

УСКОРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ КУМУЛЯТИВНЫМИ СТРУЯМИ

Ю. А. Тришин

(Новосибирск)

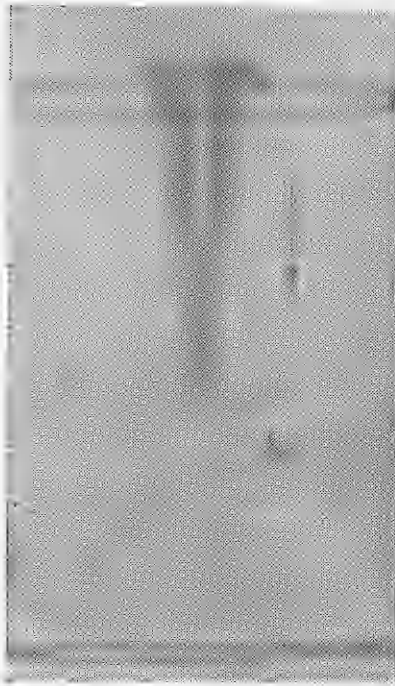
Явление кумуляции, т. е. процесс, приводящий к концентрации энергии, представляет значительный интерес для физиков. Одним из примеров является образование кумулятивной струи при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) с выемкой, облицованной тонким слоем металла. Воспользовавшись основными соотношениями гидродинамической теории кумуляции [1,2] в плоском случае (для клиновидной выемки), получаем

$$E_c/E_0 = (1 + \cos \alpha)/2, \quad m_c/m_0 = (1 - \cos \alpha)/2,$$

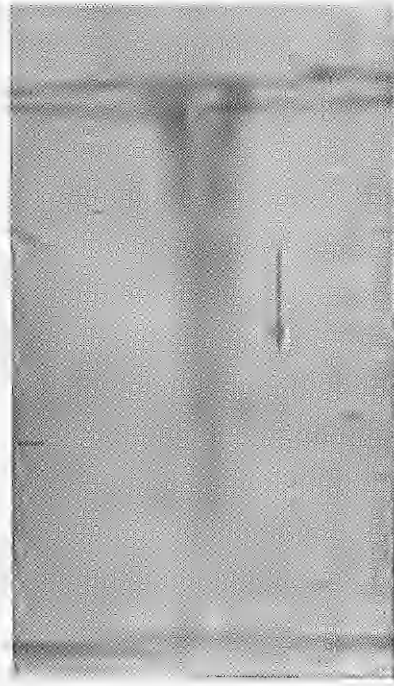
где E_c, m_c ; E_0, m_0 — кинетическая энергия и масса единицы длины соответственно струи и облицовки; 2α — угол при вершине клина.

Из этих соотношений следует, что доля энергии, уносимая кумулятивной струей, близка к единице при малых углах соударения, а масса струи очень мала. Правда, при малых углах соударения из-за сжимаемости струи не образуются вообще. Но как показывают эксперименты, для тех углов соударения, когда образуются монолитные струи, их удельная кинетическая энергия может на порядок превосходить удельную энергию ВВ. Основная же масса облицовки переходит в низкоскоростную часть течения или так называемый пест. Однако в работе [3] обращено внимание на возможность существования режима «обратной» кумуляции, когда масса, переходящая в кумулятивную струю, больше массы песта. Этот режим возможен для клиновидных или конических облицовок с достаточно большим углом при вершине. Но этот пример «обратной» кумуляции не является единственным. Похожая картина реализуется при захлопывании полусферической оболочки. В этом случае, по крайней мере на ранних стадиях процесса, нельзя разделить течение на пест и струю. После схлопывания оболочки образуется слабоконический стержень с затупленной вершиной, скорость которого монотонно уменьшается от вершины к основанию. К примеру, при захлопывании дюралюминиевой полусферы наружным диаметром 40 мм и толщиной 2 мм, облицовывающей полусферическую выемку в заряде ТГ 50/50 диаметром 50 мм и высотой 36 мм, образуется тело, близкое по форме к усеченному конусу. Спустя 22 мкс после инициирования заряда оно имеет длину 48 мм, диаметр основания 15 мм, диаметр при вершине 5 мм (рентгенограмма представлена на фиг. 1; направление движения указано стрелкой). От основания к вершине в толще конуса имеется полость на глубину до 17 мм, диаметром 4–5 мм. Еще через 4 мкс длина этого конуса становится 65 мм, а размеры основания и вершины почти не меняются (фиг. 2). В этот момент скорость вершины около 4,8 км/с, на расстоянии 35 мм от нее 3,7 км/с (там, где кончается полость), а скорость основания 1,2 км/с. Этот кусок металла в голове струи длиной ~38 мм ($d_1 \approx 5$ мм, $d_2 \approx 10$ мм), массой ~4,3 г имеет кинетическую энергию около 38 кДж ($\epsilon = 2,1$ ккал/г). Такая же удельная энергия вещества в струе достигнута в режиме «обратной» кумуляции.

Процесс концентрации энергии можно продолжить, если использовать кумулятивную струю в устройстве наподобие легкогазовой пушки в качестве поршня, сжимающего рабочий газ, для ускорения твердых тел.



Ф и г. 1

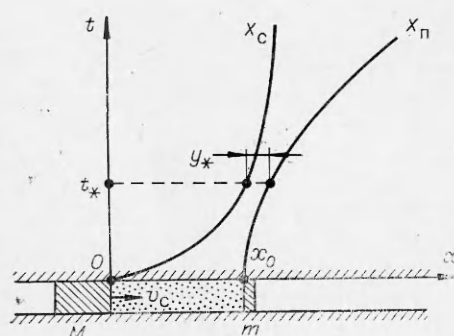


Ф и г. 2

Рассмотрим задачу о движении в трубе двух поршней (фиг. 3) массой M и m , разделенных слоем газа с начальным давлением p_0 и показателем адиабаты γ . Пусть в начальный момент времени $t = 0$ поршень массой M имеет скорость v_c и находится от покоящегося поршня на расстоянии x_0 . Считая процесс сжатия газа адиабатическим и пренебрегая его массой, запишем уравнения движения поршней

$$(1) \quad m \frac{d^2 X_{\pi}}{dt^2} = p_0 S x_0^{\gamma} (X_{\pi} - X_c)^{-\gamma}, \quad M \frac{d^2 X_c}{dt^2} = -p_0 S x_0^{\gamma} (X_{\pi} - X_c)^{-\gamma},$$

где S — площадь поперечного сечения трубы; X_{π} — путь ускоримой пули (поршень m); X_c — путь кумулятивной струи (поршень M).



Ф и г. 3

Процесс разгона пули кумулятивной струей в таком устройстве распадается на две фазы: 1) сжатие газа в течение времени $0-t_*$; 2) расширение сжатого между поршнями газа для времени $t > t_*$ (фиг. 3). При этом кумулятивная струя непрерывно тормозится, а пуля ускоряется. Переход от фазы сжатия рабочего газа к фазе расширения характеризуется равенством скоростей струи и пули

$$(2) \quad \left. \frac{dX_{\pi}}{dt} \right|_{t=t_*} = \left. \frac{dX_c}{dt} \right|_{t=t_*}.$$

Решая совместно уравнения (1) с очевидными начальными условиями, получаем для фазы сжатия $t \leq t_*$

$$(3) \quad \frac{dX_{\pi}}{dt} = \frac{M}{m+M} \left\{ v_c - \sqrt{v_c^2 + \frac{2(m+M)}{mM} \frac{p_0 x_0 S}{(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{x_0}{X_{\pi} - X_c} \right)^{\gamma-1} \right]} \right\} =$$

$$= \frac{\mu}{m} \left\{ v_c - \sqrt{v_c^2 + \frac{2\varepsilon_0}{\mu} \left[1 - \left(\frac{x_0}{X_{\pi} - X_c} \right)^{\gamma-1} \right]} \right\},$$

$$\frac{dX_c}{dt} = \frac{M}{m+M} \left\{ v_c + \frac{m}{M} \sqrt{v_c^2 + \frac{2(m+M)}{mM} \frac{p_0 x_0 S}{(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{x_0}{X_{\pi} - X_c} \right)^{\gamma-1} \right]} \right\} =$$

$$= \frac{\mu}{m} \left\{ v_c + \frac{m}{M} \sqrt{v_c^2 + \frac{2\varepsilon_0}{\mu} \left[1 - \left(\frac{x_0}{X_{\pi} - X_c} \right)^{\gamma-1} \right]} \right\},$$

где $\varepsilon_0 = p_0 x_0 S / (\gamma - 1)$; $\mu = mM / (m + M)$.

Пользуясь соотношениями (3), (2), можно найти минимальное расстояние, на которое сближаются поршни в фазе сжатия, и давление сжатого газа

$$(4) \quad y_* = (X_{\pi} - X_c)_{t=t_*} = x_0 \left[1 + \frac{(\gamma-1)mM}{p_0 S x_0 (m+M)} v_c^2 \right]^{\frac{1}{1-\gamma}} = x_0 \left(1 + \frac{E}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}};$$

$$(5) \quad p_* = p_0 \left(\frac{x_0}{y_*} \right)^{\gamma} = p_0 \left(1 + \frac{E}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}},$$

где $E = \mu v_c^2 / 2$.

Окончательно значение скорости пули получим из соотношений (1) с учетом начальных условий (2), (4):

$$(6) \quad \frac{dX_{\pi}}{dt} = \frac{M}{m+M} \left\{ v_c + \sqrt{\frac{2(m+M)}{mM} \frac{p_0 x_0 S}{(\gamma-1)} (y_*^{1-\gamma} - y^{1-\gamma})} \right\},$$

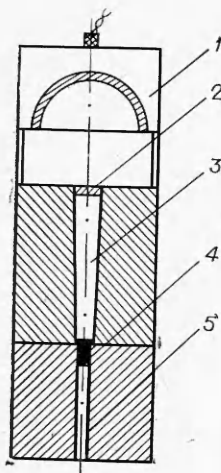
$$y = X_{\pi} - X_c.$$

Максимальную скорость, которую может приобрести пуля в таком ускоряющем устройстве, получаем из соотношения (6) при условии $y \rightarrow \infty$

$$(7) \quad v_{n\infty} = \frac{M}{m+M} \left\{ v_c + \sqrt{v_c^2 + \frac{2p_0 x_0 S}{\mu(\gamma-1)}} \right\}.$$

Такая оценка показывает, что для достаточно большого различия в массах кумулятивной струи и ускоряемой ею пули $M > m$, скорость пули может превзойти скорость кумулятивной струи.

Для проверки этого принципа ускорения твердых тел были проведены эксперименты с использованием устройства, представленного на фиг. 4. Описанный выше кумулятивный заряд 1 с полусферической облицовкой устанавливался на некотором расстоянии от стальной диафрагмы 2 на входе в камеру сжатия 3 соосно с ней. Начальное давление газа в камере сжатия изменялось от одного до нескольких десятков атмосфер. Стальная пуля 4 имела буртик толщиной около 0,5 мм. Масса пули колебалась от 0,25 до 0,3 г при длине 4 мм и диаметре 3 мм. Как камера сжатия, так и ствол 5 изготавливались высверливанием отверстий в массивной ($\varnothing 40-50$ мм) стальной болванке. Длина ствола не превышала 60 мм, т. е. составляла 20 калибров максимально. Скорость пули, зарегистрированная в



Ф и г. 4

пути 60 мм сообщает ей скорость 3 км/с. Подставив величину найденного давления в формулы (5), (4), получаем, что пуля покидает ствол еще в фазе сжатия.

Что же касается собственно легкогазовых пушек, то у них канал ствола имеет длину порядка 300 калибров, 200 калибров — это минимум [5].

В работе [6] приведены уточненные критерии струеобразования при взрыве кумулятивных зарядов с коническими и клиновидными облицовками, а также дан критерий, касающийся качества образующихся струй, т. е. монолитные или диспергированные струи образуются при определенных режимах соударения. Для образования монолитных струй необходимо, чтобы скорость натекающих струй была меньше скорости звука вещества струи в системе координат, где картина косоугольного соударения пластин стационарная. В лабораторной системе координат, в которой скорость соударяющихся пластин U направлена по нормали к их поверхности, это условие можно записать в виде

$$\operatorname{tg} \alpha = U/c_0.$$

Воспользовавшись основным соотношением гидродинамической теории кумуляции, связывающим скорость кумулятивной струи с параметрами соударения, получим

$$v_c = \frac{U}{\operatorname{tg} \alpha} (1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}) = c_0 + \sqrt{c_0^2 + U^2}.$$

Таким образом, скорость монолитной кумулятивной струи превышает более чем в 2 раза скорость звука вещества струи. Значит, в принципе пушка с использованием кумулятивной струи в качестве поршня способна ускорять бойки до скоростей, более чем в 4 раза превышающих скорость звука в материале струи при нормальных условиях.

Необходимо отметить, что этот гибрид легкогазовой пушки и взрывных ускорителей сочетает в себе преимущества обоих способов ускорения. В отличие от газокумулятивных зарядов, используемых для ускорения твердых тел [7], в кумулятивной пушке вес заряда ВВ на порядок меньше.

Поступила 7 IV 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принцип его работы.— УМН, 1957, т. 12, вып. 4(76).
2. Birkhoff G., Mac Dougall D. P., Pugh E., Taylor G. Explosives with lined cavities.— J. Appl. Phys., 1948, vol. 19.
3. Титов В. М. Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки.— ДАН СССР, 1979, т. 247, № 5.
4. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар.— В сб.: Физика быстропротекающих процессов. Т. 2. М., Мир, 1971.
5. Лёконт К. Высокоскоростное метание.— В сб.: Физика быстропротекающих процессов. Т. 2. М., Мир, 1971.
6. Chou P. C., Carleone J., Karpp R. R. Criteria for jet formation from impinging shells and plates.— J. Appl. Phys., 1976, vol. 47, N 7.
7. Титов В. М., Швецов Г. А. Лабораторные методы высокоскоростного метания твердых тел взрывом.— ФГВ, 1970, № 3.

УДК 539.2 : 539.4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ДО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗКАХ

В. В. Болотин

(Москва)

Прогнозирование времен до достижения элементом конструкции некоторого сного состояния (например, разрушения) представляет интерес как с точки зрения проектирования вновь создаваемых конструкций, так и с точки зрения контроля текущего состояния конструкций в процессе их эксплуатации. В последнем случае результаты прогнозирования служат для решения вопроса о целесообразности или безопасности дальнейшей эксплуатации данной конструкции, о необходимых профилактических мерах и т. п. С позиций механики прогнозирования времен до разрушения является комплексной задачей, включающей описание процесса накопления повреждений и процесса развития макроскопических трещин в конструкции, оценку снижения несущей способности поврежденной конструкции и ее живучести в условиях нагружения, которое, как правило, носит случайный характер и задается некоторыми априорными распределениями. В данной статье развивается модель накопления повреждений в элементах конструкций, условно разделяемая на две стадии — инкубационную и стадию распространения магистральных трещин. При этом постулируется связь между феноменологической мерой повреждения, зависящей от процесса нагружения, и математическим ожиданием числа макроскопических трещин, зародившихся в некотором эталонном объеме. Другим существенным элементом развиваемого подхода служит применение центральной предельной теоремы для асимптотической оценки распределений нестационарных случайных процессов, характеризующих накопление повреждений в элементе конструкции и его остаточную несущую способность.

1. Рассмотрим тело объемом V , которое подвергается длительному действию случайных медленно изменяющихся или циклических нагрузок. Относительно последних будем предполагать, что их параметры меняются достаточно медленно, так что процесс циклического нагружения можно приближенно рассматривать как протекающий непрерывно в «медленном» времени t . Поле номинальных напряжений в теле будем описывать при помощи вектора-функции $s(x, t)$, где x — радиус-вектор точек тела. Разобьем тело на части, объем которых имеет порядок V_0 . Эти части выберем так, чтобы размер каждой из них был достаточно велик по сравнению с масштабом структуры материала и с характерным размером l_* зародышевой макроскопической трещины. С другой стороны, размеры