

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.Ю. Гидаспов, Н.С. Северина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, г. Москва, Россия

В настоящей работе описывается методика математического моделирования квази-одномерных нестационарных реагирующих течений применительно к моделированию рабочего цикла импульсного детонационного двигателя (ИДД). В современном представлении ИДД – это труба или связка труб, оборудованная системой подачи воздуха и топлива. Один конец трубы (тяговая стенка) закрыт или периодически закрыт в случае использования механического клапана. Другой конец трубы оборудован реактивным соплом. По мере заполнения трубы топливно-воздушной смесью производится инициирование детонации в смеси с помощью того или иного источника инициирования, в результате чего по смеси распространяется детонационная волна, которая, сжигая топливно-воздушную смесь, создает высокое давление на тяговой стенке. Далее, давление в трубе снижается после выхода в атмосферу детонационной волны, и процесс циклически повторяется.

При численном моделировании используется сеточно-характеристический метод, позволяющий точно учитывать распределение ударных и детонационных волн, а также зоны раздела между газами продувки и горючей смесью [1]. Кратко опишем особенности предлагаемой методики моделирования.

1. Расчет ведется маршевым сеточно-характеристическим методом по слоям $t = \text{const}$.

2. Рассматриваемая область течения делится на подобласти гладкости решения, границами которых являются линии сильных и слабых разрывов, а также левая и правая границы расчетной области.

3. Разностная сетка состоит из подвижных узлов, среди которых обязательно присутствуют узлы, лежащие на выделяемых сильных и слабых разрывах. При этом каждому узлу, лежащему на сильном разрыве, приписывается пара значений каждого из газодинамических параметров. Они соответствуют левому и правому пределам гладких решений, существующих по обе стороны от разрыва и удовлетворяют условиям динамической совместности.

4. При пересечении траекторий двух сильных разрывов пределы справа и слева перестают удовлетворять условиям динамической совместности. В этом случае происходит распад разрыва с образованием новых сильных и слабых разрывов, параметры которых находятся из решения известной задачи Римана.

5. Стандартно шаг интегрирования выбирается из условия Куранта. Однако если пересечение какой-либо пары выделяемых разрывов происходит раньше, то шаг интегрирования выбирается из условия точного выхода на время этого пересечения или выхода на время запуска очередной стадии рабочего цикла ИДД.

6. Учитывается возможность зарождения ударной волны в области, где решение было изначально гладким. Координаты точки зарождения определяются по пересечению звуковых характеристик одного семейства.

7. Параметры потока в каждом узле определяются из характеристических соот-

ношений, записанных в разностной форме. Опорные точки для соответствующих характеристик могут находиться как на предыдущем слое, так и на выделяемых разрывах. Соответствующие системы конечно-разностных уравнений, дополненные в случае необходимости условиями динамической совместности, решаются итерационным методом. Итерации прекращаются при достижении некоторой наперед заданной точности. Если за максимально допустимое число итераций сходимости не достигается, то шаг по времени уменьшается.

8. При нахождении параметров в опорных точках используются интерполяционные узлы, всегда лежащие в той же подобласти гладкости, что и рассчитываемая точка.

Алгоритм расчета очередного слоя по времени можно представить в виде последовательности следующих элементарных шагов:

а) определение шага интегрирования из условия Куранта, обеспечивающего устойчивость, и контроля погрешности аппроксимации уравнений химической кинетики;

б) определение координат подвижных узлов на новом слое и анализ наличия пересечений линий разрыва между собой и с траекториями газа. Если пересечение имело место, то время наиболее раннего пересечения становится временем нового слоя и шаг интегрирования перевычисляется;

в) делается одна итерация для нахождения параметров газового поля и концентраций химических компонент во всех узлах сетки;

г) выполняется контроль точности выполнения конечно-разностных уравнений: если во всех точках разностной сетки заданная точность достигнута, то переход к пункту д), а если хотя бы в одной не достигнута, то делается еще одна итерация, т.е. возврат к пункту б);

д) если имело место пересечение разрывов (см. п. б), то в зависимости от физической природы взаимодействующих разрывов определяется структура реализующегося течения в точке пересечения (например, если произошло пересечение двух сильных разрывов, то решается задача Римана);

е) переход к расчету нового временного слоя.

В силу специфики рассматриваемого сеточно-характеристического метода разностная сетка состоит как из подвижных, так и неподвижных узлов. Число узлов в процессе счета меняется либо в большую, либо в меньшую сторону вследствие пересечений сеточных линий. При каждом пересечении вызывается процедура обработки соответствующего взаимодействия.

Первая стадия рабочего цикла — стадия заполнения — моделируется как распад разрыва с параметрами: слева параметры стадии (расход, полная энтальпия, состав горючей смеси), справа — текущие параметры на входе в канал. При стадии заполнения мы считаем, что на вход в канал подается предварительно перемешанная горючая смесь. В результате решения задачи о распаде разрыва образуется контактная поверхность, отделяющая горючую смесь от воздуха.

В момент времени, соответствующий стадии инициирования, клапан мгновенно закрывается. В рамках используемого алгоритма — это смена типа граничной точки Входная граница на Жесткую стенку. Также решается задача Римана, в результате которой образуется веер волн разрежения. «Поджиг» моделируется как мгновенное равновесное сгорание горючей смеси при постоянных плотности и внутренней энергии, значение которой может быть скорректировано на величину энергии зажигания. Это приводит к образованию волны горения, переходящей в детонационную волну. Далее происходит истечение волны из установки.

Стадия опустошения запускается в тот момент, когда давление за клапаном становится больше, чем давление перед ним на ε (варьируемый параметр). На расстояние при-

мерно одного калибра камеры идет заполнение воздухом, после чего процесс повторяется.

В работе сформулирована система граничных условий, моделирующих работу стадий. Разработана математическая модель инициирования детонации в канале. Приводятся результаты численного моделирования циклического рабочего процесса в ИДД с механическим клапаном при сверхзвуковом полете с числом Маха $M = 5$. Рассматриваемый вариант двигателя работает на стехиометрической пропано-воздушной смеси, продукты сгорания которой моделируются смесью, включающей 7 компонентов (C_3H_8 , O_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O , N_2). Для описания химических превращений в горючей смеси используется глобальная кинетическая схема из пяти реакций окисления горючего [2]. Получены зависимости тяги от времени и циклограмма работы установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гидаспов В.Ю., Пирумов У.Г., Северина Н.С.** Математическое моделирование квазиодномерных нестационарных течений реагирующего газа с произвольным числом взаимодействующих разрывов // Вестник МАИ. 2008. Т. 15, No. 5. P. 83–94.
2. **Зангиев А. Э., Иванов В.С., Фролов С.М.** Тяговые характеристики воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя в условиях полета с числом Маха от 0.4 до 5.0 // Химическая физика. 2016. Т. 35, No. 3. P. 65-76.
3. Импульсные детонационные двигатели // Под ред. д.ф.-м.н. Фролова С. М. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006.