

тепловую модель (например, ANSYS ®) для расчета и моделирования эффектов тепло- и массопереноса.

Выводы

Использование современных короткодуговых ламп вместе с рациональным построением светооптической схемы имитатора солнца позволяет с высокой точностью воспроизводить облучение КА. В дополнение к этому, программные средства для расчета хода лучей позволяют на стадии проектирования создавать точные расчетные модели, позволяющие установить степень соответствия облучения КА в планируемом тепло-вакуумном эксперименте его реальному облучению на орбите. Кроме того, такие модели позволяют более точно смоделировать величины радиационных теплопритоков к криогенным панелям, что, в свою очередь, позволяет более точно сформулировать требования к криогенной системе.

Литература

1. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, ASTM standard, Designation E 490 - 00a

Распределение концентрации в собственной атмосфере космического аппарата при наличии течи

Л.Н. Розанов, А.Ю. Скрябнев

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29*

Рассматривается теоретическое и экспериментальное определение распределение концентрации остаточных газов в собственной атмосфере космического аппарата при наличии точечной течи. Внешняя поверхность корпуса считается свободной от дополнительной аппаратуры. Экспериментальное исследование проводится при помощи вычислительного эксперимента методом статистических испытаний. Показано, что распределение концентраций зависит от четвертой степени расстояния до места течи. Теоретические результаты хорошо совпадают с вычислительным экспериментом.

Concentration distribution in the own atmosphere of the space apparatus with a leak. L.N.Rozanov, A.Y.Scrybnev. Theoretical and experimental investigation of the concentration distribution in the own atmosphere of the space apparatus with a point leak is presented. The experimental investigation was made with the Monte-Carlo method. It is stated that concentration distribution depends on the fourth degree of the distance to the place of the leak. Theoretical results coincide with calculation experiment.

Введение

Теоретическое определение распределения концентрации газа в собственной атмосфере космического аппарата (КА) при различных режимах течения газа рассматривалось в работах [3,4]. Мониторингу герметичности Международной космической станции (МКС) посвящены работы [1,2,5,6]. При возникновении течи в КА происходит истечение газа из внутреннего объема КА в космос. Давление в собственной атмосфере КА составляет для МКС $10^{-5} \dots 10^{-6}$ Па. При таких давлениях течение газа, выходящего из КА в космос, будет осуществляться в молекулярном режиме.

В данной работе теоретические результаты определения распределения концентрации газа в собственной атмосфере КА при истечении газа из точечной течи в молекулярном режиме

проверяются экспериментальным исследованием такой же задачи методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Движение отдельных молекул разреженного газа описывается законами статистической физики. Проследив траектории достаточно большого количества молекул, можно получить наглядную картину течения газа и вычислить требуемые параметры распределения.

1. Теоретическое исследование

При молекулярном режиме течения, вероятность вылета молекул с поверхности равна удвоенному произведению относительного телесного угла на косинус угла между нормалью к поверхности и направлению вылета (рис. 1) [7]

$$dP = \cos \gamma d\omega / \pi \quad (1)$$

$$d\omega = dS \cos \gamma / R^2 \quad (2)$$

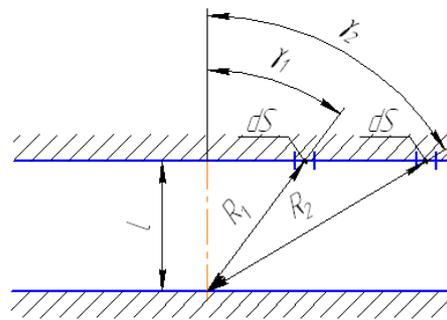


Рис. 1. Схема вылета молекулы из плоского источника.

Тогда для плоскости расположенной на расстоянии l от поверхности вылета вероятность попадания молекулы на площадки dS , расположенные на расстоянии R_1 и R_2 :

$$dP_{R_1} = \frac{\cos^2 \gamma_1}{\pi R_1^2} dS \quad (3)$$

$$dP_{R_2} = \frac{\cos^2 \gamma_2}{\pi R_2^2} dS \quad (4)$$

С учетом того, что $\cos \gamma = l/R$, отношение (3) и (4) можно записать как:

$$\frac{dP_{R_1}}{dP_{R_2}} = \frac{\frac{l^2}{R_1^2 \pi R_1^2} dS}{\frac{l^2}{R_2^2 \pi R_2^2} dS} = \frac{R_2^4}{R_1^4} \quad (5)$$

При молекулярном режиме течения концентрация газа в точке, прямо пропорциональна вероятности попадания молекул. Таким образом, согласно (5) концентрация газа при молекулярном режиме обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до места течи.

2. Моделирование методом Монте-Карло

Моделирование осуществляется в прямоугольной трехмерной системе координат. Частица вылетает из точки с координатами (0;0;0). Параметрами, характеризующими полет частицы, являются углы φ и θ . (рис 2).

При вылете молекул из точечного плоского источника, вероятность вылета пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением вылета [7]. Для соблюдения этого правила угол θ необходимо вычислять по следующей формуле:

$$\theta = \arcsin \sqrt{\xi} \quad (6)$$

Угол φ может быть произвольным, следовательно:

$$Fi = 2 \cdot \pi \cdot \nu \quad (7)$$

Случайные числа ξ и ν равномерно распределены на отрезке $[0;1]$ и должны определяться с помощью датчика случайных чисел.

Результаты моделирования рассматриваются как распределение концентрации следов траекторий молекул по плоскости. (рис.2). Исследуется плоскость радиуса R , параллельная плоскости xu и установленная на высоте H от плоскости вылета частиц. Данная плоскость разбивается на Nsh_p колец, центр которых лежит в точке $(0;0;H)$, с шагом Sh_p . Таким образом, для i -го кольца внутренний диаметр равен $(i-1) \cdot Sh_p$, а внешний $i \cdot Sh_p$. Для каждой запущенной частицы вычисляется, в какое из колец она попадет.

В результате обработки всех частиц формируется массив $mass_p$, каждый элемент которого соответствует количеству частиц попавших в определенное кольцо плоскости.

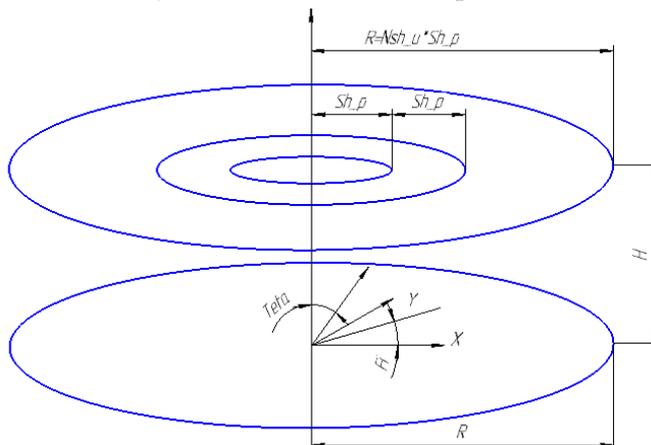


Рис. 2. Схема моделирования полета частицы.

После обработки всех частиц для каждого кольца вычисляется параметр NQ по формуле:

$$NQ_i = N_i / (S_i \cdot Nch_nom), \quad (8)$$

где N_i – число частиц попавших в i -е кольцо,

S_i – площадь i -го кольца,

Nch_nom – общее число запущенных частиц.

Параметр NQ отражает долю частиц попавших в определенное кольцо на единицу поверхности. Давление газа и концентрация прямопропорциональны значению параметра NQ .

2.1 Алгоритм моделирования

1. Ввод исходных данных.
2. Обнуление счетчика частиц, для которых произведен расчет.
3. Запуск частицы, с помощью ДСЧ задаются начальные параметры полета молекулы (углы Fi и $Teta$ по (7), (6)).
4. Сортировка. Определяется, в какое из колец расчетной плоскости попала частица. После этого запускается следующая частица и к счетчику частиц прибавляется единица.
5. Обработка результатов. На основании полученных массивов $mass_p$ и $mass_ud$ производится расчет параметра NQ по (8) и расчет давлений. Полученные результаты записываются в отдельные файлы, которые можно использовать для построения графических зависимостей.

Для определения параметра NQ было произведен расчет со следующими исходными данными:

Радиус исследуемой поверхности, $R = 10000$ мм;

Высота установки плоскости над поверхностью ЭВТИ, $H = 2000$ мм;

Количество шагов при исследовании плоскости, $Nsh_p = 500$;

Количество испытаний, $Nsh_p = 10000000$.

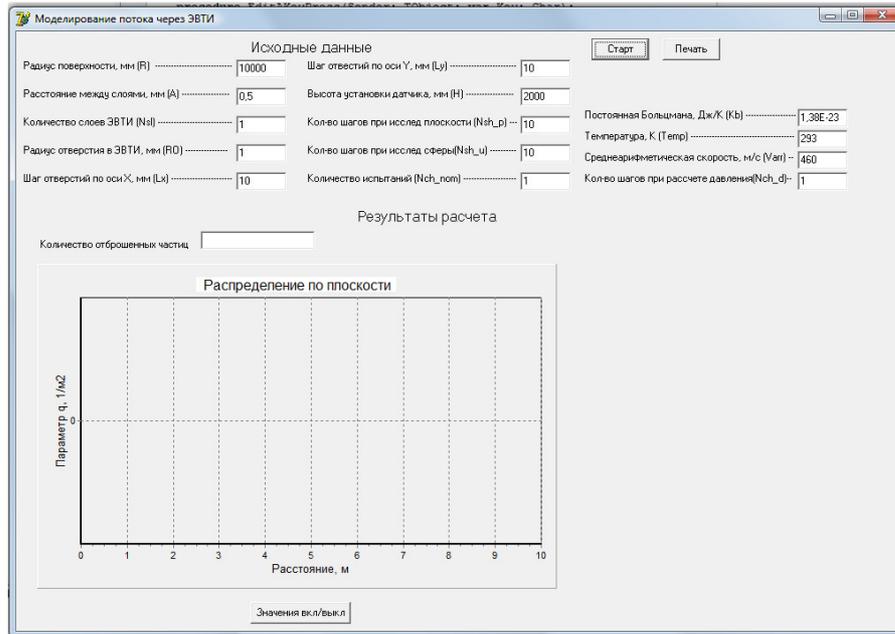


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы моделирования.

Пользовательский интерфейс показан на рис.3, а результаты моделирования представлены на рис. 4.

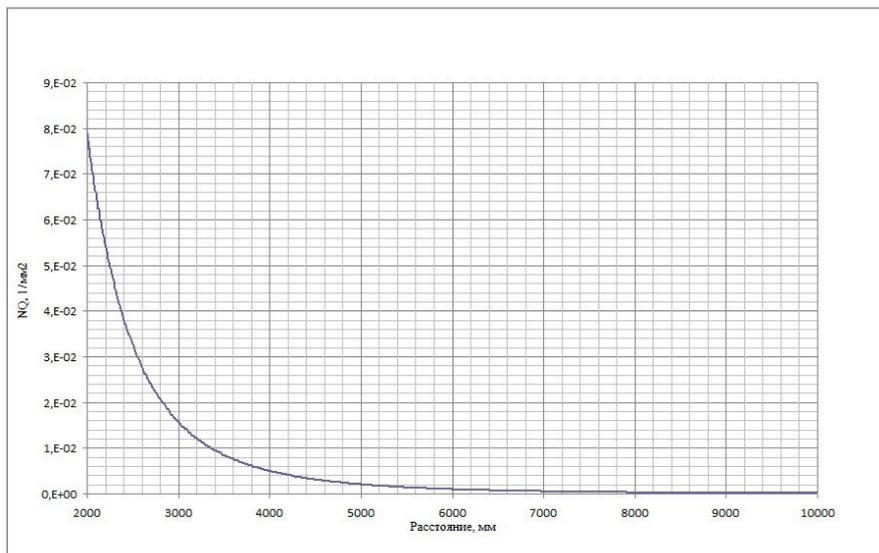


Рис. 1. Распределение молекул для H = 2000 мм.

Аппроксимация зависимости, показанной на рис. 4 методом наименьших квадратов к виду $NQ(x)=ax^n$ дает выражение $NQ(x)=10^{12}x^{-3,999}$, где x – расстояние от течи до точки измерения параметра NQ . При этом величина достоверности аппроксимации $R^2=1$. Величина достоверности аппроксимации рассчитана с помощью выражения:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^2) - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n}} \quad (9)$$

где Y_i – значения, полученные в результате моделирования, \bar{Y}_i – аппроксимированные значения. Таким образом, при моделировании молекулярных потоков результаты полученные аналитически (выражение (5) и методом Монте-Карло ($NQ(x)=10^{12}x^{-3,999}$) хорошо согласуются между собой.

3. Заключение

При определении распределения концентрации газа в собственной атмосфере КА, возникающей при наличии течи в его корпусе, показано, что концентрация и давление газа зависят в четвёртой степени от расстояния до места течи. Результаты полученные с помощью аналитических расчетов и с помощью моделирования хорошо согласуются. Мониторинг герметичности КА может осуществляться непрерывным анализом показаний вакуумметрических датчиков, расположенных на внешней поверхности КА.

Литература

1. Андропова Т.П. Опыт разработки и эксплуатации систем контроля давления и герметизации для обитаемых космических аппаратов. НТВ СПбГТУ, 2000, № 4, С. 25-28.
2. Рабинович Б.А., Юревич Е.И. Системы измерения и контроля параметров газовых и жидких сред на космических аппаратах. – СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2014, 132 с.
3. Розанов Л.Н. Манометрический метод определения герметичности крупных объектов // Вакуумная техника и технология. Т. 19, № 3, 2009, С. 179-184.
4. Розанов Л.Н., Скрябнев А.Ю. Течение газа через круглый трубопровод при большом перепаде давления // Вакуумная техника и технология. – Т.20. №1.2010, С. 3-8.
5. Андропова Т., Ксенофонов В., Малейко Л. и Юревич Е. Опыт разработки и эксплуатации систем контроля давления и герметичности для обитаемых космических аппаратов НТВ СПбГТУ, (2000), 4, с.25-28.
6. Гапонов В.А., Розанов Л.Н., Ратушный Д.В., Дружинин В.Г. Мониторинг герметичности космического аппарата. Робототехника и техническая кибернетика (2016) 1(10).
7. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М, ВШ, 2007, 393стр.

Имитация климатических условий поверхности Марса при проведении тепловакуумных испытаний посадочного аппарата в термовакуумной камере

А.Ю. Кочетков,

г. Химки АО «НПО им. С.А. Лавочкина», kochetkov@laspace.ru

В статье рассматривается вопрос об имитации климатических условий поверхности Марса при наземной тепловакуумной отработке посадочного аппарата в универсальной термовакуумной камере.

Imitation of the climatic conditions of the Mars surface during the heat vacuum tests of the landing vehicle in the thermal vacuum chamber. A.Yu. Kochetkov. The article discusses the issue of imitating the climatic conditions of Mars during ground-based thermal vacuum testing of a landing vehicle in a universal thermal vacuum chamber.

Основная задача тепловакуумных испытаний космических аппаратов на этапе наземной экспериментальной отработки является проверка проектных решений. При этом проблема состоит в адекватном воспроизведении натуральных условий эксплуатации. Имеющиеся