ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВСЕМ УЧАСТКЕ РАБОТЫ РДТТ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОГО МЕТОДА ЛАКСА-ВЕНДРОФФА

А. Е. Кирюшкин
Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Л. Л. Миньков
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
E-mail: sashakir94@mail.ru

Ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ) – это такие двигатели, которые для получения необходимой тяги используют твердое топливо в качестве источника химической энергии. Самое раннее появление РДТТ на дымном порохе датируется XIII веком. С тех пор ракетная техника существенно развивалась и на данный момент существует обширный пласт теории РДТТ [1, 2].

Несмотря на относительную простоту конструкции РДТТ по сравнению с другими типами ракетных двигателей и их надежность, существует ряд минусов, как-то: невысокий удельный импульс, сложности, связанные с управлением тяги и другие. Вследствие трудностей, связанных с активным управлением тягой РДТТ, основные интересы конструкторов лежат в различных способах «пассивного» контроля. К таким способам можно отнести выбор топлива, а также его формы. То есть в зависимости от предназначения определяется допустимая кривая зависимости тяги от времени. Затем проектируется форма топливной шашки, обеспечивающая требуемую зависимость.

В последние годы численное моделирование процессов, связанных с РДТТ, широко распространилось как один из инструментов для проектирования новых РДТТ. Возможность моделирования внутрикамерных процессов РДТТ на всем участке его работы без затрат на производство или использования испытательных стендов обеспечивает возможность для тестирования большего количества различных конфигураций и в конечном счете получить оптимальную конструкцию ракетного двигателя.

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма, позволяющего объединить два физических явления: прогар топливной шашки и внутреннюю баллистику РДТТ на всем участке работы для зарядов сложной формы. Заряды сложной формы характеризуются трехмерной либо осесимметричной геометрией, однако в некоторых случаях течение в канале несущественных образом меняется как по сечению, так и вдоль канала. Таким образом, существуют численные модели, которые, учитывая сложную форму заряда, предполагают либо нульмерную, либо квазиодномерную постановку задачи для течения продуктов сгорания [3, 4].

Однако в некоторых случаях необходимо рассматривать трехмерное (осесимметричное) течение совместно с изменением геометрии поверхности топлива, что значительно осложняет численную реализацию. Таким образом, данный класс задач относится к задачам с подвижными границами. Для численного решения подобного типа задач можно использовать неструктурированные подвижные вычислительные сетки. Несмотря на простоту дискретизации уравнений на таких сетках, данный подход обладает рядом недостатков. Во-первых, построение «качественной» вычислительной сетки может занимать значительную часть от общего времени решения задачи. Во-вторых, данный подход требует постоянного перестроения вычислительной сетки, что может привести к потере точности. В-третьих, с течением времени могут происходить различные топологические изменения поверхности, что приводит к значительному усложнению алгоритма. В-четвертых, подобные схемы имеют порядок аппроксимации не выше второго.

В данной работе разработан алгоритм, позволяющий решать подобные задачи с подвижными границами на неподвижной декартовой сетке с произвольным порядком точности по пространству и времени. Из вышесказанного вытекают следующие основные сложности реализации. Во-первых, границы пересекают вычислительную сетку произвольным образом, что осложняет задание граничных условий. Во-вторых, реализация численной схемы для точек рядом с границей требует определения значений в «фиктивных» точках. В-третьих, необходимо отслеживать движущуюся поверхность. Для геометрического представления поверхности и отслеживания ее эволюции во времени используется метод уровней [5], который представляется наиболее эффективным способом для представления поверхностей неявным образом на неподвижной декартовой сетке. Для учета граничных условий и определения значений параметров течения в точках, лежащих вне расчетной области («фиктивных» точках), используется обратный метод Лакса-Вендроффа [6, 7], разработанный Шу.

В данной работе использовалась схема третьего порядка точности по пространственной координате [8] и второго порядка точности по времени [9] для уравнений газовой динамики, описывающих течение продуктов сгорание. А также схема пятого порядка точности по пространству и третьего порядка точности по времени [5] для отслеживания эволюции границы области, состоящей из подвижной поверхности горящего топлива и неподвижных стенок и границы с областью постоянного давления.

В качестве примера была решена задача для заряда щелевого типа на всем участке его работы. Для различных моментов времени получены форма поверхности горящего заряда, а также распределение параметров течения в камере и сопле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин Б. Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ / Б. Т. Ерохин – М. : Машиностроение, 1991. – 560 с.
2. Райзберг Б. А. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. – М. – Машиностроение, 1972. – 383 с.
3. Enrico Cavallini. Modeling and Numerical Simulation of Solid Rocket Motors Internal Ballistics. PhD thesis, 2010.
4. Wichard Sullwald, Grain regression analysis. Master’s thesis, 2014.
5. Osher S. Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces / S. Osher, R. Fedkiw – NY : Springer, 2003. – 273 p.
6. Tan S. Inverse Lax-Wendroff Procedure for Numerical Boundary Conditions of Conservation Laws / S. Tan, C.-W. Shu // Journal of Computational Physics. – 2010. – V. 229(21). – P. 8144 – 8166.
7. Tan S. Efficient Implementation of High Order Inverse Lax-Wendroff Boundary Treatment for Conservation Laws / S. Tan, C. Wang, C.-W. Shu and J. Ning // Journal of Computational Physics. – 2012. – V. 231(6). – P. 2510 – 2527.
8. G.-S. Jiang Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes / G.-S. Jiang, C.-W. Shu // Journal of Computational Physics. – 1996. – V. 126(1). – P. 202 – 228.
9. Gottlieb S. Total Variation Diminishing Runge-Kutta Schemes / S. Gottlieb, C.-W. Shu // Mathematics of Computation. – 1998. – V. 67. – P. 73-85.