

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПЫЛЕВИДНЫХ ЧАСТИЦ КОМЕТЫ
С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ**

УДК 518.12+518.5+539.89

**Е. Н. Аврорин, Н. Н. Анучина, В. В. Гаджиева,
В. П. Елсуков, Б. П. Мордвинов**

**Всероссийский НИИ технической физики,
456770 Снежинск**

Рассмотрена физическая и математическая постановка задач, возникающих при оценке надежности предварительно выбранной под руководством Р. З. Сагдеева конструкции защитных экранов космического аппарата «Вега». Приведены результаты расчетов разрушения защитных экранов под действием ударов частиц пылевидной атмосферы кометы Галлея. Определены размеры зон разрушения экранов в зависимости от размеров частиц и их плотности. Проведена оценка вероятности попадания на второй экран частиц, пробивающих его или вызывающих появление твердых откольных фрагментов. Определен импульс, который передается потоком частиц солнечным батареям космического аппарата.

В работе на основе численного моделирования проведен анализ физических процессов, сопровождающих взаимодействие пылевидной атмосферы кометы Галлея с космическим аппаратом. Цель исследований — оценка эффективности предварительно выбранной конструкции защитных экранов космического аппарата (КА). Система защитных экранов состояла из двух алюминиевых пластин толщиной 0,06 и 0,1 см, расположенных на расстоянии 10 см друг от друга. Относительная скорость сближения КА и кометы ~ 78 км/с. Ожидаемый спектр масс пылевидных частиц кометного облака заключен в интервале $10^{-8} \div 10^{-2}$ г [1]. Численное моделирование проведено с помощью программных комплексов МЕЧ и СД-ТОМ. Проведена оценка различных видов разрушений первого экрана (кратер, сквозное отверстие, откольная зона) в зависимости от размера падающей на него частицы.

Изучено действие на второй экран и космический аппарат газообразных, жидких и твердых фрагментов экрана и частицы. Оценена вероятность попадания на второй экран частиц, проникающих через образовавшиеся в первом экране отверстия и вызывающих разрушения второго экрана. Определен импульс, который поток частиц передает солнечным батареям КА за время полета через атмосферу кометы. Полное изложение полученных результатов содержится в [2].

Математические модели и методы расчета. Процесс взаимодействия частицы с экраном можно разделить на два этапа. Первый соответствует ударному сжатию до давлений в десятки мегабар, нагреву вещества частицы и экрана, последующему расширению сжатого вещества, при котором может происходить испарение материалов частицы и экрана. Как показали предварительно выполненные расчеты, непосредственно после уда-

ра материал частицы и экрана прогревается до температур 10–20 эВ, при которых роль лучистой теплопроводности незначительна. Этот этап описывается уравнениями нестационарной газовой динамики с двумя пространственными переменными, дополненными уравнениями состояния веществ частицы и экрана в широком диапазоне изменения параметров. Процесс разлета газового облака, образующегося при пробитии экрана частицей, также может быть описан с достаточной точностью в газодинамическом приближении [3].

На втором этапе взаимодействия частицы и экрана, когда давление в экране уменьшается до 50 ГПа, необходимо учитывать упруго-пластические и прочностные свойства веществ. Численное моделирование проводилось по программным комплексам МЕЧ и СД-ТОМ.

Газодинамическая стадия процесса, для которой характерно образование сложного вихреобразного течения и сильные деформации контактных границ, рассчитывалась по программному комплексу МЕЧ, где реализован неоднородный эйлеров разностный метод. Он использует основные принципы метода «частиц в ячейке» [4], но имеет большую точность, монотонность и экономичность [2, 5, 6]. Частицы, свой для каждого вещества, ставятся только в окрестности контактных границ для описания их движения. Число частиц в процессе расчета меняется: увеличивается или уменьшается так, чтобы обеспечить достаточную точность описания границ. В случае необходимости может происходить изменение расчетной сетки, числа частиц, исключение физических областей или включение новых с использованием соответствующих граничных условий. При движении контактных границ образуются ячейки, содержащие несколько веществ. В них рассчитывается смесь веществ. Предполагается, что компоненты смеси находятся в механическом равновесии без теплообмена. Используются различные условия совместного деформирования. Потoki массы, импульса и энергии из одной ячейки в другую с помощью частиц (дискретные потоки) вычисляются только в случае движения из ячейки с несколькими веществами, из ячейки с одним веществом в ячейку с другим веществом или из ячейки, где проходит граница с заданным на ней граничным условием. Потoki через границы ячеек с однородным веществом определяются по разностной схеме, аппроксимирующей на эйлеровой сетке уравнение переноса (непрерывные потоки). Масса частиц меняется в процессе счета.

Конечные результаты расчета первого этапа служили начальными данными для второго, который выполнялся по программе СД-ТОМ. Здесь учитывались упруго-пластические и прочностные свойства материалов. В программе СД-ТОМ реализована явная методика, представляющая собой гибрид нескольких разностных схем, допускается лагранжево и лагранжево-эйлерово описание. На лагранжевом этапе уравнение энергии и упруго-пластики решаются, как в программе СПРУТ [7], уравнения движения — как в [8]. В зонах больших деформаций применяется лагранжево-эйлерово описание, где на втором этапе перестраиваются сетки и осуществляется пересчет величин на новые сетки. При малых изменениях сеток для пересчета величин используется метод, учитывающий конвективные потоки через границы ячеек [9], при значительных — метод «дробного проектирования», основанный на [10]. Если граница раздела веществ не совпадает с линиями сеток, она описывается приближенно с помощью метода «концентрации» и специального алгоритма, предотвращающего излишнюю диффузию веществ при перестройке сетки, аналогично [11].

На всех этапах в расчетах использовалось уравнение состояния типа уравнения Ми — Грюнайзена. Его параметры подбирались на основе имеющихся экспериментальных данных по ударному сжатию с учетом экстраполяции в область применимости модели атома

Томаса — Ферми с поправками. В области упругих деформаций использовался закон Гука, а в области упруго-пластических течений — соотношение Прандтля — Рейсса. Переход из упругого состояния в пластическое происходил по критерию Губера — Мизеса. Разрушение материала при растяжении происходит, когда максимально растягивающее напряжение превосходит предел прочности на разрыв $\sigma_{кр}$. В момент раскрытия трещин в элементе среды ортогональное к поверхности трещины напряжение полагается равным нулю вплоть до полного закрытия трещины этого направления. Деформации вещества в направлениях, отвечающих прочному состоянию среды, считаются совпадающими с деформациями среды. При повороте элемента среды как твердого тела трещины поворачиваются вместе с ним.

Оценка эффективности защитных экранов. Численно моделировался нормальный удар цилиндрической частицы диаметром и высотой d об экран толщиной H . В расчетах варьировались масса частиц и их плотность ($0,1-3$ г/см³), материал экранов и частиц (алюминий, сталь, углерод), относительная толщина экранов и расстояние между ними, скорость соударения.

Во всех расчетах определялись размеры отверстий или кратеров в экранах, размеры зон трещиноватости. Оценивалось взаимодействие со вторым экраном газообразных продуктов, образовавшихся после пробития первого экрана. Диаметр кратера или отверстия определялся двумя способами. В первом учитывался лишь один критерий — прочность на разрыв, что дает минимальную оценку для диаметра (D_{min}). При втором способе определения диаметра (D_{max}) к зоне разрушения присоединяется зона, длительное время находящаяся в области пластического течения, где относительные сдвиговые деформации превышали 30%.

На рис. 1 для частиц и экранов одинаковой плотности $2,7$ г/см³ и скорости соударения $v_0 = 78$ км/с приведены зависимости диаметров отверстий и откольных зон (D_0) в экране от его относительной толщины H/d . Видно, что для тонких экранов величина отверстия близка к диаметру частицы. Минимальная толщина экрана, при которой еще появляются отколы, равна $17d$. Максимальный диаметр отверстия в экране не превосходит $19d$, а глубина кратера $\sim 10d$.

Там же показаны размеры кратера при ударе частиц пониженной плотности. Для удобства сравнения результатов с другими подобными работами все размеры отнесены к диаметру сферического ударника такой же массы, как в соответствующих расчетах.

Используя полученные зависимости и данные о налетающих на экран частицах (их количество, масса, размеры), оценивалась суммарная площадь отверстий в первом экране и вероятность попадания на второй экран частиц, пробивающих его или вызывающих появление отколов, за время пролета через атмосферу кометы.

Первый экран ослабляет поток частиц примерно в 2000 раз. Суммарная площадь отверстий в первом экране составляет $\sim 0,1\%$ его площади. Вероятность попадания через эти отверстия на 1 м² хотя бы одной частицы, пробивающей второй экран, равна $0,04$.

Частицы относительно больших размеров (масса $\approx 10^{-3}$ г, $d/H \approx 3$), как показали расчеты, при соударении испаряются. Газообразные продукты, образующиеся после пробития первого экрана, при взаимодействии со вторым экраном, находящимся на расстоянии 3 см от первого, создают давления менее $0,4$ ГПа, т. е. они не могут повредить ни его, ни корпус космического аппарата. Также не представляют опасности вторичные осколки, возникающие при ударе частиц о первый экран, так как их скорости $< 2,5$ км/с при массе не более $3 \cdot 10^{-7}$ г.

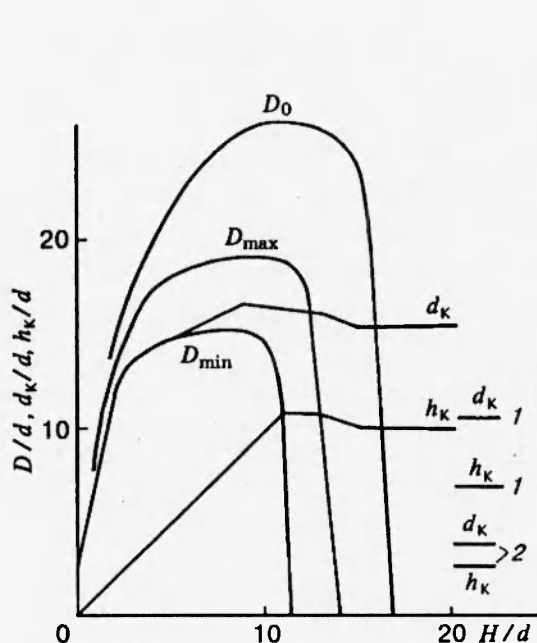


Рис. 1

Рис. 1. Размеры зон разрушений в зависимости от толщины экрана при ударе частиц с $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$; диаметр и глубина кратера при ударе частиц пониженной плотности: 1 — $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, 2 — $\rho = 0,1 \text{ г/см}^3$

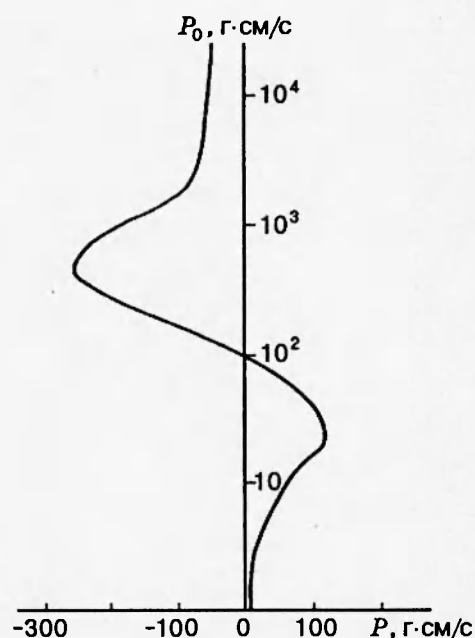


Рис. 2

Рис. 2. Остаточный импульс экрана в зависимости от начального импульса частицы плотностью $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$

Таким образом, расчеты подтвердили достаточную надежность защитной системы.

Оценка отклоняющего действия потока частиц на КА. Для изучения отклоняющего действия потока частиц на космический аппарат необходимо было оценить остаточный импульс экрана и солнечных батарей после соударения с частицами разных размеров и плотностей. Солнечные батареи имитировал алюминиевый экран толщиной 0,2 см. Импульс P определялся как количество движения неразрушенного вещества экрана в направлении первоначального движения ударяющей частицы.

На рис. 2 приведена зависимость P от начального импульса P_0 частицы. Максимальное увеличение импульса составило 6,1, а при $\rho_0 = 1$ и $0,1 \text{ г/см}^3$ — 4,2 и 2 соответственно. Отрицательная величина остаточного импульса при больших значениях P_0 обусловлена воздействием испаренного в результате удара вещества со стороны тыльной части экрана.

Как показали расчеты, наибольший вклад в суммарный отклоняющий импульс, получаемый солнечными батареями, вносит группа частиц с массами $\sim 10^{-8}$ – 10^{-5} г. Остальные группы дают менее 5% всего импульса.

Анализ точности результатов расчетов. Для оценки точности результатов расчетов по комплексам МЭЧ и СД-ТОМ были проведены расчеты, моделирующие опыты по прониканию алюминиевых ударников в алюминиевые мишени различной толщины с начальной скоростью $v_0 = 7,4 \text{ км/с}$ [12]. Результаты расчетов представлены на рис. 3 в

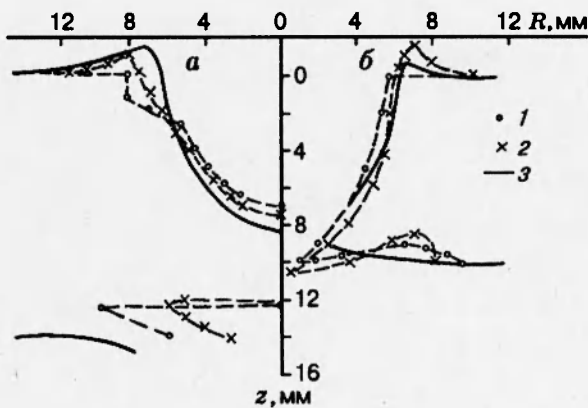


Рис. 3. Разрушения мишени толщиной $H = 14$ (а) и 10 мм (б) при ударе алюминиевых шариков диаметром $3,2$ мм с $v_0 = 7,4$ км/с; 1 — опыты [13]; 2 — оценки по СД-ТОМ; 3 — оценки по критерию динамического давления (МЕЧ)

виде окончательной формы кратеров и откольной зоны в сравнении с данными [12]. Видно, что расчеты с достаточной точностью описывают полученную в экспериментах картину разрушений мишени, а также образование кратера и откольной зоны.

Результаты, полученные в большой серии наших расчетов с $v_0 = 78$ км/с, сравнивались с результатами расчетно-теоретических и экспериментальных исследований высокоскоростного соударения [12–19].

Для сравнения наших результатов по оценке размеров кратеров использовались данные [15], где было установлено, что возникающие при ударе течения с одинаковыми значениями Lv_0^2 (L — характерный размер ударника, v_0 — скорость соударения) эквивалентны на поздней стадии, т. е. приводят к образованию кратеров одинаковых размеров. Соотношение, полученное в [15] для оценки глубины кратера (h_k), используя [16] и [10], можно записать в виде

$$h_k = kr_0, \tag{1}$$

где

$$r_0 = \left(\frac{m}{\rho_1}\right) \left(\frac{v_0}{c_1}\right)^\alpha,$$

$\alpha = 0,58$; r_0 — эффективный радиус ударника; m, ρ_0, v_0 — масса, начальная плотность и скорость ударника; ρ_1, c_1 — плотность и скорость звука экрана; k — коэффициент, зависящий от прочности экрана.

Обработка результатов наших расчетов показала, что в случае одинаковых плотностей и материалов ударника и экрана они удовлетворяют закону подобия (1). Поскольку свойства алюминия в наших расчетах и экспериментах [12] близки, на основе этих экспериментов был выбран коэффициент $k = 2,36$, а для второго коэффициента α из расчетов получилось значение $0,62$. Расчеты, выполненные для разных плотностей ударника и экрана, но при одном и том же эффективном радиусе r_0 ударника, показали, что глубина кратера зависит от отношения ρ_0/ρ_1 , и вместо (1) для нее справедлива зависимость

$$h_k = kr_1, \quad r_1 = r_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_1}\right)^{\alpha_1}, \quad \alpha_1 \approx 0,066. \tag{2}$$

В этих же расчетах анализировался характер затухания интенсивности ударных волн (УВ) в экране. Получено, что давление p на фронте УВ связано с положением фронта на

оси симметрии z соотношением

$$\frac{p}{\rho_1 c_1^2} = 1,1 \left(\frac{z}{r_1} \right)^{-2,45}, \quad r_1 = r_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^{\alpha_1}, \quad \alpha_1 \approx 0,07, \quad (3)$$

в которое входит тот же эффективный радиус r_1 ударника, что и в (2).

Проведенный дополнительный анализ расчетных и экспериментальных данных [12, 14, 16, 19] по соударению с разными значениями ρ_0/ρ_1 , и v_0 показал, что они более точно описываются не законом (1), а соотношением (2), а давление на УВ — соотношением (3), но значение α_1 , входящее в выражение для r_1 , зависит от v_0 . Эта зависимость достаточно точно описывается уравнением

$$\alpha_1 = 0,45v_0^{-0,45}. \quad (4)$$

Результаты наших расчетов с $v_0 = 78$ км/с также удовлетворяют этой зависимости.

Из (2), (3) следует, что давление в УВ на дне будущего кратера в заданном материале экрана должно быть примерно одинаковым при различных плотностях ударника и одном и том же эффективном радиусе ударника. В настоящих расчетах $p \approx 10$ ГПа.

Заключение. Проведенные численные исследования подтвердили достаточную надежность выбранной защитной системы из двух экранов толщиной 0,06 и 0,1 см, разнесенных на расстояние 10 см.

За время полета в атмосфере кометы в первом экране образуются отверстия, суммарная площадь которых составляет $\sim 0,1\%$ первоначальной площади экрана. Через эти отверстия на 1 м^2 второго экрана с вероятностью 0,04 проникает одна частица, пробивающая экран, а с вероятностью 0,15 — вызывающая в ней отколы. Оба вида частиц не представляют опасности для корпуса аппарата.

Расчеты показали, что, не снижая надежности двухэкранный защиты, можно уменьшить толщину первого экрана до 0,04 см.

Максимальное увеличение импульса, получаемое экраном от частицы плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$, равно примерно 6, а для плотностей 1 и $0,1 \text{ г/см}^3$ — соответственно 4,2 и 2. Суммарный импульс, получаемый солнечными батареями за все время пролета космического аппарата в атмосфере кометы, составляет $3 \cdot 10^4 \text{ г} \cdot \text{см/с}$ на 1 м^2 .

Результаты численных исследований согласуются с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями явлений высокоскоростного удара. Косвенным подтверждением их достоверности является и надежная работа КА во время съемки кометы Галлея.

Все результаты представлены в виде, который дает возможность получения оценок для другой пылевидной обстановки.

Авторы выражают признательность Р. З. Сагдееву, А. А. Галееву, В. Б. Леонасу и В. И. Шевченко, принимавшим участие в обсуждении результатов, В. Ф. Куропатенко и И. С. Минаевой, подобравшим параметры уравнения состояния, а также В. В. Кондратьевой, Н. П. Кулябиной и В. Ф. Лукашиной за техническую помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sagdeev R. Z., Anisimov S. I., Galeev A. A., et al. // Adv. Space Res. 1983. V. 2. P. 133.

2. Аврорин Е. Н., Анучина Н. Н., Гаджиева В. В. и др. Численное моделирование взаимодействия частиц кометы Галлея с космическим аппаратом. М., 1985. (Препр. / ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР; № 177).
3. Малама Ю. Г. Численное моделирование явлений ионизации при высокоскоростном ударе. М., 1982. (Препр. / ИКИ АН СССР; № 725).
4. Харлоу Ф. Н. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
5. Анучина Н. Н. О методах расчета течений сжимаемой жидкости с большими деформациями // Численные методы механики сплошной среды. Т. 1, № 4. 1970.
6. Анучина Н. Н., Анучин М. Г., Волков В. И. и др. Развитие релей-тейлоровской неустойчивости в системах с различной сжимаемостью среды // Математическое моделирование. 1990. Т. 2, № 4. С. 3–16.
7. Быченков В. А., Гаджиева В. В. Метод «СПРУТ» расчета двумерных неустановившихся течений разрушаемых сред // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Методики и программы численного решения задач математической физики, 1978. Вып. 2(2). С. 17.
8. Камерон И. Г., Скорджи Г. К. Динамика сильных подземных взрывов // Действие ядерного взрыва. М.: Мир, 1971.
9. Mader Ch. L. Numerical Modeling of Detonations. University of California Press, 1979.
10. Hirt C. W., Amstern A. A., Cook I. L. An arbitrary Lagrangian-Eulerian method for all flow speeds // J. Comp. Phys. 1974. V. 14. P. 227.
11. Horak H. J., Jones E. M., et al. An algorithm for discrete resoning of Lagrangian meshes // J. Comp. Phys. 1978. V. 26. P. 277.
12. Геринг Дж. Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973.
13. Геринг Дж. Теория соударения с тонкими мишенями и экранами в сопоставлении с экспериментальными данными // Там же.
14. Рини Т. Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе // Там же.
15. Динс Дж., Уолш Дж. Теория удара: некоторые общие принципы и метод расчета в эйлеровых координатах // Там же.
16. Рас У. Аналитическое исследование распространения ударных волн, порожденных ударом // Там же.
17. Аникиева А. П., Мержиевский Л. А., Титов В. М. Пробивание преград при ударе частиц стекла, имитирующих каменные метеориты // ПМТФ. 1977. № 3. С. 131.
18. Агурейкин В. А., Анисимов С. И., Бушман А. В. и др. Теплофизические и газодинамические проблемы противометеоритной защиты космического аппарата «ВЕГА» // Теплофизика высоких температур. 1984. Т. 22, № 5. С.964.
19. Малама Ю. Г. Численное моделирование высокоскоростного удара при различных соотношениях плотностей ударника и мишени // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 4. С. 117.

Поступила в редакцию 3/Х 1994 г.