

УДК 519.673:533.6.011

С.С. ЛЕВИН, А.В. ЛОЯН, Ю.К. ЧЕРНЫШЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ «ТВЕРДЫХ» СФЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОЙ АВТОМАТНОЙ МОДЕЛИ

Приведена постановка задачи имитационного моделирования газодинамических процессов в канале СПД в предпусковом состоянии. Предложен метод решения поставленной задачи с использованием модели твердых сфер и БА-модели. Проведено сравнение результатов расчетов простейшей задачи предложенным методом и в системе AnSYS. Приведены сравнительные графики распределения измеренной и рассчитанной предложенным методом концентрации ксенона на протяжении канала СПД.

метод «твердых» сфер, БА-модель, СПД, сеточные методы, электрореактивный двигатель, дискретно-событийное моделирование, имитационная модель

Введение

Современные тенденции развития ракетно-космических технологий предполагают расширение областей применения электрореактивных двигателей (ЭРД), причем одним из наиболее быстро развивающихся направлений является разработка и применение холловских двигателей малой мощности. Такие двигатели обладают рядом преимуществ по сравнению с остальными типами электрореактивных двигателей, из-за которых их и используют в системах коррекции орбиты космических аппаратов.

При теоретических и прикладных исследованиях холловских двигателей малой тяги необходимо проведение множества дорогостоящих полномасштабных экспериментов. Применение численного моделирования позволяет уменьшить их количество. Современные двумерные модели дают возможность исследовать многие параметры ЭРД, что позволяет предсказывать их ресурс, оптимизировать конфигурацию и повышать КПД [1]. В данной работе предлагается метод расчета кинетических газодинамических параметров тока рабочего тела в канале стационарного плазменного двигателя (СПД) в предпусковом состоянии с использованием аппарата дискретно-событийного имитационного моделиро-

вания, реализованного в виде программного комплекса.

Постановка задачи. Рассчитать распределение концентрации ксенона в СПД-20 (рис. 1 [12]) в предпусковом состоянии при массовом расходе 0,3 мг/с.

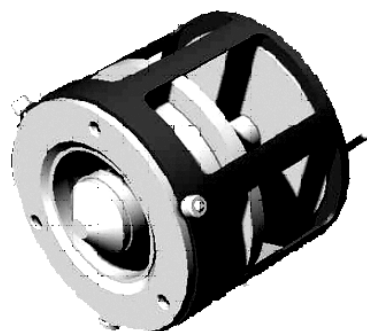


Рис. 1. Общий вид СПД-20

1. Обоснование выбора метода решения задачи

Характерный размер канала двигателя СПД-20 составляет 2 см. Для выбора метода моделирования необходимо определить вид течения. Для этого оценим длину свободного пробега частицы ксенона при указанном расходе. При таком расходе характерная концентрация ксенона в канале равна $2,5 \times 10^{19} \text{ 1/м}^3$. Радиус Ван-дер-Ваальса для ксенона равен $416 \times 10^{-12} \text{ м}$ [2]. Расчетная длина свободного [3]

пробега в этом случае составляет 2 см. Следовательно, число Кнудсена [2] при таком течении равно единице. Согласно диаграмме Ченя [4], это течение является течением со скольжением.

Согласно [4], применение расчетов с использованием уравнения Навье-Стокса для этого типа течения связано с определенными трудностями.

Для расчета и моделирования течений со скольжением предлагается использовать метод молекулярной динамики, в котором газ представлен в виде совокупности модельных частиц [5]. Существуют два основных подхода к моделированию газа с использованием модели твердых сфер [6]:

- дискретно-временное моделирование;
- дискретно-событийное моделирование.

2. Решения задачи моделирования течения со скольжением

При использовании дискретно-событийного подхода к моделированию газодинамических процессов методом твердых сфер весь набор частиц рассматривается как система, в которой выделяются события [7]. Для моделирования дискретно-событийного перемещения частицы в пространстве предлагается использовать БА-модель [8]. Как показано в [9], БА-модель обладает максимальной производительностью при использовании подсистем. Предлагается строить трехмерную сетку [10], а полученные ячейки рассматривать как подсистемы моделирования. Расчеты на модели ведутся с использованием модельных величин. Очевидно что при моделировании таких течений, необходимо учитывать теплообмен со стенками рабочей области. Расчет теплообмена предлагается вести с сохранением тангенциальной составляющей скорости и с учетом коэффициента аккомодации.

2.1. Сравнение результатов предлагаемого метода и результатов расчетов на модельном примере. Для верификации предложенной модели течения газа с использованием дискретно-событийной

БА-модели поставлен ряд численных экспериментов. Одним из экспериментов было исследование сверхзвукового течения в расширяющейся трубе, эскиз которой показан на рис. 2.

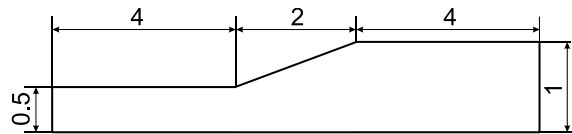
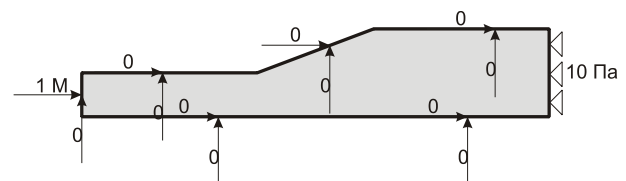


Рис. 2. Модель расширяющейся трубы (размеры указаны в мм)

Граничные условия для постановки эксперимента показаны на рис. 3. Обозначения соответствуют принятым в AnSYS 8.0 [11].



- Составляющая скорости, параллельная оси абсцисс
- ↑ Составляющая скорости, параллельная оси ординат
- ◁ Давление

Рис. 3. Граничные условия моделируемого течения

Расчеты в системе AnSYS проводились со следующими параметрами: модуль расчета течений Flotran CFD; конечный элемент FLUID141; тип жидкости AIR-SI; справочное давление 10 Па; отношение $\frac{C_p}{C_v} = 1,4$; номинальная (nominal), торможения (stagnation) и опорная (reference) температуры равны 293К. Кроме указания граничных параметров, в процессе расчетов производилось подавление отрицательных элементов на главной диагонали матрицы, приводящих к возникновению отрицательных плотностей. Для этого подавления была использована стабилизация по давлению со значением 9,99. Подавление отрицательной температуры проводилось с использованием искусственной вязкости, значение которой равно 450. В результате расчетов на 10000 шагах было получено распределение чисел Маха, изображенное на рис. 4.

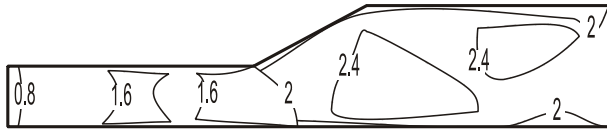


Рис. 4. Распределение чисел Маха, рассчитанное в системе AnSYS 8.0

Рассчитаем число Рейнольдса для исследуемого течения:

$$Re = \frac{M}{Kn} \cdot 3, \quad (1)$$

где M – число Маха;

Kn – число Кнудсена.

При расчетном $Kn = 0,0025$ (расчетная длина свободного пробега $2,5 \times 10^{-5}$ м и характерный размер 1×10^{-2} м) получим $Re = 1200$.

Таким образом, результаты расчетов, полученные в системе AnSYS являются достоверными. Число Рейнольдса менее 3000, что соответствует требованиям в сопровождающей документации, а число Кнудсена меньше единицы, что соответствует требованию сплошности среды.

При моделировании течения методом частиц совместно с БА-моделью использовались следующие параметры: радиус частиц – 30 мкм, количество частиц – 200000. Геометрические параметры модели те же, что и для расчетов в AnSYS. Теплообмен не учитывался. В результате расчетов получено распределение чисел Маха, изображенное на рис. 5.

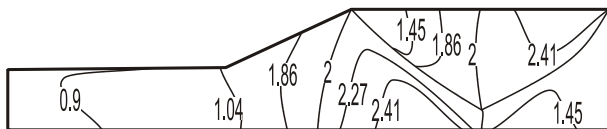


Рис. 5. Распределение чисел Маха, рассчитанное предлагаемым способом

Как видно из приведенных рисунков, значения чисел Маха в характерных местах совпадают с точностью 5,4%, что свидетельствует о достаточно хорошей согласованности результатов. Очевидно, что при увеличении числа Кнудсена предлагаемый метод будет давать более точные результаты (вплоть до свободно-молекулярного течения).

2.2. Применение дискретно-событийной модели при исследовании распределения концентраций ксенона в канале СПД в предпусковом состоянии. Для моделирования течения ксенона в канале СПД построена его трехмерная модель (рис. 6).

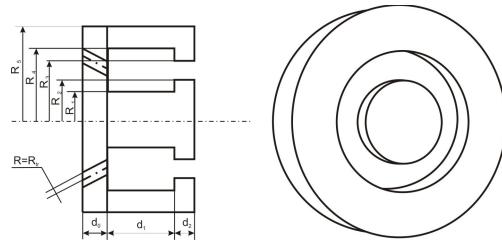


Рис. 6. Модель СПД

При моделировании влет частиц в модельную область осуществляется через специальные области впрыска, показанные на рис. 6 наклонными отверстиями, и задается периодичностью влета в модельном времени. По истечении интервала модельного времени с дискретностью $t_{\text{влета.м}}$ в случайной точке области впрыска со случайным номером создается частица с модельной скоростью.

Одной из проблем моделирования газового потока в канале СПД является моделирование впрыска модельных частиц газа в рабочую область. Целью является получение распределения скоростей в области впрыска непосредственно в процессе моделирования, в отличие от его априорного задания при прямом моделировании методом Монте-Карло[13].

При решении этой проблемы опробовано три подхода построения дополнительных камер в областях впрыска. Наилучшей из апробированных конфигураций области впрыска как с точки зрения скорости расчетов, так и обеспечения непересечения частиц при вылете, оказалась конфигурация, показанная на рис. 7.



Рис. 7. Область впрыска в виде барабана

Эта область состоит из множества трубок, расположенных так, что окружность, описанная вокруг них, будет иметь радиус, равный радиусу отверстия впрыска реального двигателя. Область впрыска размещается с учетом указания углов расположения отверстия впрыска в реальном двигателе, как показано на рис. 8

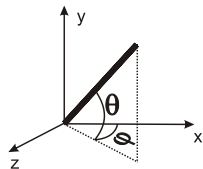


Рис. 8. Построение области впрыска модели относительно оси отверстия впрыска реального двигателя

Описанный метод использован при моделировании газодинамических процессов СПД-20 в предпусковом состоянии, т.е. исследовано поведение нейтральных частиц. Разработан программный комплекс моделирования, состоящий из двух программ: программы построения триангуляционной модели двигателя и программы моделирования газового потока.

Исходными параметрами для моделирования являются: массовый расход, периодичность влета частиц в систему, максимальное количество модельных частиц в системе, температура поступающего газа, температура стенок, коэффициент аккомодации и радиус модельной частицы.

Максимальное количество частиц в системе и радиус частиц влияют на длину свободного пробега и тягу двигателя (как верификационные параметры).

Радиус модельной частицы подбирался экспериментально. Проведено четыре эксперимента с радиусами модельных частиц 10, 7, 4 и 3 мкм и количеством частиц 450000 для 3 мкм и 300000 для остальных радиусов. При изменении радиуса адекватность модели оценивалась по длине свободного пробега, который должен равняться 2 см. Наиболее адекватный результат получен с радиусом модельной частицы 3 мкм и количеством частиц 450000. При этом получены значение тяги двигателя и сред-

няя длина свободного пробега 2 см, соответствующие как экспериментально измеренной тяге, так и расчетной длине свободного пробега частицы в канале. Сравнение распределений концентраций ксенона на протяжении канала, рассчитанных предлагаемым методом, с результатами реальных измерений, проведенных предыдущими исследователями для двигателя с той же плотностью потока, проиллюстрировано на рис. 9 и 10.

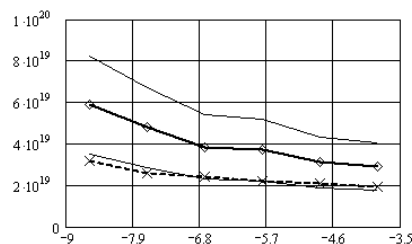


Рис. 9. Распределения для измерений продольно-ориентированным зондом

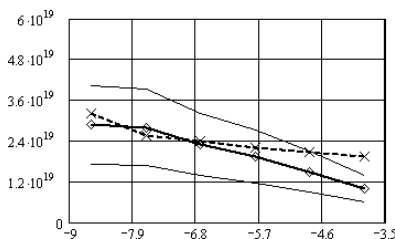


Рис. 10. Распределения для измерений радиально-ориентированным зондом

Сплошные линии на рис. 9 и 10 соответствуют пределам погрешности $\pm 40\%$, линия $\times-\times$ — соответствует расчетной концентрации, а линия $\diamond-$ — концентрации, полученной в результате измерений. Анализ графиков свидетельствует о соответствии расчетных и измеренных концентраций на протяжении канала.

Заключение

Таким образом, при проверке предлагаемой модели уже 200000 частиц оказалось достаточно для получения результатов, совпадающих с полученными методом конечных элементов в системе AnSYS. Повышение количества частиц позволяет получать более точные результаты. Реализация предложенного метода на P4 2ГГц с ОЗУ 1Гб уже позволяет вес-

ти расчет для 500000 частиц за приемлемое время, причем, в отличие от AnSYS, без участия оператора в процессе расчетов.

Программный комплекс для расчета параметров СПД в предпусковом состоянии, реализующий описанную методику, позволяет проводить расчет с изменением любого параметра двигателя – от радиуса и угла наклона отверстий впрыска ксенона до массового расхода и температуры двигателя.

Литература

1. Sergey V. Irishkov, Oleg A. Gorshkov, Andrey A. Shagayda. Fully Kinetic Modeling of Low-Power Hall Thrusters //The 29th International Electric Propulsion Conference.– Princeton University. – 2005. – IERC-2005-035. – P.1-15
2. Берд Г. Молекулярная газовая динамика. – М.: Мир, 1981. – 313 с.
3. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. – М.: Высш. шк., 1965. – 291 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов. – М: Наука, 1973. – 676 с.
5. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: Пер с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
6. Кельтон В., Лоу А., Имитационное моделирование. Классика CS: 3-изд. – С.-Пб.: Питер; К.: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
7. Чернышев Ю.К. Прямое моделирование течения газа в каналах сложной формы при малых числах Кнудсена // Междунар.НТК «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Х.: Ин-т проблем машиностроения НАН Украины, 1997. – С. 238-240.
8. Левин С.С. Имитационное моделирование с использованием бинарной автоматной модели // Радиоэлектронные и компьютерные системы: научн. техн. жур. – 2005. – № 2. – С. 69-78.
9. Левин С.С. Оценка эффективности бинарной автоматной модели для имитационного моделирования систем с большим количеством взаимодействующих объектов // Авиационно-космическая техника и технология: Науч. техн. журн. – 2005. – № 3 (19). – С.77-82.
10. Левин С.С. Построение трехмерной сетки тока при моделировании течения газа методом твердых сфер с использованием БА-модели // Материалы Междунар. науч.-практ. видео-интернет конф. «Наука и инновации 2005». – Днепропетровск: Наука і освіта, 2005. – С. 51-55.
11. AnSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ansys.com
12. Максименко Т.А., Лоян А.В., Кошелев Н.Н. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мини и микроспутников // Авиационно-космическая техника и технология: Науч. техн. журн. – 2005. – № 9 (25). – С. 140-144.
13. Захаров В.В. Параллельное прямое моделирование Монте-Карло неравновесного истечения в вакуум струй газа // Вестник молодых ученых. Сер. Прикладная математика и механика. – 1999. – № 1. – С. 104-110.

Поступила в редакцию 7.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.