Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томский государственный архитектурно-строительный университет
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Том 3. Математика

Сборник научных трудов
XV Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

24–27 апреля 2018 г.

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Volume 3. Mathematics

XV International Conference of students, graduate students
and young scientists

April 24–27, 2018

Томск 2018

НОВЫЙ ПОДХОД К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАДАЧ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ РДТТ

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
Email: sashakir94@mail.ru

NEW APPROACH IN NUMERICAL SIMULATION OF INTERNAL BALLISTICS SRM PROBLEM

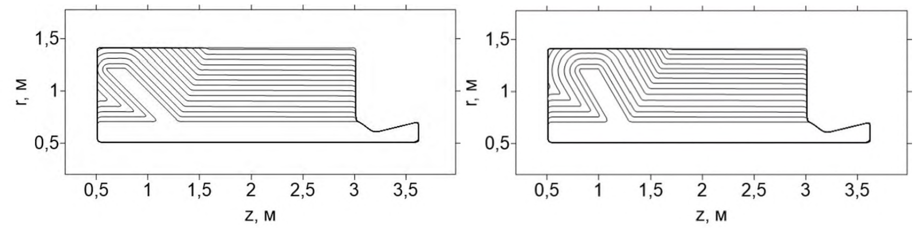
A. E. Kiryushkin
Scientific Supervisor: Prof., Dr. L. L. Minkov
National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050
Email: sashakir94@mail.ru

Abstract. *In this article new approach of simulating internal ballistics flows in SRM is considered. Two different phenomena should be taken into account for appropriate numerical simulation of internal ballistics problems: grain propellant regression and flow of combustion gases itself. The simulation is becoming more complicated as these two phenomena depend on each other: grain burning rate depends on flow parameters near the burning surface while flow parameters in SRM depend on current grain propellant position. Previous articles and theses considered complicated geometry of SRM grain but assumed only 1D flows of combustion gases. This assumption can be fulfilled for special types of SRMs but in general it may be far from truth. Thus, numerical schemes capable of simulating 2D and 3D gases flows are needed. This paper focuses on development, description and application of such schemes.*

Введение. Математическая постановка задачи внутренней баллистики ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) на всем участке работы включает в себя подвижные границы горящего топлива. Численное моделирование таких задач осложняется взаимозависимостью скорости горения твердого топлива и параметров течения продуктов сгорания: скорость горения твердого топлива зависит от давления, а также, возможно, от скорости обдувающих его газов, в то время как сами параметры течения зависят от положения горящей поверхности в данный момент времени. Такая «круговая» зависимость делает в общем случае невозможным построение линий уровня твердого топлива на каждый момент времени до решения задачи внутренней баллистики. Для решения подобного типа задач обычно используется нульмерная или одномерная постановка задачи течения продуктов сгорания с учетом сложной геометрии заряда топлива [1 – 5]. Однако, несмотря на то что для некоторых конфигураций РДТТ такое предположение о течении может оказаться близким к реальному, в общем случае такое предположение может давать неадекватные результаты.

Численная реализация. В данной работе используется алгоритм, позволяющий численно решать задачи внутренней баллистики РДТТ в осесимметричной постановке с учетом прогара топливной шашки на неподвижной декартовой вычислительной сетке. 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, который представляется наиболее эффективным способом для представления поверхностей на неподвижной декартовой сетке. Для учета граничных условий и определения значений параметров течения в «фиктивных» точках используется обратный метод Лакса-Вендроффа, разработанный Шу [6 – 7].

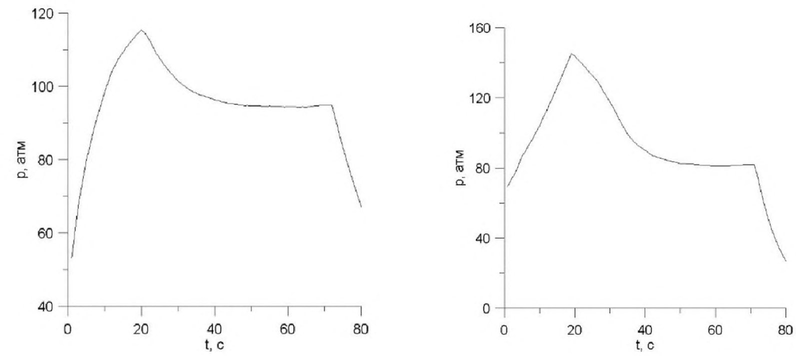
Полученные результаты. Для расчета течения продуктов сгорания использовалась схема первого порядка точности по пространству с расщеплением потоков по методу Ван-Лира [8] и первого порядка точности по времени, а для определения функции уровня использовалась схема пятого порядка точности по пространству и третьего порядка точности по времени [9]. На рис. 1 можно увидеть эволюцию поверхности горения с течением времени для углов $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$ соответственно. Промежуток времени, через который изображались изоповерхности, равен $\Delta t = 5$ c. Из рисунка видно, что для данного типа зарядов горение происходит практически параллельными слоями, то есть скорость горения вдоль поверхности изменяется незначительно.



а) б)

Рис. 1. Форма поверхности топлива в зависимости от времени для а) $\alpha = 45^\circ$ и б) $\alpha = 60^\circ$

На рис. 2 изображены зависимости давлений от времени, осредненных по объему камеры сгорания. На этих рисунках видно, что давление в камере сгорания возрастает до момента времени $t \approx 20$ c, что соответствует полному сгоранию топлива на левой стенке корпуса. Затем площадь горения начинает уменьшаться, что ведет к падению давления. На момент времени $t \approx 70$ c топливо полностью сгорает, и газоприход становится равным нулю, после чего давление монотонно падает.



а) б)

Рис. 2. Давление в камере в зависимости от времени для а) $\alpha = 45^\circ$ и б) $\alpha = 60^\circ$

Вывод. В данной работе для решения задач внутренней баллистики РДТТ на всем участке работы для зарядов любой формы на декартовой неподвижной сетке использовался алгоритм, основанный на обратном методе Лакса-Вендроффа. Подвижная поверхность горящего топлива отслеживалась с помощью метода уровней, суть которого заключается в неявном представлении в виде нулевого уровня некоторой функции.

В качестве примера была решена задача для заряда с «зонтиком» при различных углах наклона и получены кривые зависимости давления в камере от времени и эволюция горящей поверхности топлива.

Несмотря на то, что решение проводилось в осесимметричной постановке, данный подход может быть легко обобщен для трехмерной постановки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №9.9625.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. М. Милёхин и др., Сопряженная Задача Моделирования Внутрибаллистических Характеристик Бессопловых РДТТ // Физика Горения и Взрыва. – 2013. – Т. 49. – № 5. – С. 77-85.
2. E. Cavallini. Modeling and Numerical Simulation of Solid Rocket Motors Internal Ballistics. PhD thesis. – Rome, 2009. – 203 p.
3. E. Cavallini et al, Internal Ballistics Modeling of High Performance SRMs with Coupled Nozzle Erosion Characterization // 47th AIAA Joint Propulsion Conference: AIAA Conference Proceedings. San Diego, 2011.
4. W. Sullwald, Grain regression analysis. Master's thesis. – Stellenbosch, 2014. – 182 p.
5. M. H. Tshokotsha, Internal Ballistic Modelling of Solid Rocket Motors Using Level Set Methods for Simulating Grain Burnback. Master's thesis. – Stellenbosch, 2016. – 125 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. Van Leer B. Flux-Vector Splitting for the Euler Equations // Lecture Notes in Physics. – 1982. – V.170. – P.507-512.
9. Osher S. Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces / S. Osher, R. Fedkiw – NY : Springer, 2003. – 273 p.