Спаларта — Аллмараса [15]. Для численного моделирования используется созданная авторами данной работы программа, в которой для дискретизации дифференциальных уравнений применяется метод конечных объемов в сочетании с методом центрирования ячеек. В этом численном алгоритме вязкие члены обрабатываются с использованием центрированной схемы, а невязкие потоки рассчитываются с помощью программы AUSM<sup>+</sup> (advection upstream split method) [16]. После интегрирования по времени. Характеристики разработанной программы тестировались с помощью экспериментальных данных и результатов аналитических решений [17–22].

2. Результаты исследования и их обсуждение. Для исследования влияния рабочего давления на характеристики камеры сгорания и форму пламени, а также для оценки достоверности результатов испытаний, проведенных при атмосферном давлении, использовалась вихревая горелка на метановом топливе. Характеристики горелки исследовались в лаборатории горения Мюнхенского университета (Германия) [23, 24]. Камера сгорания состоит из двух соосных цилиндров. Поток воздуха, предварительно смешанный с метаном, поступает в меньший цилиндр (смесительную трубу) с угловой скоростью. В результате создается тороидальный вихрь, который поступает в больший цилиндр, стабилизируя пламя.

Несмотря на то что конструкция смесительной трубы в верхней части представляет собой трехмерное геометрическое сечение для создания закрученного входного потока, в случае если профиль скорости потока на входе в смесительную трубу известен, можно исследовать поток в осесимметричном приближении. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Температура входного потока составляла 600 K, осевая скорость — 48 м/с, окружная скорость — 56 м/с, коэффициент избытка топлива равен 0,5. Диаметр и длина смесительной трубы равны 6 и 10 см соответственно, диаметр и длина камеры сгорания — 18 и 20 см соответственно. Рабочее давление изменялось в диапазоне  $10^5 \div 15 \cdot 10^5$  Па.

Реакция	A, моль/(см <sup>3</sup> · c)	$E \cdot 10^{-3}$ , кал/моль	Порядок реакции
$CH_4 + 1,5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	$1,\!59\cdot 10^{13}$	47,8	$[CH_4]^{0,7}[O_2]^{0,8}$
$\rm CO+0,5O_2 \rightarrow \rm CO_2$	$3{,}98\cdot10^{14}$	40,7	$[CO][O_2]^{0,25}[H_2O]^{0,5}$
$\rm CO_2 \rightarrow \rm CO + 0.5O_2$	$5,00 \cdot 10^{8}$	40,7	$[CO_2]$

Параметры реакции Уэстбрука — Драйера



Рис. 1. Схема вихревой горелки [24]:

- 1 воздух, 2 метан (СН<sub>4</sub>), 3 смесительная труба, 4 камера сгорания,
- 5 генератор вихря; стрелки направления потоков



Рис. 2. Распределения осевой скорости на выходе из камеры сгорания (a) и температуры вдоль центральной оси  $(\delta)$ , вычисленные на сетках различного размера:

 $1-50\times40$  и  $100\times80,\,2-50\times70$  и  $200\times120,\,3-50\times100$  и  $250\times150$ 

При численном моделировании характеристик потока использовались структурированные сетки с числом ячеек 50 × 70 для смесительной трубы и 200 × 120 для камеры сгорания.

На рис. 2 приведены распределения осевой скорости на выходе из камеры сгорания и температуры вдоль центральной оси при рабочем давлении ( $T_{in}$  — температура на входе в камеру сгорания). Следует отметить, что использовалась сетка такого же размера, как и в работе [25].

Были вычислены характеристики потока и определена форма пламени при давлении  $p = 15 \cdot 10^5$  Па, которое является рабочим давлением в камерах сгорания турбодвигателей. Как и предполагалось, в камере сгорания в области, где находится пламя, образуется тороидальный вихрь. Изолинии температуры в потоке и линии тока приведены на рис. 3.



Рис. 3. Распределение температуры и линии тока в камере сгорания при рабочем давлении  $p=15\cdot 10^5~{\rm \Pi a}$ 



Рис. 4. Линии тока в горячем (*вверху*) и холодном (*внизу*) потоках при рабочем давлении в камере сгорания  $p = 15 \cdot 10^5$  Па



Рис. 5. Профили температуры на выходе при различных значениях рабочего давления:

 $\begin{array}{l} 1 - p = 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \ 2 - p = 1.5 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \\ 3 - p = 2 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \ 4 - p = 3 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \\ 5 - p = 4 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \ 6 - p = 5 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \\ 7 - p = 10 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a}, \ 8 - p = 15 \cdot 10^5 \ \Pi \mathrm{a} \end{array}$ 



Рис. 6



Рис. 6. Форма пламени и структура вихрей при различных значениях рабочего давления в камере сгорания:

 $a - p = 15 \cdot 10^5$  Па,  $\delta - p = 10 \cdot 10^5$  Па,  $e - p = 5 \cdot 10^5$  Па,  $e - p = 2 \cdot 10^5$  Па,  $\partial - p = 10^5$  Па Рис. 7. Форма пламени в различные моменты времени при наложении на рабочее давление  $p = 15 \cdot 10^5$  Па возмущений с периодом 1 мс:

a-t=3,92 мс, b-t=3,10 мс, b-t=2,30 мс, c-t=1,62 мс, d-t=0,86 мс, e-t=0,86 мс, e-t

Для того чтобы исследовать влияние горения на структуру потока и сравнить структуру холодного и горячего потоков, были вычислены характеристики горения в отсутствие каких-либо химических реакций. На рис. 4 показаны структуры горячего и холодного потоков. Тороидальный вихрь существует также в холодном потоке. Таким образом, горение не оказывает существенного влияния на структуру потока внутри камеры сгорания, но температура и плотность влияют на поле скоростей и линии тока, следовательно, тороидальный вихрь и рециркуляционный поток изменяются незначительно.

Для изучения влияния рабочего давления на форму пламени давление уменьшалось с  $15 \cdot 10^5$  до  $10^5$  Па. Сначала исследовались профили температуры на выходе в установившемся режиме. Из зависимостей  $T/T_{in}(r)$ , приведенных на рис. 5, следует, что при незначительном изменении рабочего давления существенного изменения температуры не происходит, но при давлении, меньшем  $2 \cdot 10^5$  Па, структура потока изменяется.

На рис. 6 представлены распределение температуры, линии тока и вихревые структуры в камере сгорания при различных значениях рабочего давления. При уменьшении



Рис. 8. Реакция пламени при наложении возмущений с различными периодами:  $a - \tau = 0.5$  мс,  $\delta - \tau = 0.25$  мс,  $e - \tau = 0.125$  мс;  $1 - p = 15 \cdot 10^5$  Па,  $2 - p = 4 \cdot 10^5$  Па

рабочего давления в интервале  $15 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^5$  Па форма пламени практически не меняется, а его толщина увеличивается вследствие уменьшения скорости реакции при понижении давления. Кроме того, при давлении  $p > 2 \cdot 10^5$  Па пламя располагается выше по течению относительно тороидального вихря, но при уменьшении рабочего давления форма пламени меняется и оно перемещается вниз по потоку относительно тороидального вихря.

Значительное изменение формы пламени при атмосферном давлении оказывает влияние на параметры, зависящие от формы пламени, что не позволяет получить достоверные сведения и результаты экспериментов при атмосферном давлении. Изучена реакция пламени на изменение давления в условиях нестационарного процесса. На рабочее давление накладывались синусоидальные колебания, амплитуда которых равна 1 % среднего значения давления, с периодами, равными 0,125; 0,250; 0,500; 1,000 мс. В качестве индикатора реакции пламени использовалась массовая доля СО на выходе.

Моделирование нестационарного процесса проводилось для давлений в камере сгорания, равных  $p = 15 \cdot 10^5$ ;  $4 \cdot 10^5$ ;  $10^5$  Па. Изучалась реакция пламени на изменение давления при одной и той же форме пламени ( $p = 15 \cdot 10^5$ ;  $4 \cdot 10^5$  Па) и при различной форме пла-



Рис. 9. Реакция пламени при атмосферном давлени<br/>и $p=10^5$ Па(1)и при рабочем давлени<br/>и $p=15\cdot10^5$ Па(2)в случае наложения высокочастотных возмущений <br/>( $\tau=0,125$ мс)

мени ( $p = 10^5$  Па). На рис. 7 показана форма пламени в различные моменты времени при наложении на рабочее давление  $p = 15 \cdot 10^5$  Па возмущений с периодом 1 мс. Даже при небольшой амплитуде колебаний (порядка  $0,15 \cdot 10^5$  Па) и периоде колебаний, равном 1 мс, форма пламени существенно меняется. При меньших периодах колебаний давления изменения формы пламени незначительны.

На рис. 8 приведены зависимости, характеризующие реакцию пламени при наложении возмущений давления с различными периодами ( $m_{\rm CO}$ ,  $m_{\rm CO}$  st — массовая доля CO в возмущенном и невозмущенном потоках). Даже при существенно различающихся значениях рабочего давления ( $p = 15 \cdot 10^5$  Па и  $p = 4 \cdot 10^5$  Па) реакция пламени на возмущения при указанных периодах возмущения практически одинакова. Это означает, что характеристики нестационарного потока могут быть исследованы при давлениях, существенно меньших рабочего. Увеличение периода возмущений приводит к незначительному увеличению амплитуды изменения массовой доли CO. Однако при значительном увеличении периода возмущений происходит существенное изменение формы пламени (см. рис. 7).

На рис. 9 приведена зависимость, характеризующая реакцию пламени при атмосферном и рабочем давлениях в случае наложения высокочастотных возмущений. Согласно данным, представленным на рис. 9, реакция пламени при рассматриваемых значениях давления существенно различается, что обусловлено изменением формы пламени. Это необходимо учитывать при экспериментальном исследовании устойчивости горения.

Заключение. Выполнено численное моделирование турбулентного потока в камере сгорания. Изучено влияние изменения рабочего давления в камере сгорания на форму пламени. Установлено, что в широком диапазоне значений рабочего давления существенного изменения формы пламени не происходит. Пламя формируется в камере сгорания перед тороидальным вихрем, но при давлении  $p < 2 \cdot 10^5$  Па оно перемещается вниз по потоку относительно тороидального вихря. Показано, что при наложении возмущений давления реакция пламени при различных значениях давления, превышающих атмосферное, практически одна и та же.

Из результатов проведенного исследования следует, что необходимо с осторожностью использовать экспериментальные данные об устойчивости горения в камерах сгорания

турбодвигателей, полученные при атмосферном давлении. Для того чтобы сохранить форму пламени, рекомендуется проводить испытания при более высоких давлениях. Если конструкция системы подачи горячего воздуха позволяет, давление в эксперименте должно быть увеличено с использованием нисходящих регулирующих клапанов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Wang X., Heckl M. 3-D thermoacoustic instability analysis based on Green's function approach // J. Sound Vibrat. 2022. V. 537. 116816.
- Fredrich D., Jones W. P., Marquis A. J. A combined oscillation cycle involving self-excited thermo-acoustic and hydrodynamic instability mechanisms // Phys. Fluids. 2021. V. 33. 085122.
- Roy A., Mondal S., Pawar S. A., Sujith R. I. On the mechanism of open-loop control of thermoacoustic instability in a laminar premixed combustor // J. Fluid Mech. 2020. V. 884. A2. DOI: 10.1017/jfm.2019.884.
- Zhang L., Li S., Xue Y., et al. Neural network PID control for combustion instability // Combust. Theory Model. 2022. V. 26, iss. 2. P. 1–16.
- Campa G., Camporeale S. M. Prediction of the thermoacoustic combustion instabilities in practical annular combustors // J. Engng Gas Turbines Power. 2014. V. 136. P. 1–29. DOI: 10.1115/1.4027067.
- Laera D., Campa G., Camporeale S. M., et al. Modelling of thermoacoustic combustion instabilities phenomena: Application to an experimental test rig // Energy Procedia. 2014. V. 45. P. 1392–1401.
- 7. Lefebvre A. H. Gas turbine combustion. 3rd ed. / A. H. Lefebvre, D. R. Ballal. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- 8. Murphy M. Design and construction of a gas turbine combustor test rig for alternative fuel testing: M. Sc. Thesis. Ottawa: Carleton Univ., 2004.
- 9. Mellor A. M. Design of modern turbine combustors. San Diego: Acad. Press, 1990.
- Ahn K. Y., Kim J. S. Model and field testing of a heavy duty gas turbine combustor // KSME Intern. J. 2001. V. 15, N 9. P. 1319–1327.
- 11. Biagioli F., Guthe F. Effect of pressure and fuel-air unmixedness on  $NO_x$  emissions from industrial gas turbine burners // Combust. Flame. 2007. V. 151. P. 274–288.
- 12. Runyon J., Marsh R., Pugh D. G., et al. Experimental analysis of confinement and swirl effects on premixed CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> flame behavior in a pressurized generic swirl burner // Proc. of the conf. "Turbo expo: Power for land, sea, and air". S. l.: ASME, 2017. V. 50855. V04BT04A044.
- Syred N., Beer J. Combustion in swirling flows: A review // Combust. Flame. 1974. V. 23. P. 143–201.
- Andersen J., Rasmussen C. L. Global combustion mechanisms for use in CFD modeling under oxy-fuel conditions // Energy Fuels. 2009. V. 23. P. 1379–1389.
- Spalart P. R., Allmaras S. R. A one equation turbulence model for aerodynamic flows // La Recherche Aérospat. 1994. N 1. P. 5–21.
- 16. Liou M. S. A sequel to AUSM: AUSM+ // J. Comput. Phys. 1996. V. 129. P. 364–382.
- Tahsini A. M. Suppression of the detonation wave with the aid of a multi-component particle cloud // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2020. V. 61, N 1. P. 54–60.
- Tahsini A. M., Nabavi S. S. Evaporation and combustion of n-heptane droplets in supersonic combustor // Proc. Inst. Mech. Engrs. Pt G. J. Aerospace Engng. 2021. V. 236, iss. 7. 095441002110376.

- Tahsini A. M. Burning rate augmentation in solid fuel ramjets by swirling inlet air stream // Proc. Inst. Mech. Engrs. Pt G. J. Aerospace Engng. 2021. V. 235. P. 2561–2569.
- Tahsini A. M. Ignition delay time in swirling supersonic flow // Acta Astronaut. 2013. V. 83. P. 91–96.
- Tahsini A. M., Tadayon Mousavi S. Investigating the supersonic combustion efficiency for the jet-in-cross-flow // Intern. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40. P. 3091–3097.
- Tahsini A. M. Detonation wave attenuation in dust-free and dusty air // J. Loss Prevent. Process Industr. 2016. V. 39. P. 24–29.
- Kroner M., Fritz J., Sattelmayer T. Flashback limits for combustion induced vortex breakdown in a swirl burner // J. Engng Gas Turbines Power. 2003. V. 125. P. 693–700.
- 24. Fritz J., Kroner M., Sattelmayer T. Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone // J. Engng Gas Turbines Power. 2004. V. 126. P. 276–283.
- 25. **Kiesewetter F.** Modellierung des verbrennungsinduzierten Wirbelaufplatzens in Vormischbrennern: PhD diss. München: Tech. Univ. München, 2005.

Поступила в редакцию 25/II 2022 г., после доработки — 3/IV 2022 г. Принята к публикации 25/IV 2022 г.