

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНИКА НА ОБОЛОЧКУ, НАГРУЖЕННУЮ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

Увеличение габаритов космических аппаратов (КА) и сроков их активного существования на орбите делает их все более уязвимыми к высокоскоростному ударному воздействию техногенных и метеорных частиц. Повреждение обечайки герметичного блока КА вследствие такого воздействия может привести не только к потере герметичности, но и к катастрофическому разрушению силовой конструкции аппарата и отказу КА в целом.

В данной работе рассматривается воздействие высокоскоростной механической частицы (далее – ударника) на тонкостенную герметичную оболочку. Принимаются следующие допущения.

Рассматриваемая конструкция представляет собой тонкостенный алюминиевый цилиндр диаметром D_v , нагруженный внутренним давлением $p_0 > 0,1$ МПа. Внешнее давление отсутствует. Размер образующей цилиндра намного превышает его диаметр, и влияние торцов цилиндра не рассматривается.

Удар является центральным и происходит по нормали к образующей цилиндра. Свойства материала цилиндра одинаковы по всем направлениям (рассматривается изотропный материал). Далее «передней стенкой» называется часть цилиндра, прилегающая к месту внешнего воздействия высокоскоростной механической частицы; «задней стенкой» – часть цилиндра, на которую изнутри воздействует частица (или ее осколки), обломки передней стенки и ударная волна.

Газ внутри цилиндра является инертным, совершенным, не горит и не влияет на процесс пробивания передней стенки. Осколки частицы и обломки преграды в газе не горят, и их абляция не происходит. Утечкой газа через пробитое отверстие в передней стенке, ввиду малой продолжительности процесса, можно пренебречь. В результате взаимодействия ударника с передней стенкой оболочки при скорости соударения $V_0 > 7$ км/с образуется облако мелких (пылевых) осколков и обломков, при этом вся энергия ударника передается ударной волне. В рассматриваемом случае разрушения задней стенки не происходит, ударная волна отражается от нее как от абсолютно жесткой плоской поверхности и воздействует на переднюю стенку.

Учитывая ограниченность зоны воздействия ударной волны на переднюю стенку оболочки, заменим эту зону точкой круглой пластиной с пробитым отверстием и исходящей из него трещиной, подвергнутой импульсному нагружению. Условие катастрофического разрушения такой пластины получено в [1] и может быть представлено в виде

$$A \left(\frac{I}{r_3} \right)^2 \sqrt{d_0} > K_{d1} \quad (1)$$

где A — эмпирический коэффициент, зависящий от материала оболочки; I — импульс давления, действующего на пластину; r_3 — радиус пластины; d_0 — диаметр ударника; K_{d1} — динамическая вязкость разрушения материала оболочки.

Импульс, передаваемый «пластине» — участку передней стенки радиусом r_3 , равен

$$I = \pi r_3^2 p_3 \tau_3, \quad (2)$$

где p_3, τ_3 — соответственно амплитуда и длительность импульса давления в ударной волне, отраженной от передней стенки. Приняв допущение, что потери энергии при распространении волны не происходит, можно записать:

$$p_3 \tau_3 = p_2 \tau_2, \quad (3)$$

где p_2, τ_2 — соответственно амплитуда и длительность импульса давления в ударной волне, отраженной от задней стенки.

Радиус «пятна» ударной волны на передней стенке r_3 можно найти по методу мнимого источника [2]. На рисунке 1 обозначено: O_1 — фиктивный центр, из которого распространяется ударная волна; L_0 — расстояние от фиктивного центра до передней стенки; O_2 — мнимый источник отраженной волны; L_{wave} — радиус зоны действия ударной волны на заднюю стенку.

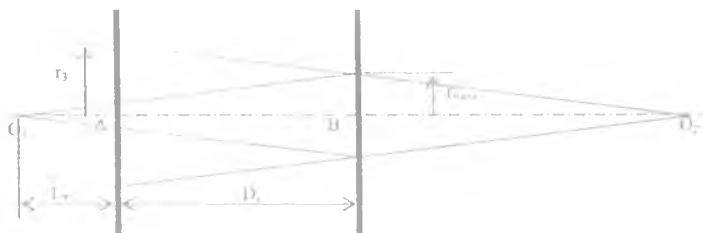


Рисунок 1. Схема отражения ударной волны

В соответствии с рис. 1 найдем:

$$r_1 = r_{\text{wave}} \frac{AO_2}{BO_2} = r_{\text{wave}} \frac{D_v + L_*}{L_*}, \quad (4)$$

Зависимости для расчета величин $p_2, \tau_2, r_{\text{wave}}, L_*$ были получены в [3, 4]

С учетом изложенного выше, можно записать следующее условие катастрофического разрушения оболочки:

$$\psi \cdot K > \psi \cdot K^* = K_d, \quad (5)$$

где ψ – эмпирический коэффициент, зависящий от материала и толщины стенки оболочки,

$$K = \left(r_{\text{wave}} \frac{D_v + L_*}{L_*} p_2 \tau_2 \right)^2 \sqrt{d_p}, \quad (6)$$

K^* – критическое значение параметра K .

В таблице 1 и на рисунке 2 приведены результаты расчета для некоторых экспериментов, приведенных в [3]

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Номер эксперимента	d_p , мм	V_p , км/с	Давление надува p_0 , МПа	Тип разрушения оболочки	K , $\text{МПа}^2 \text{с}^2 \text{м}^3$
8	3,5	6,9	2,30	Некатастрофический	7117 ($<K^*$)
9	4,1	6,6	0,84	Некатастрофический	3716 ($<K^*$)
14	4,4	7,1	1,56	Катастрофический	13107 ($>K^*$)
15	4,4	7,3	1,60	Катастрофический	19591 ($>K^*$)

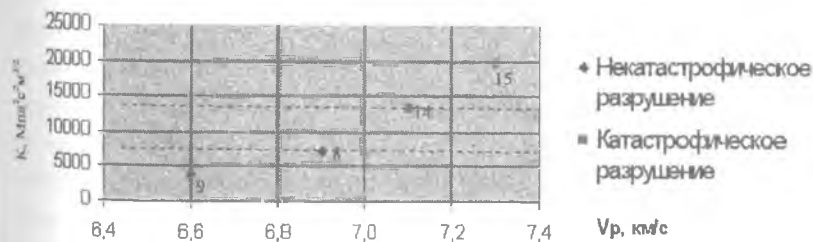


Рисунок 2. Типы разрушения оболочки в зависимости от параметра K

Числа у точек на рисунке 2 соответствуют номерам экспериментов, пунктирными линиями показаны границы диапазона возможных значений параметра K . Можно видеть, что

параметр K позволяет провести разграничение между катастрофическим и некатастрофическим типами разрушения оболочки.

Следует отметить, что для полной проверки адекватности предложенной методики требуются более обширные экспериментальные данные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Z. Rozenberg, S.J. Bless, J.P. Gallagher. A model for hydrodynamic ram failure based on fracture mechanics analysis// Int. J. Impact Engng. – Vol. 6, No. 1, 1987. – P. 51-61.
2. Штамповка взрывом. Основы теории /Под ред. М.А. Анучина. – М.: Машиностроение, 1972.
3. Telitchev I.Y. Fracture mechanics analysis of impact damages pressure vessels. Freiburg, 1997.
4. А.Г. Иошлев, А.С. Кучеров, В.Ю. Мельцас, Г.Ф. Портнягина, А.Г. Прохоров, И.Е. Геличев, В.Г. Шахов. Оценка изменения параметров газа в сосуде при пробивании его стенки высокоскоростными механическими частицами //Вестник СГАУ. – Самара, 2004. – № 6. – С. 88-107.