УДК 533.6.011:533

В. И. ТИМОШЕНКО

ОДНОРОДНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ В ЗАТОПЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: itm12@ukr.net

Сформулирован маршевый алгоритм численного решения уравнений «вязкого слоя» (упрощенных уравнений Навье–Стокса, в которых опущены вторые производные по продольной координате, а в уравнении для радиальной компоненты скорости отброшены диссипативные слагаемые) для расчета турбулентного течения в многокомпонентной сверхзвуковой струе ракетного двигателя, истекающей в затопленное пространство или спутный дозвуковой поток воздуха. В рамках этого алгоритма система уравнений разбивается на две группы. К первой группе относятся уравнения для продольной составляющей импульса, энергии, переноса компонент газовой смеси и характеристик турбулентности. Это уравнения параболического типа и допускают решение маршевым методом по неявной абсолютно устойчивой итерационной схеме с применением скалярной прогонки. Во вторую группу включаются уравнение для радиальной составляющей импульса с опущенными диссипативными членами и уравнение неразрывности. При использовании уравнения состояния эти уравнения рассматриваются как уравнения относительно давления и поперечной составляющей вектора скорости. В статье сформулирован алгоритм для решения этой группы уравнений. В рамках этого алгоритма при решении уравнений второй группы для сеточных значений давления формируется система уравнений с трехдиагональной матрицей. Для этой системы формулируется краевая задача: на оси струи производная давления по радиальной координате равна нулю, на границе струи задано давление, равное давлению в затопленном пространстве или в спутном дозвуковом потоке. Решение этой задачи используется для определения давления в области сверхзвукового течения. Во внешней части струи с дозвуковым течением давление считается равным давлению в пространстве истечения. Для определения поперечной компоненты скорости в сверх- и дозвуковой части струи используется соотношение, которое получается при конечно-разностной аппроксимации уравнения неразрывности.

Использование предложенного маршевого алгоритма при расчете истечения струи ракетного двигателя в затопленное пространство позволяет осуществить непрерывный переход от расчета неизобарического полностью сверхзвукового течения на выходе из сопла к дозвуковому течению в струе вплоть до ее полного перемешивания с воздухом в пространстве истечения.

Для верификации алгоритма дано сравнение результатов расчета по предложенному алгоритму с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *приближение вязкого слоя, алгоритм маршевого расчета, сверхзвуковая струя ракетного двигателя, спутный дозвуковой поток, затопленное пространство.*

1. *Родионов А. В.* Новый маршевый метод расчета струй продуктов сгорания. ЖВМ и МФ. 2002. Т. 42, № 9. С. 1413–1424.
2. *Сафронов А. В.* Метод расчета струй продуктов сгорания при старте. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Том 4. URL: htpp//chemphys.edu.ru/2006-10-23-001.pdf
3. *Галицейский К. Б.* Моделирование догорания высокоскоростных турбулентных струй. Физика горения и взрыва. 2006. Т.42, №2. С. 3–9.
4. *Тимошенко В. И., Белоцерковец И. С.* Маршевый расчет течения при взаимодействии сверхзвуковой турбулентной струи со спутным ограниченным дозвуковым потоком. Вісник Дніпропетровського університету. 2008. Т. 1, вып. 1. С. 15–23.
5. *Секундов А. Н.* Применение дифференциального уравнения для турбулентной вязкости к анализу плоских неавтомодельных течений. МЖГ. 1971. №5. С. 114–127.
6. *Мещеряков Е. А., Левин В. М., Сабельников В. А.* Расчетное и экспериментальное исследование горения струи водорода в спутном сверхзвуковом потоке воздуха в канале. Труды ЦАГИ. 1983. Вып. 2193. 36 с.
7. *Годунов С. К., Рябенький В. С.* Разностные схемы: введение в теорию. М.: Наука, 1973. 400 с.
8. *Тимошенко В. И., Дешко А. Е.* Численное моделирование истечения сверхзвуковой многокомпонентной химически-реагирующей струи продуктов сгорания ракетного двигателя. Космічна наука і технологія. 2017. Том 23, №6. С 3–11
9. *Глушко Г. С. Иванов И. Э., Крюков И. А.* Моделирование турбулентности в сверхзвуковых струйных течениях. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. URL: www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-023.pdf.
10. *Seiner J. M., Norum T. D.* Experiments of shock associated noise on supersonic jets. AIAA. 1979. Pap. 79–1526.

Получено 21.11.2018,
в окончательном варианте 18.12.2018