

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ НА МОДЕЛИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Дробыш М.В., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б., Свердлов Е.Д.,  
Фурлетов В.И., Якубовский К.Я  
ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова»

*Ключевые слова:* математическая модель, термоакустическая неустойчивость, горение, малоэмиссионная камера сгорания.

Приведена математическая модель турбулентного горения смеси метан/воздух и методика численного моделирования самовозбуждения колебаний газа в малоэмиссионной камере сгорания (МЭКС) ГТУ. Турбулентное течение с горением в МЭКС описывается системой трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса в SAS постановке с двухпараметрической моделью турбулентности SST  $k-\omega$  с использованием пристеночных функций. Модель горения реализуется уравнением для степени завершенности горения (progress variable) с источниковым членом, учитывающим аппроксимацию Зимонта для скорости турбулентного горения и его зависимость от звуковых колебаний давления газа. Для определения нормальной скорости распространения пламени используется кинетический механизм GRI Mech3.0. При постановке граничных условий применяются аналитические зависимости между периодически изменяющимися параметрами газа, которые характеризуют акустические характеристики каналов на входе и на выходе из камеры сгорания.

Склонность МЭКС к возбуждению автоколебаний газа на заданном режиме горения оценивается двумя параметрами: параметром возбуждения и логарифмическим декрементом затухания.

Апробация методики выполнена по результатам ранее проведенных в ЦИАМ испытаний модели МЭКС ГТУ. От большинства других камер она отличается газодинамической схемой течения и конструктивным обликом. Для формирования зоны стабилизации пламени в ней используется конический стабилизатор пламени, а начальный участок жаровой трубы выполнен в виде безотрывного конического диффузора. Это позволяет существенно увеличить размеры зоны рециркуляции за стабилизатором и значительно сместить границу бедного срыва пламени в сторону еще более бедной смеси.

Испытания проводились при следующих условиях: давление на входе в камеру – 575 кПа, температура воздуха на входе – 828 К, расход воздуха – 1,0 кг/с, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 2.3$ .

Эксперименты показали, что колебания газа при появлении виброгорения происходят в основном на частотах 380 и 1900 Гц. Они соответствуют 1-й и 5-й продольным акустическим модам колебаний. Амплитуды колебаний давления газа достигали 2-5% от среднего давления в камере. Режим горения становился неустойчивым при уменьшении доли пилотного топлива ниже 25%.

В расчете моделировался 60° сектор МЭКС. Размер расчетной сетки составил 2 млн. ячеек.

В результате решения задачи на самовозбуждение колебаний в данной модели МЭКС возбудились продольные колебания 1-й и 5-й моды на частотах 360 и 1950 Гц, близких к наблюдаемым в эксперименте.

Продемонстрирована методика выделения из сложного спектра колебаний газа колебаний с интересующей частотой, усиления её амплитуды и анализа склонности МЭКС к возбуждению выбранной моды колебания.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-08-01045.  
Сведения об авторах:

Дубовицкий Алексей Николаевич, заместитель начальника отдела. Область научных интересов: физика горения и взрыва, термоакустическая неустойчивость, математическое моделирование химических систем и процессов горения, моделирование, проектирование и экспериментальные исследования камер сгорания.

Дробыш Максим Владимирович, начальник сектора. Область научных интересов: физика горения и взрыва, математическое моделирование химических систем и процессов горения, моделирование, моделирование камер сгорания.

Свердлов Евгений Давыдович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник. Область научных интересов: физика горения и взрыва, гидродинамическая устойчивость, эмиссия вредных веществ, проектирование и экспериментальные исследования камер сгорания.

Фурлетов Виктор Иванович, канд. физ.-мат. наук, заместитель начальника отдела. Область научных интересов: физико-химические проблемы горения, испытание и математическое моделирование вибрационного горения в камерах сгорания ГТД.

Лебедев Александр Борисович, канд. физ.-мат. наук, доцент факультета ФАЛТ МФТИ, ведущий научный сотрудник. Область научных интересов: турбулентность, турбулентное горение, физико-химические процессы в камерах сгорания ГТУ и ГТД.

Якубовский Константин Яковлевич, научный сотрудник. Область научных интересов: вычислительная газодинамика, турбулентность, турбулентное горение, физико-химические процессы в камерах сгорания ГТУ и ГТД.

**APPROBATION OF THE METHOD  
OF NUMERICAL SIMULATION OF UNSTABLE COMBUSTION  
ON THE MODEL OF A LOW-EMISSION COMBUSTION CHAMBER**

Dubovitsky A.N.<sup>1</sup>, Drobyshev M.V.<sup>1</sup>, Lebedev A.B.<sup>1</sup>, Sverdlov E.D.<sup>1</sup>, Furletov V.I.<sup>1</sup>,  
Yakubovsky K.Ya.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CIAM, Moscow, Russia, dubovitsky@ciam.ru

*Keywords: mathematical model, thermoacoustic instability, low-emission combustor, combustion.*

A mathematical model of the turbulent combustion of a methane/air mixture and a method for numerical simulation of self-excitation of gas oscillations in a low-emission combustion chamber of a gas turbine engine are presented. The methodology was tested based on the results of earlier tests of the combustion chamber GTU model conducted at CIAM. As a result of solving the problem of self-excitation of oscillations in this model, longitudinal oscillations of the 1st and 5th modes were excited at frequencies of 360 and 1950 Hz, close to those observed in the experiment.