

УДК 629.7.05 (075.8)

А.Б.Никитенко (5 курс, каф. ИСУ), В.В.Кучинский, д.ф-м.н., проф.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ГЛА

Исследуются воздействия акустических и, в дальнейшем, ударных волн на плазму продуктов сгорания (ПС) в камере сгорания (КС) перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) имеющих крейсерский полёт более 6-7 Маха. Целевое направление данной работы – получить возможность управления процессами в КС, например, используя магнитогазодинамическое (МГД) управление потоком и искусственно возбуждаемые акустические или ударные волны. Управление, возможно, позволит решить проблемы накопления заряда на стенках КС, диагностики рабочих и предаварийных режимов, уменьшения шума двигателя. Расчёт процессов, в частности, позволит сделать выбор топливных смесей, обеспечивающих наиболее стабильную работу КС.

В [1] предложена трёхжидкостная физическая модель – плазма рассматривается как совокупность трёх компонентов: нейтральных атомов одно сорта, их положительных однократных ионов и электронов. В соответствии с этим, основными определяемыми величинами являются направленные составляющие скоростей атомов, ионов и электронов, их плотности, напряженность электрического поля и степень ионизации.

Математическое описание предлагаемой физической модели базируется на законах сохранения, на условиях Саха, уравнении Пуассона, уравнении непрерывности, уравнении сохранения заряда. Полная математическая модель описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Самый адекватный и сложный уровень – это представление всех величин как функций четырёх переменных: трех пространственных координат и временной координаты. Чуть менее точно описывающий процессы, но более простой уровень основан на том, что КС в общем виде имеет осевую симметрию (пространственные координаты – координата вдоль оси двигателя и радиальная координата). При этом есть зависимость каждой величины уже от трёх переменных. Для построения модели и поиска метода реализации на ЭВМ правильнее рассмотреть ещё более простой уровень. Для реализации такого подхода нужно «убрать» стенки КС двигателя в бесконечность, тогда исчезнет зависимость величин от радиуса. Здесь математическая модель представляет собой зависимости функций двух переменных. Одномерную (с точки зрения пространства) модель проще реализовать, представить графически и оценить её поведение, поэтому этот этап очень важен для создания многомерных моделей, с помощью которых можно судить о реальных физических процессах.

Одномерная математическая модель представляет собой систему 5 нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$n_e m_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_e \nabla \right) U_e + \frac{en_e}{\mu_e} (U_e - U_a) + \nabla p_e - en_e E = 0, \quad (1)$$

$$n_i m_i \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_i \nabla \right) U_i + \frac{en_i}{\mu_i} (U_i - U_a) + \nabla p_i - en_i E = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_\Sigma}{\partial t} + \nabla (\rho_\Sigma U_\Sigma) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \theta_k = 0, \quad (4)$$

$$\nabla E = \frac{q}{\varepsilon_0}. \quad (5)$$

Здесь n_i – концентрация ионов в среде, n_e – концентрация электронов в среде, m_e – масса электрона, m_i – масса иона, e – заряд электрона, U_a – направленная скорость атомов за счет возникновения электрического поля, m_a – масса атома масса нейтральной частицы, U_e – направленная скорость электронов за счет возникновения электрического поля, U_i – направленная скорость ионов за счет возникновения электрического поля, ρ_Σ – средняя плотность, q – локальная плотность нескомпенсированного заряда, θ_k – конвективная составляющая плотности электрического тока, μ_e – подвижность электронов, μ_i – подвижность ионов, ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Описание модели базируется на законах сохранения (из которых получаются, в частности, уравнения для скоростей электронной (1) и ионной компонент плазмы (2)), уравнении неразрывности потока (3), уравнении сохранения заряда (4), уравнении Пуассона (5).

Программно реализована одномерная модель, в которой влияние на процесс оказывают акустические волны. Реализация основана на разностном методе, где производные заменяются конечными разностями. При разностном подходе задача условно разбивается на три этапа: переход от системы нелинейных дифференциальных уравнений (СНДУ) в частных производных к системе нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), для решения последней необходим переход к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Все этапы подробно описаны в [2].

Некоторые интересные моменты реализации и исследования вычислительного процесса:

- автоматическая генерация кода текста программы;
- создание модуля для решения сильно разряженных СЛАУ;
- создание модуля, реализующего разрядную сетку нужной величины;
- графическое представление результатов.

Автоматическая генерация необходима в виду исключения ошибок во время написания кода текста программы. Система базовых дифференциальных уравнений в первоначальном виде очень непростая из-за сложности описываемых процессов, после перехода к разностной схеме структура усложняется, а в результате дифференцирования уравнений СНАУ при переходе к СЛАУ вид выражений для расчёта элементов матрицы Якоби (СНАУ решается методом Ньютона) таков, что занимает не один печатный лист.

Генерируемая матрица Якоби очень разряжена, это ведёт к необходимости работы только с ненулевыми элементами. Для расчёта сетки размерностью 100×100 точек нужно 67 Гб памяти для хранения матрицы, если не учитывать её разряженность. Использование созданного модуля даёт возможность расчёта на обычных ЭВМ в течении минут. «Solver» не ориентирован на специальный вид разряженности матриц, что позволяет использовать его в дальнейшем не только в ходе решения поставленной задачи.

Опытным путём найдена область параметров, задающих условия протекания процессов, при которых вычислительный процесс сходится. Эта область не выпуклая, её границы не удовлетворительны для исследования, например, верхняя граница потенциала ионизации не превышает 10 эВ, а необходимо рассматривать случаи хотя бы не менее 16 эВ.

Среди всего оказалось, что размер разрядной сетки, на которой ведутся вычисления, влияет на границы области параметров. Это связано со значениями степеней ионизации порядка $10^{-6} - 10^{-7}$. Поэтому необходимо регулировать величину разрядной сетки. Введение такого модуля в вычислительный процесс сильно затягивает его, что нуждается в более детальном рассмотрении.

Производился расчёт одних и тех же областей на разных сетках, из уже рассчитанной области выделялась подобласть. Результаты сопоставлялись с точки зрения физически возможных. Все подходы не обнаружили какой-либо противоречивости.

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.А.Пинчук. Низкотемпературная плазма в условиях внешних акустических воздействий / Санкт-Петербургский механический институт, инженерно-физический журнал, 1994 г.
2. Б.П.Демидович, И.А.Марон. Основы вычислительной математики. – М.: «Наука» 1970 г.