

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ РАЗБАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО ЧЕРЕЗ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ОТВЕРСТИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Майоров В.С.<sup>1</sup>, Колобова О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, г. Самара, valodia.m@yandex.ru

*Ключевые слова:* газотурбинный двигатель, камера сгорания, смешение, прямоугольные отверстия, перпендикулярная подача, CFD, верификация, ANSYS Fluent

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения достоверных рекомендаций по выбору геометрии отверстий охлаждения для повышения равномерности поля температур на выходе из камеры смешения. Новизна заключается в систематическом анализе сеточной сходимости применительно к конфигурации с перпендикулярными прямоугольными отверстиями и в количественной оценке её эффективности на основе верифицированной CFD-модели. Цель работы – оценка эффективности смешения для конфигурации с перпендикулярными прямоугольными отверстиями и выявление характерных недостатков такой геометрии с последующими рекомендациями для проектирования.

Экспериментальные исследования Norgren и Humenik [1] предоставляют эталонные данные по струйному перемешиванию в прямоугольной секции, которые используются для верификации CFD-моделей. Исследуемая смесительная секция представляет собой прямоугольный канал, имитирующий сегмент зоны смешения камеры сгорания (рис. 1). Горячий поток подаётся с торца, холодный разбавляющий воздух вводится через верхний и нижний коллекторы, которые через пластины с отверстиями сообщаются с основной камерой. Пластины содержат прямоугольные отверстия размером  $33 \times 13$  мм в количестве 12 штук на каждой пластине. Отверстия расположены перпендикулярно основному потоку, расстояние между ними – 25 мм. Суммарная площадь отверстий составляет  $10630 \text{ мм}^2$ . Такая конфигурация характерна для некоторых типов камер сгорания, где требуется ввод значительного количества воздуха при ограниченном перепаде давлений.

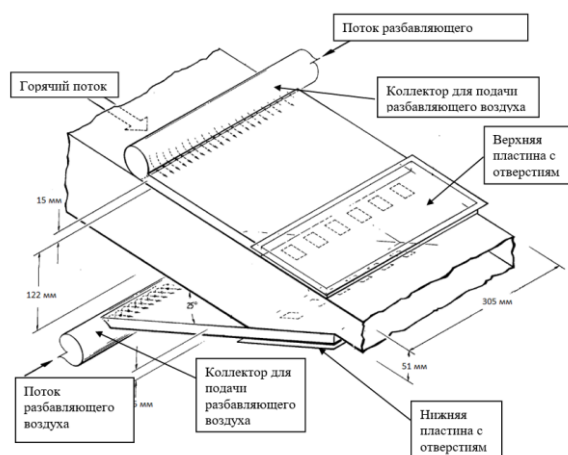


Рис. 1 – Сегмент зоны смешения камеры сгорания

Расчёты выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent 2021 R1 [2]. Дискретизация конвективных членов – второй порядок точности. Рабочее тело – сжимаемый идеальный газ (воздух), теплофизические свойства заданы полиномами из базы данных Fluent. Модель турбулентности –  $k-\omega$  SST [3] (выбрана после предварительных тестов

как оптимальная для отрывных течений и смешения). Для геометрической модели создана расчётная сетка типа poly-hexcore с пристеночными призматическими слоями (5 слоёв, высота первого слоя 0,01 мм, коэффициент роста 1,2). Количество элементов в точной сетке – 1,677 млн, узлов – 4,13 млн.

Граничные условия заданы на основе экспериментальных данных [1]. Вход горячего потока: эпюры полной температуры (543–580 К) и полного давления (122–124 кПа). Входы охлаждающего воздуха: полная температура 291 К, массовый расход 0,029 кг/с на каждый коллектор. Выход: статическое давление 101325 Па.

Проведена оценка сеточной сходимости по методу GCI (Grid Convergence Index) [3] для двух случаев: без учёта пристеночных слоёв и с их учётом. При расчёте параметра R по среднеинтегральной температуре на выходе получено значение  $R = -0,97$ , что указывает на колебательную сходимость. Метод GCI применим только для монотонной сходимости. Следовательно, формальное использование GCI для данной конфигурации невозможно. Это связано с интерполяцией граничных условий на грубой сетке и ограниченными вычислительными ресурсами. Для дальнейшего анализа использовалась точная сетка (fine).

По результатам расчёта холодный поток из верхнего и нижнего коллекторов входит в камеру перпендикулярно, однако из-за высокого динамического напора горячего потока струи разбавляющего воздуха не проникают в центральную область. Вместо этого они прижимаются к стенкам и распространяются вдоль них, формируя плёночное охлаждение поверхности. Ядро потока сохраняет температуру, близкую к температуре горячего газа. На выходе из смесительной секции профиль температуры имеет ярко выраженную W-образную форму: два минимума у стенок ( $T \approx 450\text{--}480\text{ К}$ ) и максимум в центре ( $T \approx 550\text{--}560\text{ К}$ ). Средневзвешенная температура на выходе составляет 519,73 К, что лишь на 50 К ниже средней температуры горячего потока на входе. Это свидетельствует о низкой эффективности смешения. Распределение полного давления показывает зону потерь за отверстиями, связанную с отрывом потока и вихреобразованием. Потери полного давления составляют около 1–2 % от входного значения.

На рис. 2 приведено сравнение расчётного профиля полной температуры на выходе с экспериментальными данными [1]. Качественное согласие: форма W-образного профиля, положение минимумов и максимума воспроизводятся правильно. Количественное расхождение составляет порядка 5–7 % в пристеночных зонах, что можно считать приемлемым для инженерных расчётов. Таким образом, верифицированная CFD-модель адекватно описывает основные закономерности течения.

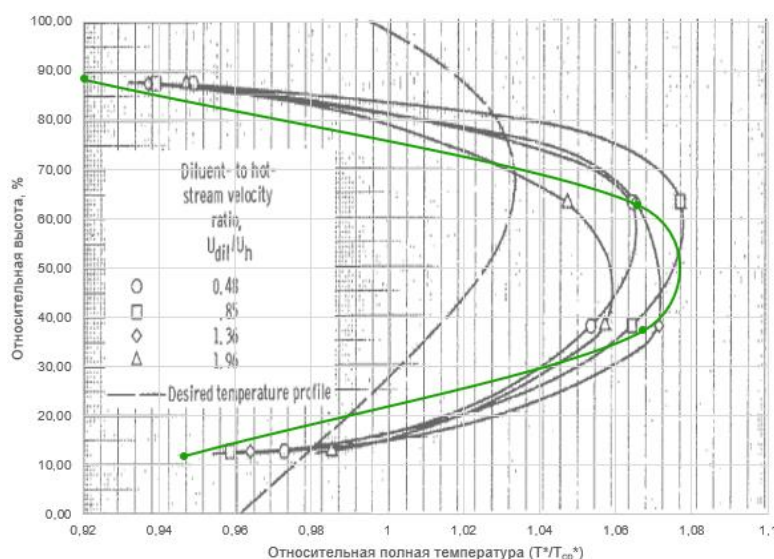


Рис.2 – Сравнение расчётного профиля полной температуры на выходе с экспериментальными данными

Прямоугольные отверстия, расположенные перпендикулярно потоку, обладают плохой проникающей способностью из-за большого «лобового» сопротивления. Струя, выходящая из такого отверстия, быстро тормозится и разворачивается вдоль стенки. Отношение импульсов (коэффициент надувания) в данном случае невелико, поэтому струя не достигает центра канала. Кроме того, прямоугольная форма способствует образованию угловых вихрей, которые не интенсифицируют перенос тепла к ядру, а, наоборот, локализуют холодный воздух вблизи стенок. Этот вывод согласуется с исследованиями Dayton, которые показали, что в ближнем следе струи в поперечном потоке форма отверстия существенно влияет на траекторию проникновения. Обнаруженная колебательная сходимость ( $R = -0,97$ ) свидетельствует о том, что для данной конфигурации стандартный метод GCI не применим [4]. Причина может заключаться в немонотонном поведении интегрального параметра при измельчении сетки из-за нелинейных эффектов в зоне смешения, а также в недостаточной точности на грубых сетках.

На основе верифицированной CFD-модели исследовано смешение холодного разбавляющего воздуха с горячим поперечным потоком в прямоугольной секции с перпендикулярными прямоугольными отверстиями размером  $33 \times 13$  мм. Рассмотренная конфигурация характеризуется крайне низкой эффективностью смешения: холодный воздух прижимается к стенкам, не проникая в центральную область канала. На выходе формируется W-образный профиль температуры с локальной неравномерностью более 100 К; центральная зона практически не охлаждается. Для данной задачи метод оценки сеточной сходимости GCI неприменим из-за колебательного характера сходимости ( $R = -0,97$ ). Это указывает на необходимость построения более подробных сеток или использования нестационарных подходов (URANS, LES). Сравнение с экспериментальными данными NASA [1] показало удовлетворительное качественное и количественное согласие (расхождение 5–7 %), что подтверждает адекватность модели.

Практические рекомендации для проектирования камер смешения ГТД: избегать использования перпендикулярных прямоугольных отверстий большого размера; предпочтительны наклонные ( $30\text{--}45^\circ$ ) отверстия округлой или эллиптической формы [5]; для улучшения смешения необходимо увеличить расход охлаждающего воздуха или изменить угол подвода.

### **Список литературы**

1. Norgren C.T., Humenik F.M. Dilution-jet mixing study for gas-turbine combustors // NASA TN D-4695. – Washington, 1968. – 52 с.
2. ANSYS Fluent Theory Guide. – Canonsburg: ANSYS, Inc., 2021. – 942 p. (Release 2021 R1).
3. Dayton J.W., Poettgen B.K., Cetegen B.M. Non-isothermal mixing characteristics in the extreme near-field of a turbulent jet in hot crossflow // Physics of Fluids. – 2019. – Vol. 31, No. 12. – P. 125104.
4. Celik I.B., Ghia U., Roache P.J., Freitas C.J., Coleman H., Raad P.E. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications // Journal of Fluids Engineering. – 2008. – Vol. 130, No. 7. – P. 078001.
5. Wernet M.P., Georgiadis N.J., Locke R.J. PIV and Rotational Raman-Based Temperature Measurements for CFD Validation in a Single Injector Cooling Flow. – Washington: NASA, 2020. – 35 p. (NASA/TM–2020-220491).

### **Сведения об авторах**

Майоров Владимир Сергеевич – студент, область научных интересов конструкция газотурбинных двигателей.

Колобова Ольга Александровна – студент, область научных интересов конструкция газотурбинных двигателей.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF DILUTION AIR JET MIXING IN A COMBUSTION CHAMBER WITH PERPENDICULAR RECTANGULAR INJECTION HOLES

Mayorov V.S.<sup>1</sup>, Kolobova O.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University

A numerical study of cold dilution air mixing with a hot crossflow in a rectangular section (33×13 mm perpendicular holes, 12 per plate) is performed using ANSYS Fluent (k- $\omega$  SST, 1.68M cells). The configuration shows extremely low mixing efficiency: cold air clings to walls without penetrating the core. Exit temperature profile is W-shaped (450–480 K at walls, 550–560 K at center; avg. 519.73 K), non-uniformity >100 K. GCI convergence parameter  $R = -0.97$ ; deviation from NASA experiment is 5–7%.