

УДК 533.5+533.6

Молекулярный экран на космическом аппарате «ОКА-Т»*

А.В. Кашковский¹, П.В. Ващенко¹, А.Н. Крылов², Л.В. Мишина²

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²РКК «Энергия», Королев, Московская область

E-mail: sasa@itam.nsc.ru

Приведены результаты расчетных исследований параметров газа в зоне высокого разрежения, образованной за молекулярным экраном, установленным на космическом аппарате «ОКА-Т». Описана методика учета влияния вращения солнечных батарей на зону разрежения. Проведены оценки влияния струй собственных двигателей и газовыделения аппарата на зону разрежения.

Ключевые слова: молекулярный экран, вакуум, метод пробных частиц, метод прямого статистического моделирования.

Введение

Получение полупроводниковых устройств с высокой степенью чистоты (отсутствием примесей) напрямую зависит от уровня вакуума, в котором они создаются. Одно из перспективных направлений в создании вакуума для производства полупроводниковых устройств — использование молекулярного экрана на космических аппаратах (КА) [1, 2]. Молекулярный экран — это непроницаемая конструкция, которая устанавливается поперек вектора скорости КА, находящегося на орбите Земли. Поскольку скорость КА существенно больше тепловой скорости молекул, они не успевают «догнать» экран и за ним образуется зона глубокого разрежения. В этой зоне возможно размещение производственной установки или другой научной аппаратуры, требующей для работы глубокого вакуума.

Целью настоящей работы является проведение расчетных исследований обтекания КА «ОКА-Т» свободномолекулярным потоком с учетом газовыделения материалов внешних покрытий для определения условий эксплуатации научной аппаратуры в зоне высокого вакуума за защитным экраном. Несмотря на то, что проектные работы по данному КА в настоящий момент приостановлены, полученные результаты могут быть использованы при проектировании подобных КА.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-19-01375) с использованием ресурсов ЦКП Сибирского Суперкомпьютерного Центра ИВМиМГ СО РАН, информационно-вычислительного центра Новосибирского государственного университета и суперкомпьютерного центра «Ломоносов» Московского государственного университета.

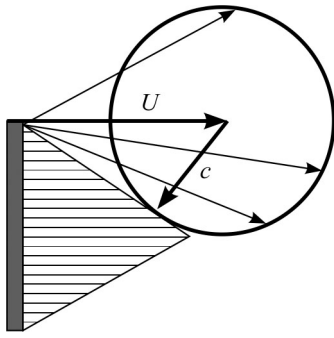


Рис. 1. Молекулярный экран.

1. Молекулярный экран

На орбите Земли атмосфера сильно разрежена, но для производства полупроводниковых приборов даже этой разреженности недостаточно. Увеличить разреженность можно с помощью молекулярного экрана. Предположим, что плоский геометрический элемент (экран) движется в газе со скоростью, в несколько раз превышающей среднюю тепловую скорость молекул. Отно-

сительно экрана вектор скорости каждой молекулы будет складываться из векторов скорости экрана \vec{U} и индивидуальной скорости молекулы \vec{c} (см. рис. 1). Для подавляющего числа молекул $U > c$, т.е. они не могут «догнать» экран, и за ним образуется зона затенения (заштрихованная область на рис. 1). Максимальный угол, на который молекула, пролетевшая вблизи кромки экрана, отклоняется к оси течения, составляет $\phi = \arcsin(c/U)$.

Тепловая скорость молекул описывается функцией распределения Максвелла, которая применительно к одной из проекций вектора скорости запишется в виде

$$f(v_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi}c'} \exp\left\{-\left(\frac{v_i}{c'}\right)^2\right\}, \quad c' = \sqrt{2kT/m}, \quad (1)$$

где v_i — проекция вектора тепловой скорости на координатную ось i , $f(v_i)$ — функция распределения скорости v_i , c' — наиболее вероятная тепловая скорость, $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана, Дж/К; m — масса молекулы, T — температура.

На рис. 2 представлена максвелловская функция распределения скоростей для различных компонентов атмосферы для температуры $T = 1032$ К, соответствующей высоте 350 км по модели атмосферы [3]. Видно, что с увеличением массы молекулы доля быстрых молекул существенно уменьшается. На скоростях выше 7–8 км/с, что соответствует орбитальной скорости, непосредственно за экраном практически могут оказаться только легкие компоненты — атомарный водород и гелий. Таким образом, для исследования течения за экраном невозможно моделировать газ молекулами одного типа с усредненной массой, а необходимо рассматривать каждый компонент атмосферы.

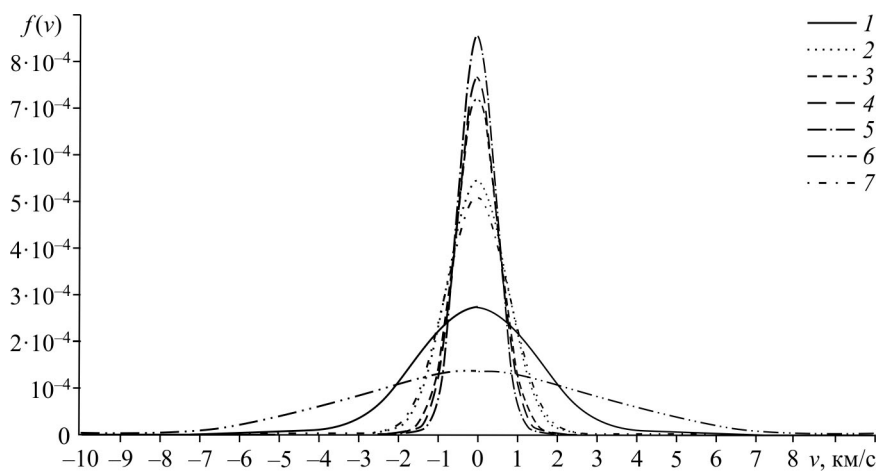


Рис. 2. Функция распределения скоростей Максвелла.

1 — He, 2 — O, 3 — N₂, 4 — O₂, 5 — Ar, 6 — H, 7 — N.

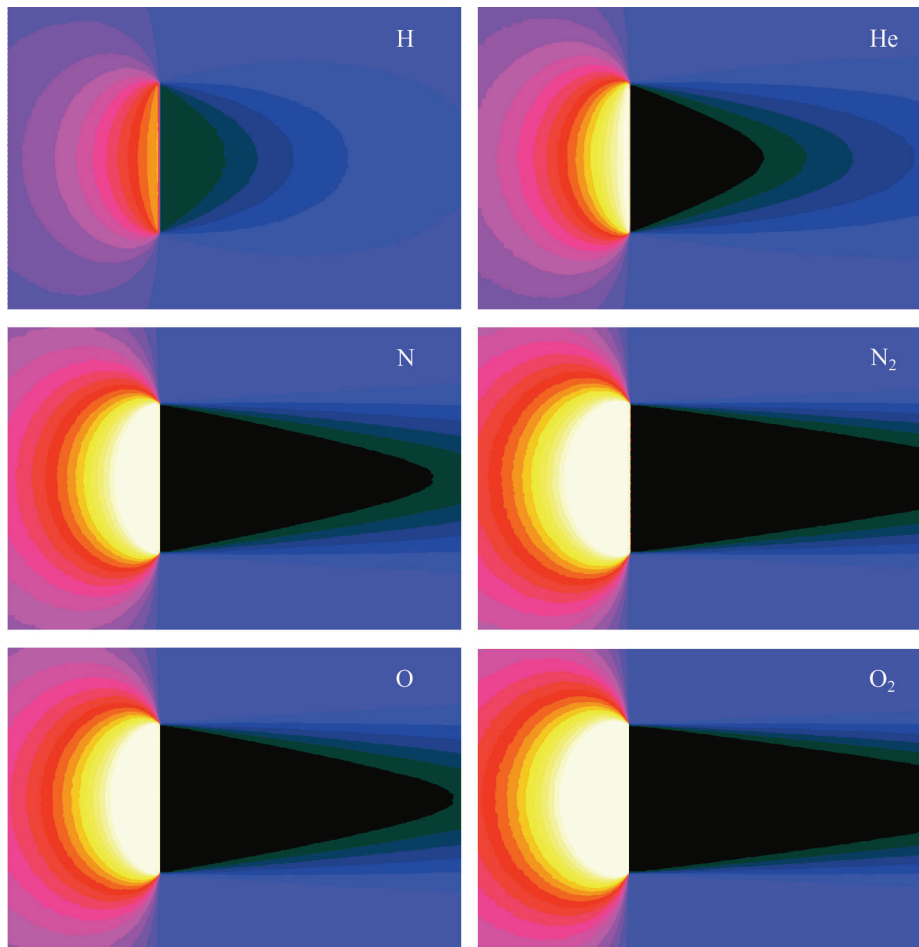


Рис. 3. Относительная парциальная плотность для разных компонентов атмосферы.

Движение КА на орбите происходит в свободномолекулярном режиме течения, при котором столкновения между молекулами отсутствуют, компоненты атмосферы не влияют друг на друга и могут рассматриваться независимо. На рис. 3 представлена плотность основных компонентов атмосферы, отнесенная к плотности компонента в набегающем потоке ($\bar{\rho}_i = \rho_i / \rho_{i\infty}$) за «идеальным» экраном (плоским экраном, без дополнительных конструкций). Скорость набегающего потока составляет 8000 м/с, температура — 1000 К. Видно, что чем больше масса молекул, тем больше зона разрежения. Суммарная плотность в любой точке пространства может быть получена как

$$\rho = \rho_{\infty} \cdot \sum_i^{N_c} \bar{\rho}_i C_i,$$

где ρ_{∞} — значение плотности в набегающем потоке, N_c — число компонентов атмосферы, $\bar{\rho}_i$ — парциальная плотность компонента, C_i — массовая концентрация компонента в набегающем потоке.

2. Постановка задачи

На больших космических станциях, таких как Международная космическая станция (МКС), сложно создать условия для проведения экспериментов в условиях сверхвысокого вакуума. Собственная внешняя атмосфера станции, работа двигателей,

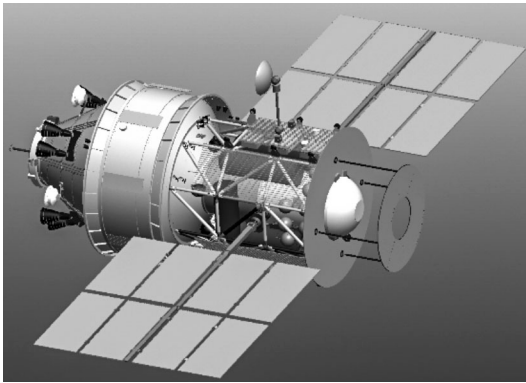


Рис. 4. Концептуальный вид КА «ОКА-Т».

выбросы из дренажных систем, отражение газов между поверхностями препятствуют созданию вакуума за молекулярным экраном. Таких недостатков частично лишены небольшие, автономные КА, не имеющие разветвленной конструкции и позволяющие исключить выбросы газов за период проведения эксперимента. Проект такого КА «ОКА-Т» [4] разрабатывался несколько лет назад в РКК «Энергия»

(см. рис. 4). Концепция этого аппарата подразумевает, что он предназначен для эксплуатации в составе МКС. Эксперименты предполагается проводить в автономном полете на достаточно большом расстоянии от МКС, исключая ее влияние на условия экспериментов. Периодически аппарат будет пристыковываться к МКС для замены образцов, оборудования, технического обслуживания, дозаправки топливом и т.д. Для создания зоны вакуума на КА имеются неподвижный большой экран и выдвижной малый экран (в правой части рис. 4). В центре малого экрана планируется размещение научной или производственной аппаратуры (на рисунке не показана). Целью исследования является определение размера вакуумной зоны и уровня разреженности в ней при различных условиях полета.

При проведении экспериментов в вакуумной зоне аппарат должен двигаться конической частью вперед. Поскольку двигатели причаливания и ориентации (ДПО) являются мощным источником струи молекул, в процессе производства полупроводников они должны быть выключены. Вследствие этого удерживать точную ориентацию КА достаточно затруднительно и он может двигаться с небольшими углами атаки и скольжения, а потому исследования должны быть проведены для различных вариаций углов атаки. На КА «ОКА-Т» установлены достаточно большие вращающиеся солнечные батареи (СБ). Необходимо оценить их влияние на вакуумную зону. Компьютерная модель КА показана на рис. 5.

Малый экран на модели изображен сплошным, без детализации аппаратуры в его центре. На рисунке приведена система координат, в которой построена модель. Поскольку рабочий режим полета происходит конической частью вперед, то для удобства рассуждений принято, что угол атаки измеряется от оси $-X$. Углу атаки 0° соответствует течение вдоль оси X в приведенной на рисунке системе координат, при положительных углах атаки проекция вектора скорости потока на ось Y положительна.

Для оценки условий работы аппаратуры за защитным экраном необходимо выполнить следующие действия:

— определить плотность газа в вакуумной зоне, образованной малым молекулярным экраном в набегающем потоке, для каждого компонента атмосферы для вариации углов поворота СБ и углов атаки;

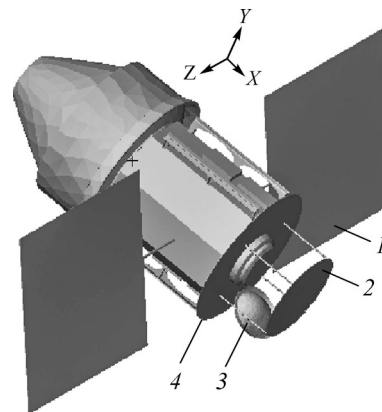


Рис. 5. Модель КА «ОКА-Т».

1 — СБ, 2 — малый экран, 3 — крышка люка выдвижной аппаратуры, 4 — большой экран.

Таблица
Параметры атмосферы в соответствии с MSIS-2000

Величина	Высота 350 км	Высота 400 км
Молекулярная масса, а.е.м.	16,856	16,1527
Плотность, кг/м ³	$1,04956 \cdot 10^{-11}$	$4,33552 \cdot 10^{-12}$
Числовая плотность, 1/м ³	$3,75098 \cdot 10^{-14}$	$1,61692 \cdot 10^{-14}$
Давление, Па	$5,34571 \cdot 10^{-6}$	$2,3101 \cdot 10^{-6}$
Температура, К	1032,27	1034,85
Средняя длина свободного пробега, м	2250,18	5385,45
Молярная/массовая концентрации компонентов, %		
He	1,878/0,446	3,549/0,879
O	87,721/83,267	89,952/89,102
N ₂	8,972/14,904	4,997/8,662
O ₂	0,203/0,386	0,092/0,183
Ar	0,001/0,002	0,0005/0,001
H	0,027/0,002	0,059/0,004
N	1,198/0,995	1,351/1,171

- найти оптимальный поворот СБ для увеличения зоны вакуума;
- определить влияние газовой выделения с поверхности КА на вакуумную зону;
- определить влияние рассеивания молекул набегающего потока в собственной внешней атмосфере КА;
- оценить воздействие на вакуумную зону струи газа из ДПО при их возможной работе.

Предполагается, что установка будет эксплуатироваться на высотах 350–400 км. Параметры атмосферы для высоты 350 и 400 км, полученные с использованием стандартной нейтральной атмосферы MSIS-2000 [3] для индекса солнечной активности $F10.7 = 150$, представлены в таблице.

Поскольку средняя длина свободного пробега молекул на этих высотах намного больше размера аппарата, течение является свободномолекулярным. Следовательно, все расчеты могут быть выполнены для каждого компонента независимо. Результаты расчетов представляются в безразмерном виде относительно параметров набегающего потока, что позволяет использовать их для разных орбит.

3. Методика расчета свободномолекулярного течения за экраном

Для моделирования свободномолекулярного течения с учетом тепловой скорости молекул наиболее оптимальным является метод пробных частиц Монте–Карло (ПЧМК) [5]. Он основан на статистическом анализе траекторий отдельных модельных частиц, движущихся подобно молекулам газа. В отличие от классической постановки метода ПЧМК [6–8], в предлагаемой реализации метода рассматривается только свободномолекулярное течение, где столкновения частиц с полевыми частицами отсутствуют.

Предполагается, что поток газа набегаем на неподвижную модель КА. Вокруг модели строится расчетная область в виде параллелепипеда, разделенная на ячейки равномерной сеткой. С граней расчетной области, пропорционально потоку газа через них, последовательно запускаются отдельные частицы. Скорость частиц разыгрывается в соответствии с максвелловской функцией распределения, точка старта частицы равномерно распределена по грани. Далее прослеживается движение частиц по ячейкам сетки. Если траектория частицы пересекает поверхность модели, то в точке пересечения осуществляется ее отражение в соответствии с заданным законом взаимодействия газа с поверхностью и изменение траектории. После того, как частица покидает расчетную область, запускается новая частица, и т.д. В каждой ячейке сетки накапливается время, за которое частица пересекла данную ячейку, компоненты скорости и квадрата скорости

частиц. Из этих параметров вычисляются плотность, скорость, температура и другие газодинамические параметры потока в каждой ячейке.

Метод Монте-Карло помимо расчета какой-либо величины позволяет получить погрешность, с которой эта величина вычисляется. Оценка погрешности вычисления плотности в вакуумной зоне была сделана для одного расчета для каждой ячейки вдоль линии, параллельной оси Z и пересекающей ось X на расстоянии 1 м от оси экрана. В этом расчете СБ считались развернутыми поперек потока, угол атаки принимался нулевым и использовался 1 миллиард пробных частиц. Вычисление погрешности проводилось по «пачкам»: все траектории были разбиты на 50 групп (пачек) с одинаковым числом траекторий, средняя плотность в каждой пачке использовалась в качестве случайной величины ζ_i , по этим величинам вычислялись математическое ожидание (M), дисперсия (D) и статистическая погрешность (δ) соответственно [9]:

$$M[\zeta] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_i,$$

$$D[\zeta] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\zeta_i - M[\zeta])^2 = M[\zeta^2] - M[\zeta]^2,$$

$$\delta = \sqrt{\frac{D[\zeta]}{n}},$$

где n — число «пачек».

На рис. 6 показаны значения относительной плотности и среднеквадратичное отклонение (погрешность). Видно, что за пределами СБ (расстояние более 9 м от оси в обе стороны) значение относительной плотности равно плотности в набегающем потоке, а погрешность составляет порядка 0,002. Учитывая «правило трех сигм», можно отметить, что относительная погрешность вычисления плотности в невозмущенном потоке составляет порядка 0,6 %.

Для улучшения пространственного разрешения ячейки в области за малым экраном дробятся в 10 раз по каждой координатной оси. На рис. 6 этой области соответствует диапазон от $-2,5$ до $2,5$ м. Объем раздробленных ячеек в 1000 раз меньше относительно их первоначального объема, следовательно, должны уменьшиться число частиц, побывавших в ячейке, и увеличиться погрешность. Однако поскольку для вычисления плотности используется время, которое частица провела в ячейке, а поток частиц в основном ориентирован вдоль оси X , дробление сетки вдоль оси X не оказывает существенного влияния на погрешность. Уменьшение размера ячеек пропорционально уменьшению времени нахождения частицы в ячейке, поэтому в раздробленных ячейках число частиц, побывавших в такой ячейке, в среднем уменьшается всего в 100 раз, а погрешность —

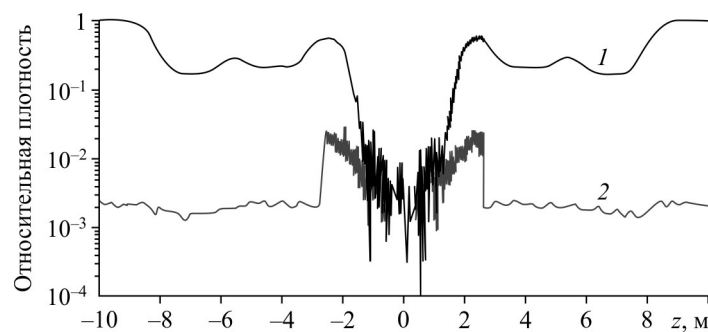


Рис. 6. Относительная плотность и статистическая погрешность.

в 10 раз, что видно на рис. 6 в окрестностях $\pm 2,5$ координаты Z . За экраном (в пределах ± 1 координаты Z) число траекторий (и, соответственно, плотность) существенно уменьшается, а погрешность возрастает и даже становится соизмеримой величине плотности.

Солнечные батареи существенно влияют на размер вакуумной зоны. Поскольку они имеют достаточно большую длину, область за экраном, из которой СБ оптически не видны (и соответственно экранированы от потока молекул), существенно меньше, чем вакуумная зона без СБ. Очевидно, что плотность в ячейке тем выше, чем больше частиц через нее пролетело. Если в ячейке не было ни одной модельной частицы, то плотность в ней равна нулю («численный вакуум»). Если в области «численного вакуума» пролетает единичная частица, то плотность в ячейках вдоль трассы незначительно, но отличается от нуля. Подбором уровней изолиний для визуализации можно выявить траектории отдельных частиц на фоне зоны «численного вакуума». Это хорошо видно на рис. 7, где представлено поле плотности (ρ) аргона, полученное методом ПЧМК. Здесь вакуумная зона имеет коническую форму с основанием, образованным большим экраном. Изолинии, исходящие с краев большого экрана, носят плавный характер, что говорит о достаточной статистической выборке. При этом за малым экраном заметны отдельные трассы частиц, которые, судя по наклону, попали в вакуумную зону, явно отразившись от поверхности СБ.

Для получения надежной статистической информации необходимо увеличивать число пробных частиц. Однако в реальности его невозможно увеличивать до бесконечности. На рис. 7 представлен результат, для расчета которого использовалось 10^8 частиц. Время расчета составляло порядка 6 часов. Увеличение числа частиц в N раз приведет к увеличению времени вычислений также в N раз, а статистическая погрешность уменьшится всего в \sqrt{N} раз. Очевидно, что для большого числа расчетов такой способ улучшения статистики непригоден.

Существенно улучшить статистику интерференционной (образованной за счет перетражения частиц между элементами КА) составляющей можно проведением расчетов в два этапа. На первом этапе проводится «обычный» расчет. Математическая модель СБ представлена набором треугольников. Для каждого треугольника определяется отношение попавших на него частиц к их общему числу. На втором этапе проводится «интерференционный» расчет. В соответствии с полученной пропорцией на треугольниках СБ запускаются частицы со скоростями, моделирующими диффузное отражение, которое зависит только от температуры СБ и не зависит от параметров набегающего потока. Частицы, моделирующие набегающий поток, не создаются.

Поскольку на СБ попадает только малая часть частиц набегающего потока (для расчета, приведенного на рис. 7, когда СБ ориентированы вдоль потока, на все поверхности СБ попало только 0,05 % частиц), то исключение из рассмотрения пролетающих мимо или попадающих на другие элементы КА частиц может улучшить статистику в сотни раз при том же числе пробных частиц. Такое разделение задачи можно рассматривать как метод расщепления

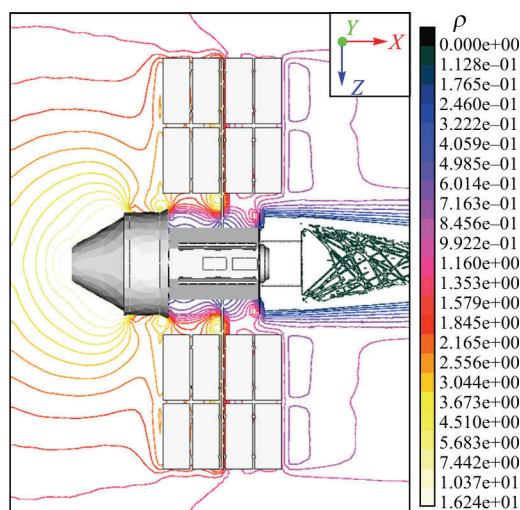


Рис. 7. Поле относительной плотности. Компонента Ar.

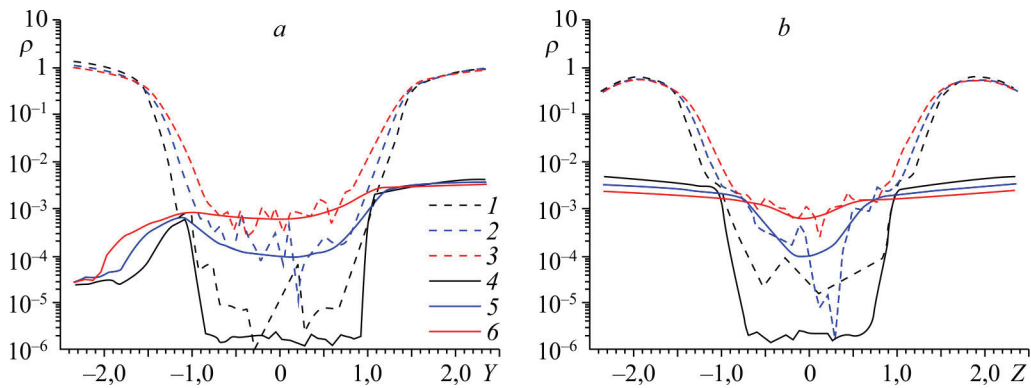


Рис. 8. Распределения плотности компонента О в сечениях поперек оси КА.

Пунктирные линии — результаты обычного расчета, сплошные линии — интерференционный расчет;
 а — $Z = 0$, б — $Y = 0$; $X = 0,06$ (1, 4), 0,5 (2, 5), 1 (3, 6).

или как особый случай весового метода Монте-Карло [10]. На рис. 8 приведено сравнение распределений плотности атомарного кислорода за экраном в разных поперечных сечениях, удаленных от плоскости малого экрана на 0,05, 0,5 и 1 радиуса малого экрана. Расчет проведен при нулевом угле атаки и угле поворота СБ 30° . Пунктирными линиями обозначены результаты обычного расчета, сплошными линиями — только за счет интерференции.

Видно, что, используя для оценки уровня вакуума результаты только обычного расчета, в зоне за экраном возможна ошибка на один–два порядка, в то время как использование результатов интерференционного расчета позволяет корректно сделать количественную оценку уровня вакуума и размера вакуумной зоны. Однако необходимо понимать, что применение результатов интерференционного расчета возможно только в затененной от потока области. За пределами экранированной зоны набегающий поток вносит более существенный вклад. Поэтому, анализируя результаты для каждого сечения, следует оценить, на каком расстоянии от оси необходимо использовать результаты интерференционного расчета, а на каком — обычного. К сожалению, количественная оценка этого расстояния затруднительна. Наиболее близкой является точка, в которой пересекаются (или достаточно близки) графики обычного и интерференционного расчетов. Так, для рис. 8 можно предположить, что в первом сечении интерференционный расчет дает правильные результаты в диапазоне ± 1 , во втором — $\pm 0,8$, в третьем — $\pm 0,6$ радиуса малого экрана.

4. Проведение вычислений

Исследования проводились в соответствии с методикой, изложенной в разделе 3. Сначала были проведены обычные расчеты с набегающим внешним потоком со скоростью 7500 м/с и температурой потока 1000 К. Вычисления проводились для семи компонентов атмосферы — He, O, N_2 , O_2 , Ar, H, N, четырех углов поворота СБ — 0° , 30° , 60° , 90° и девяти углов атаки — от -20° до 20° с шагом 5° . Расчеты для отрицательных углов атаки актуальны для углов поворота СБ 30° и 60° , так как при этом форма КА несимметрична. Таким образом, было проведено 252 расчета. В каждом из них использовался миллиард пробных частиц. Для такого большого количества частиц целесообразно применять параллельные вычисления, поэтому каждый расчет проводился на 16 процессорах Intel Xeon E5420 @ 2.50GHz в составе вычислительного кластера. Каждый расчет длился в среднем 74 минуты, всего на эту серию расчетов бы затрачено 4964 процессорно-часов (207 процессорно-суток). В результате проведенных расчетов были вычислены

потоки частиц на поверхность КА. Далее они использовались для проведения уточняющих интерференционных расчетов, в которых частицы стартовали только с поверхности СБ. Легкие компоненты (гелий и водород) имеют большую тепловую скорость и попадают в зону за экраном и на сам экран напрямую из внешнего потока. При этом влияние только интерференции на поле течения за экраном не столь существенно. Поэтому для гелия и водорода интерференционные расчеты не проводились. Поскольку распределение потока частиц является уникальным для каждой комбинации угла атаки и поворота СБ, интерференционные расчеты проводились для тех же углов атаки и поворота СБ, что и обычный расчет. В вычислениях также использовался миллиард частиц. Таким образом, было проведено $5 \times 4 \times 9 = 180$ расчетов, которые были выполнены за 3654 процессоро-часов (152 процессоро-суток). Соответственно, на расчеты всего цикла исследований понадобилось 359 процессоро-суток.

Использование миллиарда пробных частиц для уменьшения статистической погрешности привело к значительному увеличению времени вычислений. Это препятствовало увеличению расчетных точек, в частности, углов поворота СБ (всего 4 варианта). Но даже имеющееся количество расчетов (432) потребовало полностью автоматизировать процесс вычислений: создание начальных данных, запуск и контроль выполнения расчета, обработка результатов, выборка данных и даже создание рисунков проводилось специально созданными программами, работающими с серией расчетов. Это позволило избежать опечаток при подготовке начальных данных и получить результаты в едином стиле.

5. Влияние угла атаки и угла поворота СБ на вакуумную зону

Вычисления показали, что СБ с заданными габаритами (размах порядка 16 м, ширина более 4 м) и координатой оси вращения существенно уменьшают вакуумную зону. Это хорошо видно на рис. 9, где показано распределение плотностей компонентов, нормированных на плотность компонента в набегающем потоке (парциальная плотность) за малым экраном вдоль оси КА «ОКА-Т». Пунктирными линиями показано распределение плотности для изолированного экрана (при отсутствующих СБ). Размеры на этом и последующих рисунках указаны в метрах. Видно, что для компонентов О и N относительная плотность в вакуумной зоне составляет порядка $3 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$, а длина вакуумной зоны (где не зафиксирован пролет частиц) — порядка 2 метров. Для более тяжелых молекул (O_2 , N_2 , Ar) размер зоны составляет более трех метров. Для легких фракций (H, He) относительная плотность вблизи экрана значительно выше, и для He

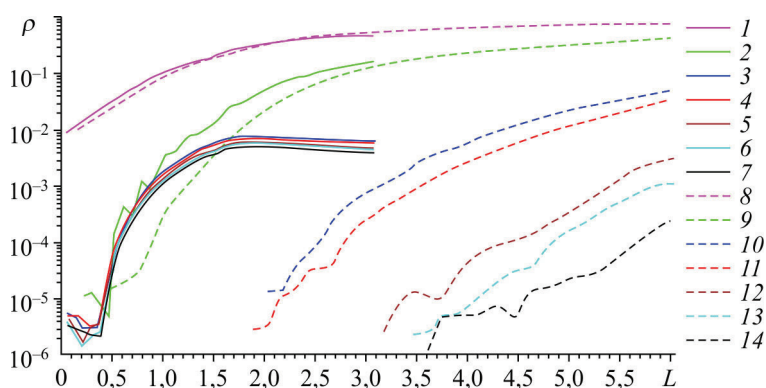


Рис. 9. Плотность компонентов за малым экраном вдоль оси при наличии СБ и без них.

При наличии СБ: H (1), He (2), N (3), O (4), N_2 (5), O_2 (6), Ar (7);
в отсутствии СБ: H (8), He (9), N (10), O (11), N_2 (12), O_2 (13), Ar (14).

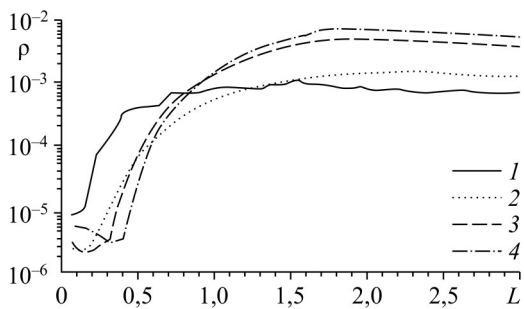


Рис. 10. Влияние угла поворота СБ на вакуумную зону.
0° (1), 30° (2), 60° (3), 90° (4).

величина порядка 10^{-5} достигается только вблизи экрана, а для Н можно понизить плотность максимум в 100 раз, используя молекулярный экран. Сплошными линиями показано аналогичное распределение, но уже с СБ, установленными поперек потока. Видно, что за счет потока молекул, отразившихся от СБ, относительная плотность вблизи экрана увеличилась на 2–3 порядка, а вакуумная зона значительно уменьшилась (до 0,4 м). Для тяжелых фракций распределение плотностей практически совпадает. Это происходит потому, что масса молекулы не влияет на распределение угла, под которым она отражается от поверхности. Следовательно распределение траекторий отраженных молекул одинаково, и вероятность попадания в какую-либо точку пространства за экраном зависит только от точки вылета молекулы с СБ и не зависит от массы.

В приведенном распределении СБ развернуты поперек потока и как бы создают дополнительный экран. В вакуумную зону попадают только те молекулы, которые оказались на поверхности КА (например, на большом экране), отразились на заднюю поверхность СБ и переотразились в направлении вакуумной зоны. Если СБ установлены параллельно потоку, то в вакуумную зону отражаются молекулы с обеих поверхностей СБ, на которые они попадают как из набегающего потока, так и отраженные от других элементов КА. Кроме того, при развороте СБ вдоль оси аппарата точка на оси КА, из которой малый экран полностью закрывает СБ, расположена всего в 0,14 м от плоскости экрана, и только на этом расстоянии молекулы, отразившиеся от СБ, не могут попасть в вакуумную зону. При повороте СБ ее края отодвигаются от плоскости экрана, что приводит к увеличению зоны, в которую не могут попасть отразившиеся от СБ молекулы. На рис. 10 показана относительная плотность за экраном для компонента О (на рассматриваемых высотах у него максимальная концентрация) для разных углов поворота СБ: угол 0° соответствует их положению вдоль оси КА, угол 90° — поперечному положению. Уменьшение плотности в 10^5 раз обеспечивается на углах поворота 60–90° при размере вакуумной зоны 0,3–0,4 м.

При изменении угла атаки вакуумная зона уменьшается как за счет скоса потока, так и за счет изменения числа молекул, попадающих на поверхность СБ. На рис. 11 представлено распределение плотности в зависимости от угла атаки для компонента О для углов поворота СБ 60° и 90°. При углах атаки менее 15° относительная плотность не превышает значения 10^{-5} , и размер вакуумной зоны не уменьшается.

На рис. 12 показана форма вакуумной зоны для разных углов поворота СБ при вариации угла атаки для компонента О. Для девяти углов атаки (в диапазоне от -20° до 20° с шагом 5°) построены изолинии плотности, равной 1 % от значения в набегающем потоке. Очевидно, что при положительных углах атаки изолинии смещаются вверх, а при отрицательных — вниз. Совокупность всех изолиний образует область, плотность в которой меньше 1 % для любого угла атаки. Представлены 4 варианта поворота СБ: 0°, 30°, 60°, 90°. На левой части рисунка изображены изолинии в плоскости симметрии, на правой — в сечении поперек оси аппарата позади малого экрана на расстоянии одного его радиуса (координата 6,9). Видно, что при угле поворота СБ, равном 0°, вакуумная зона практически отсутствует. Оценивая размер «пятна» на поперечном сечении, можно сделать вывод, что наибольшая зона вакуума реализуется для угла поворота СБ 30°.

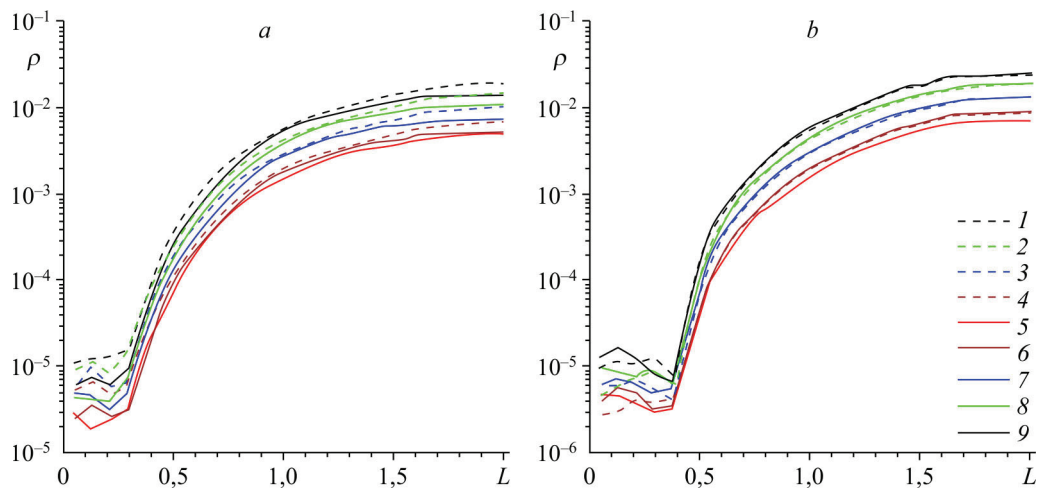


Рис. 11. Влияние угла атаки на распределение плотности компонента O.
a — угол поворота СБ 60°, *b* — угол поворота СБ 90°;
 углы атаки для O: -20 (1), -15 (2), -10 (3), -5 (4), 0 (5), 5 (6), 10 (7), 15 (8), 20 (9) град.

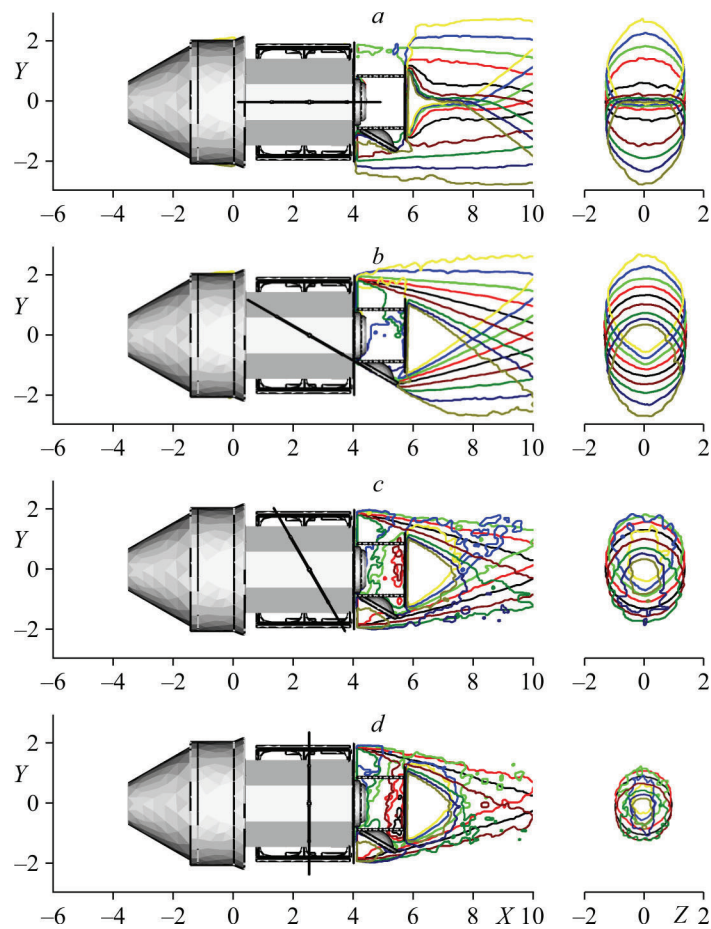


Рис. 12. Влияние угла атаки и угла поворота СБ на плотность за малым экраном.
 Поворот СБ: 0 (*a*), 30 (*b*), 60 (*c*), 90 (*d*) град.

Следует отметить, что существенную роль в формировании вакуумной зоны играет большой экран, который отсекает часть набегающего потока и молекулы, вылетающие с поверхности КА. На поперечных сечениях видно, что размер вакуумной зоны по изолинии составляет 1 % набегающего потока и практически равен размеру малого экрана. Малый экран обеспечивает еще большее уменьшение плотности.

Таким образом, СБ являются основным источником уменьшения вакуумной зоны. Для компонентов O, N, O₂, N₂, Ag возможно обеспечить уменьшение парциальной плотности до уровня 10⁻⁵ только в пределах 0,3–0,4 м от плоскости экрана. Для H и He в этой зоне плотность составляет соответственно порядка 0,02 и 2·10⁻⁵ от плотности в набегающем потоке. При этом угол поворота СБ должен находиться в пределах 30–60°, а угол атаки — в пределах ±15°. Крайне нежелательно использовать угол поворота СБ, равный 0° (вдоль оси аппарата).

6. Моделирование газовой выделения с поверхности

Поверхность любого КА постоянно испускает молекулы газа из-за неизбежных утечек последнего из гермоотсеков, диффузии из теплоизоляции, дегазации материала поверхности и т.д. Поэтому необходимо оценить влияние газовой выделения на вакуумную зону.

Материал экрана выбирается исходя из условия очень низкого газовой выделения. Основным источником газовой выделения являются неметаллические покрытия КА. Вылетев с корпуса КА, молекулы могут попасть на поверхность СБ и отразиться в сторону вакуумной зоны. Зная скорость потока, можно вычислить плотность вылетающих частиц и определить, во сколько раз она уменьшится в вакуумной зоне.

Процесс вылета молекул при газовой выделении полностью совпадает с диффузным отражением частиц при полной аккомодации энергии. Молекулы покидают поверхность в соответствии с максвелловской функцией распределения с температурой, равной температуре стенки. Испускаемые молекулы имеют только положительную ветвь функции распределения, так как молекул с отрицательными скоростями быть не может — это означало бы, что они движутся внутрь тела. Средняя скорость потока по нормали к поверхности составляет

$$U_n = \sqrt{2kT_w} / (m\pi), \quad (2)$$

где k — константа Больцмана, T_w — температура стенки, m — масса молекулы. Методом ПЧМК можно получить отношение плотности в вакуумной зоне к плотности в потоке газовой выделения. Поскольку скорость потока при газовой выделении известна (см. (2)), то, задавшись любой оценкой потока газовой выделения, можно получить плотность в вакуумной зоне.

Так как масса молекул при прочих равных условиях влияет только на скорость молекулы и не влияет на углы вылета и отражения, то вероятность попадания молекул любой массы в вакуумную зону при газовой выделении одинакова. При моделировании предполагалось, что частицы вылетают со средней части КА, причем точки старта распределены по поверхности равномерно; СБ повернуты поперек потока. Плотность газовой выделения принята равной плотности в набегающем потоке. Температура стенки $T_w = 300$ К. Увеличение плотности газовой выделения до реальных значений приведет к пропорциональному увеличению плотности в вакуумной зоне. На рис. 13а показано поле относительной плотности в плоскости XOZ, проходящей через ось вращения СБ. Видно, что вдоль СБ (изображение повернуто на 15° вокруг оси Z) плотность падает в десятки раз. На рис. 13б линией 1 представлено распределение относительной плотности в вакуумной зоне за счет газовой выделения. Эта плотность во много раз ниже, чем от набегающего потока (линия 2). Полученный результат явился несколько неожиданным, так как предполагалось,

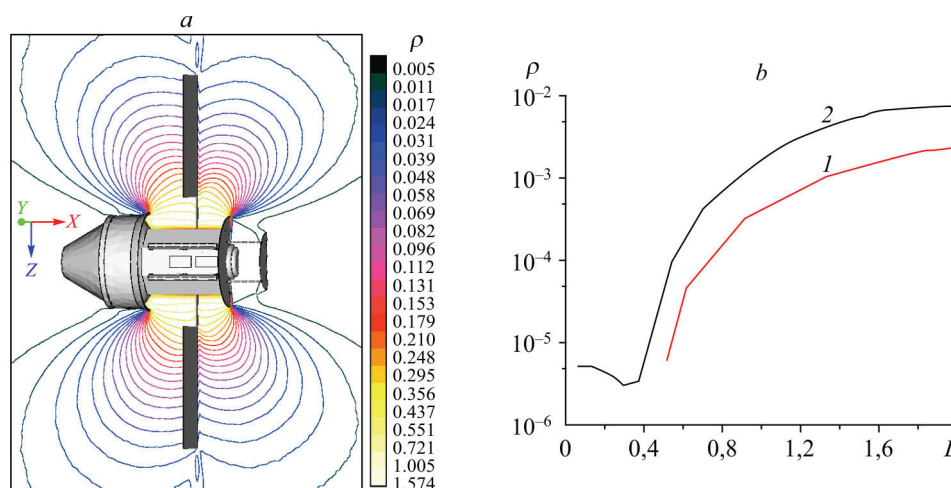


Рис. 13. Газовыделение с поверхности.

a — поле плотности, b — плотность вдоль оси от газовыделения (1) и от набегающего потока (2).

что вклад газовыделения в плотность за экраном должен быть гораздо большим. Механизм газовыделения фактически совпадает с механизмом диффузного отражения частиц от средней части, а числовой поток частиц набегающего потока, попавший на среднюю часть, существенно меньше, чем при газовыделении. Однако, как показали расчеты, значительный прирост плотности в вакуумной зоне происходит из-за тыльной стороны большого экрана. Он расположен перпендикулярно набегающему потоку и на него попадает гораздо больше частиц, чем на среднюю часть. Именно эти частицы, переотразившись от СБ, попадают в область за экраном и существенно повышают плотность. Даже с учетом того, что плотность газовыделения может быть в десятки раз больше плотности набегающего потока, очевидно, что газовыделение с поверхности существенно меньше влияет на размер вакуумной зоны, чем набегающий поток.

7. Рассеивание набегающего потока в собственной внешней атмосфере КА

Газовыделение с поверхности КА и отраженный от нее поток молекул формируют вокруг КА собственную внешнюю атмосферу (СВА), плотность которой заметно выше, а скорость меньше, чем в набегающем потоке [11]. Молекулы набегающего потока могут сталкиваться с молекулами СВА и отклоняться в пространстве на гораздо большие углы, чем для максвелловской функции распределения с температурой набегающего потока. Эти молекулы также могут попасть в вакуумную зону.

Оценка рассеивания набегающего потока в СВА КА и влияния на давление в следе проводилась в модельной осесимметричной постановке с помощью метода прямого статистического моделирования [12, 13], который моделирует межмолекулярные столкновения. Модель КА представляет собой цилиндрическое тело с конической головной частью. Расчеты проводились для двух случаев: когда набегающий поток взаимодействует с СВА и без моделирования СВА. По изменению плотности в донной части модели можно оценить влияние СВА.

В работах [14, 15] приводятся результаты эксперимента «Астра-2», проведенного на орбитальной станции МИР в 1995–1997 гг. Целью эксперимента были масс-спектрометрические измерения состава СВА для разных условий полета. В целом концентрация компонентов с молекулярной массой от 14 до 46 а.е.м. варьируется от $4 \cdot 10^{15}$ (у компонентов N_2 и CO) до $1,1 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$ у других. Суммарная концентрация компонентов составляет $1,8 \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3$, а средняя масса — порядка 26 а.е.м. Отметим, что числовая

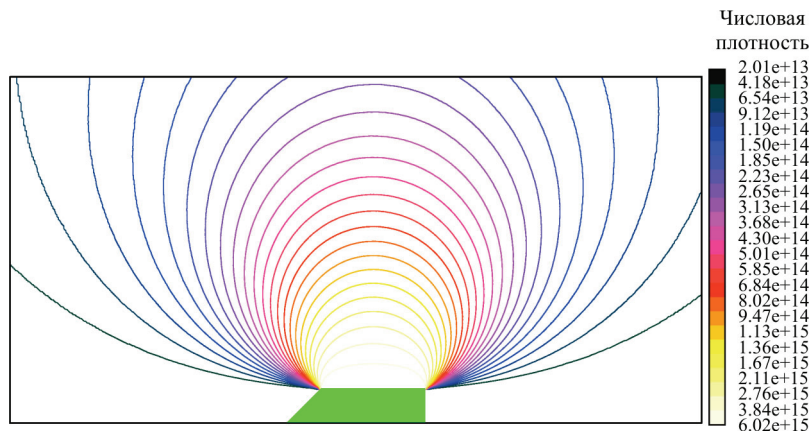


Рис. 14. Модель собственной внешней атмосферы. Распределение числовой плотности.

плотность СВА примерно в 45 раз выше плотности атмосферы на орбите проведения эксперимента. На основании этих данных СВА КА моделировалась газовыделением с боковой поверхности модели (см. рис. 14) молекул N_2 , вылетающих с числовой плотностью $1,81 \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3$ и скоростью 238,12 м/с, посчитанной по формуле (2) для температуры стенки 300 К. Компонента N_2 была выбрана потому, что ее концентрация в СВА является наибольшей (~ 22 %), масса молекул (28 а.е.м.) наиболее близка к средней (26 а.е.м.) и свойства молекулы достаточно полно исследованы методом прямого статистического моделирования. Параметры внешнего потока соответствовали условиям орбитального полета на высоте 350 км: плотность — 10^{-11} кг/м^3 , температура — 1032 К, скорость — 7500 м/с. Поток моделировался только компонентом О, поскольку на данной высоте он имеет наибольшую концентрацию (см. таблицу) и отсутствие других компонентов мало влияет на результаты. Наличие разных компонентов в набегающем потоке и СВА позволяет оценить «источник» попавших в вакуумную зону молекул.

Расчеты показали, что при рассматриваемых значениях плотности течение фактически остается свободномолекулярным и взаимодействия между выделяемым и набегающим потоками практически не происходит. На рис. 15 представлено распределение относительной плотности (ρ/ρ_∞) кислорода (т.е. молекул только набегающего потока)

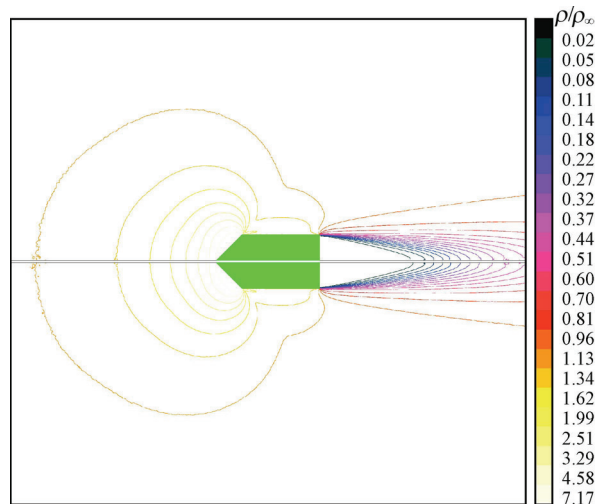


Рис. 15. Рассеивание набегающего потока в собственной атмосфере. Верхняя часть рисунка — без СВА, нижняя — с СВА.

в расчете без газовой выделенности (вверху) и с газовой выделенностью с поверхности с плотностью, равной плотности набегающего потока (внизу). Видно, что поля полностью идентичны. Таким образом, рассеивание набегающего потока в собственной атмосфере КА не приводит к увеличению плотности или давления в донной (затененной) части аппарата. Следовательно, эффектом рассеивания набегающего потока в СВА для оценки зоны вакуума можно пренебречь.

8. Влияние работы ДПО на вакуумную зону

Оценка влияния работы ДПО на вакуумную зону осуществлялась посредством моделирования истечения газа через выходное сечение сопла ДПО с помощью программного комплекса SMILE [16, 17]. Этот комплекс позволяет моделировать как внешнее обтекание КА, так и взаимодействие течения из сопла ДПО с поверхностью КА в вакууме [18, 19]. Расчеты проводились для ДПО, ось сопла которого располагалась перпендикулярно оси аппарата, угол поворота СБ составлял 90° . Этот двигатель устанавливался достаточно далеко от защитного экрана и частично экранировался СБ. Струя двигателя достаточно быстро становилась свободномолекулярной, поэтому обратные потоки, возникающие из-за столкновений молекул в ядре струи, были чрезвычайно малы и не оказывали существенного влияния на вакуумную зону.

В вакуумную зону могут попасть молекулы, которые отражаются от задней поверхности СБ. Поскольку СБ располагалась между двигателем и экраном, на заднюю поверхность СБ могли попасть только те молекулы, которые отразились от других элементов конструкции. Так как на эти элементы конструкции попадают только боковые и обратные потоки (доля которых составляет менее 2 % потока, истекающего из сопла), а при переотражении молекулы значительно рассеиваются в пространстве, доля молекул, вылетевших из сопла и попадающих в вакуумную зону за счет многократных переотражений, получается существенно меньше, чем от переотражений от набегающего потока. Таким образом, влияние струи рассмотренного ДПО на вакуумную зону пренебрежимо мало. На рис. 16 представлено поле плотности. Видно, что в зоне за экраном вообще не удалось зафиксировать присутствия молекул и изменения плотности. Течение из сопла ДПО взаимодействует с СВА и с набегающим потоком, что может исказить течение и, возможно, повлиять на вакуумную зону. Вместе с тем, на больших высотах такое взаимодействие представляется несущественным [20].

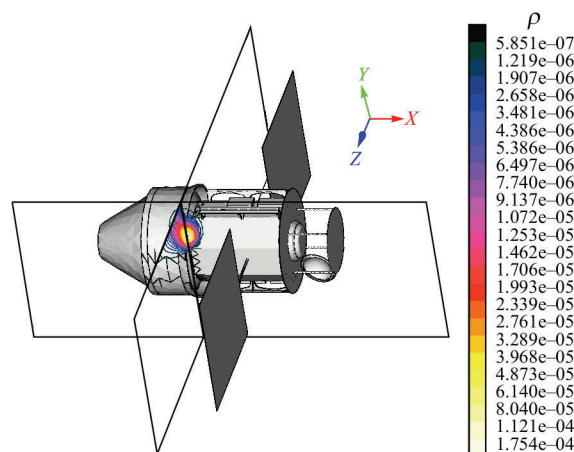


Рис. 16. Плотность при истечении струи двигателя ДПО.

Выводы

Отработана методика ускорения расчетов течений в зоне высокого вакуума. Использование молекулярного экрана позволило получить вакуумную зону, в которой парциальная плотность тяжелых компонентов атмосферы (Ar, N₂, O₂, N, O) составляет порядка 10⁻³ плотности в набегающем потоке, а для легких компонентов H и He — 0,1 и 0,01 соответственно. Имеющаяся конфигурация солнечных батарей существенно снижает вакуумную зону (до 0,4 м или 0,3 радиуса малого экрана) за счет переотражения частиц. Наименьшее влияние СБ на вакуумную зону происходит при углах поворота СБ в пределах 30–60°. Для рассмотренных конфигураций СБ изменение угла атаки в пределах ±15° не влияет на размер вакуумной зоны. Собственное газовыделение с поверхности и рассеивание набегающего потока в собственной атмосфере практически не влияют на вакуумную зону.

Список литературы

1. Пат. 2364557 РФ, МПК⁵¹ B64G1/22, B64G1/10. Абрашкин В.И., Ахметов Р.Н., Елкин К.С., Кирилин А.Н., Лукьяченко В.И., Миронов В.И., Прудкогляд В.О., Семенченко В.В., Стратилатов Н.Р., Успенский Г.Р. / Космический аппарат и способ проведения с его помощью исследований в сверхглубоком космическом вакууме за молекулярным защитным экраном. Заявитель и патентообладатель ФГУП ЦНИИмаш. № 2008107133/11; заяв. 28.02.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
2. Пат. 2372259 РФ, МПК⁷ B64G1/00. Блинов В.В., Зворыкин Л.Л., Иванов А.И., Игнатьев А., Машанов В.И., Преображенский В.В., Пчеляков О.П., Соколов Л.В. / Устройство для выращивания и обработки материалов в космическом пространстве в условиях сверхвысокого вакуума и способ его эксплуатации (варианты). Заявитель и патентообладатель Ин-т физики и полупродников СО РАН, ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева». № 2008118835/11; заявл. 12.05.2008, опубл. 10.11.2009; Бюл. № 31.
3. Brodowski D. NRLMSISE-00 HYPERLINK <http://www.brodo.de/space/nrlmsise>.
4. Афанасьев И. Автономный технологический модуль для МКС // Новости космонавтики. 2013. № 3 (362).
5. Klinkrad H., Koppenwallner G., Johannsmeier D., Ivanov M., Kashkovsky A. Free-molecular and transitional aerodynamics of spacecraft // Advances in Space Research. 1995. Vol. 16, No. 12. P. 33–36.
6. Haviland J.K., Lavin M.L. Application of the Monte Carlo method to heat transfer in a rarefied gas // Physics of Fluids. 1962. Vol. 5, No. 11. P. 1399–1405.
7. Perlmutter M. Analysis of Couette flow and heat transfer between parallel plates enclosing rarefied gas by Monte Carlo // Rarefied Gas Dynamics. Proc of 5th Symp. On RGD / ed. by C.L. Brundin. 1967. Vol. 1. P. 455–480.
8. Tuer T.W., Springer G.S. A test particle monte carlo method // Computers & Fluids. 1973. Vol. 1. P. 399–417.
9. Лотова Г.З., Михайлов Г.А. Исследование и улучшение смещенных оценок метода Монте-Карло // Журн. выч. матем. и матем. физики. 2015. Т. 55, № 1. С. 10–21.
10. Михайлов Г.А., Рогазинский С.В. Весовая модификация прямого статистического моделирования с рандомизированным ветвлением для приближенного решения кинетического уравнения // Докл. АН. 2015. Т. 465, № 2. С. 145–149.
11. Крылов А.Н., Мишина Л.В., Чудина Н.А., Рабинович Б.А. Динамика изменения давления в негерметичных отсеках спутников на геостационарных орбитах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. No. 3.
12. Bird G.A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Clarendon Press, Oxford, 1994. 458 p.
13. Ivanov M.S., Rogazinsky S.V. Analysis of the numerical techniques of the direct simulation Monte Carlo method in the rarefied gas dynamics // Soviet J. Numer. Anal. Math. Modelling. 1988. Vol. 3, No. 6. P. 453–465.
14. Белоцерковский М.Б., Голубев Е.Н., Душин В.К., Крылов А.Н., Мишина Л.В., Пылев В.П., Рабинович Б.А. Некоторые экспериментальные результаты измерений параметров собственной внешней атмосферы ОС «МИР» в эксперименте «Астра-2» // Космонавтика и ракетостроение. 1999. No. 17. С. 148–158.
15. Собственная атмосфера космических аппаратов и ее влияние на функционирование приборов и систем // Энциклопедия «Машиностроение». Т. IV-22, кн. 1, гл. 3.10. М.: Машиностроение, 2012. С. 411–424.
16. Ivanov M.S., Markelov G.N., Gimelshein S.F. Statistical simulation of reactive rarefied flows: numerical approach and applications // AIAA Paper. 1998. No. 98–2669.
17. Ivanov M.S., Kashkovsky A.V., Gimelshein S.F., Markelov G.N., Alekseenko A.A., Bondar Ye.A., Zhukova G.A., Nikiforov S.B., Vashchenkov P.V. SMILE system for 2D/3D DSMC computations // Rarefied gas dynamics : Proc. of 25th Intern. symp. on rarefied gas dynamics, Saint-Peterburg, Russia, July 21–28, 2006 / Eds.: M.S. Ivanov, A.K. Rebrov. Novosibirsk: Siberian Branch of Branch of Russian Academy of Sci. 2007. P. 539–544.
18. Giordano D., Ivanov M., Kashkovsky A., Markelov G., Tumino G., Koppenwallner G. Application of numerical multizone approach to the study of satellite thruster plumes // J. of Spacecraft and Rockets. 1998. Vol. 35, No. 4. P. 502–508.
19. Ivanov M.S., Markelov G.N., Kashkovsky A.V., Giordano D. Numerical analysis of thruster plume interaction problems // European Space Agency (Special Publication) ESA SP. 1997. No. 398. P. 603–606.
20. Кашковский А.В., Ващенко П.В., Баньян Г. Моделирование аэродинамики космического аппарата при взаимодействии струи двигателя управления с атмосферой при спуске // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 751–760.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2018 г.,
после доработки — 22 мая 2018 г.