

УВЕЛИЧЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ
ПРИ УДАРЕ ПО НЕОДНОРОДНОЙ ПРЕГРАДЕ

В. И. Лаптев, Ю. А. Тришин

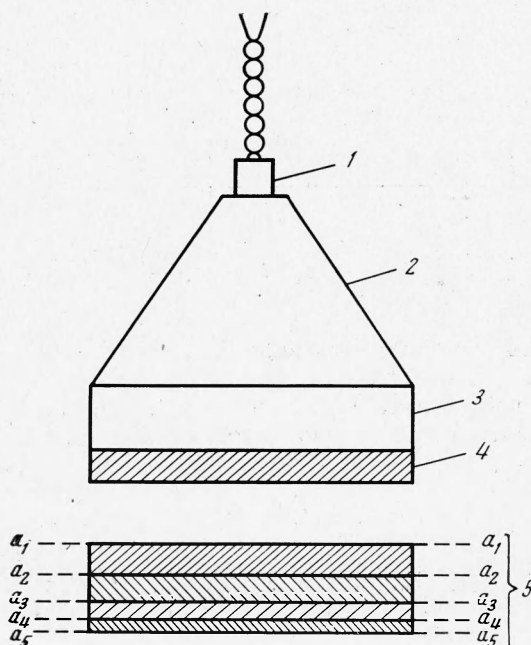
(Новосибирск)

На основе анализа, проведенного при помощи метода (p, u) -диаграмм в акустическом приближении, показано, что при распространении ударной волны по преграде, у которой акустическое сопротивление слоев уменьшается в направлении распространения, массовая скорость материала преграды увеличивается и может превысить начальную скорость бойка. В случае удара бойка по преграде, у которой акустический импеданс слоев увеличивается в направлении распространения ударной волны, наблюдается увеличение давления за фронтом волны аналогично примеру неограниченной кумуляции в плоской ударной волне, рассмотренному в [2].

Эффект увеличения скорости проверен экспериментально.

Рассмотрим в одномерной постановке задачу о распространении ударных волн, образующихся при соударении бойка с преградой — набором пластин.

Обозначим индексом 0 параметры, характеризующие боек, а индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) — параметры пластин преграды, пластина $i = 1$ обра-



Фиг. 1

щена к бойку. Контактные поверхности между пластинами обозначим через $a_i a_i$ ($\bar{a}_1 \bar{a}_1$ — контактная поверхность между бойком и первой пластиной набора, $a_{m+1} a_{m+1}$ — тыльная свободная поверхность пластинчатой преграды) (фиг. 1)

Пусть до соударения неподвижная преграда имеет параметры

$$\rho_i, c_i, u_i = 0, p_i = 0$$

а налетающая пластина конечной толщины — $\rho_0, c_0, u_0, p_0 = 0$ (ρ — плотность материала, c — скорость звука в материале, u — массовая скорость, p — давление).

При соударении как в преграде, так и в бойке образуются ударные волны, которые распространяются от поверхности соударения a_1a_1 в противоположные стороны. Обозначим скорость движения границ раздела $a_i a_i$ через u_{ai} , а давление в области между фронтами волн, претерпевающих распад разрыва на контактной поверхности $a_i a_i$, через p_{ai} .

Столкновение пластин удобно рассматривать в координатах p, u . Начальные состояния покоящейся преграды ($p_i = 0, u_i = 0$) и бойка ($p_0 = 0, u = u_0$) изображены точками O и M (фиг. 2).

Будем рассматривать задачу в акустическом приближении

$$(1) \quad u_0 \ll c_0, c_i$$

Кривая в плоскости переменных p, u с центром (u_{ai}, p_{ai}) имеет вид

$$(2) \quad (p - p_{ai}) (1/\rho_{ai} - 1/\rho(p)) = (u - u_{ai})^2$$

Для металлов при давлениях порядка 10^5 атм часто используют эмпирическое уравнение состояния типа

$$(3) \quad p = \frac{\rho_i c_i^2}{n} \left[\left(\frac{p}{\rho_i} \right)^n - 1 \right]$$

в котором n считается постоянным.

Для слабых ударных волн положим

$$(4) \quad \rho/\rho_i = 1 + \varepsilon, \quad \varepsilon \ll 1, \quad \rho_{ai}/\rho_i = 1 + \varepsilon_{ai}, \quad \varepsilon_{ai} \ll 1$$

Подставляя (3) в уравнение (2) и учитывая (4), имеем

$$(5) \quad p - p_{ai} = \pm [(p_{ai} + \rho_i c_i^2)(p + \rho_i c_i^2)]^{1/2} \frac{u - u_{ai}}{c_i}$$

Максимальное давление, которое может развить боек, реализуется при его торможении на абсолютно жесткой преграде

$$(6) \quad p_* = \rho_0 c_0 u_0$$

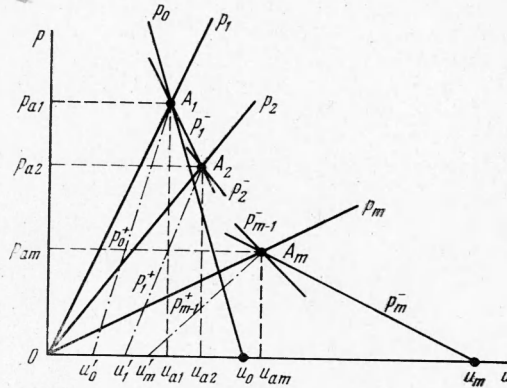
Поэтому в уравнении (5), учитывая соотношения (1) и (6), можно в знаменателе пренебречь величинами p и p_{ai} по сравнению с $\rho_i c_i^2$.

Тогда из (5) получаем

$$(7) \quad p - p_{ai} = \pm \rho_i c_i (u - u_{ai})$$

что свидетельствует о том, что в акустическом приближении ударные адиабаты в плоскости pu есть прямые линии (7).

Воспользуемся некоторыми свойствами (p, u) — диаграмм. Из (2) видно, что кривая симметрична относительно прямой $u = u_{ai}$, что следует



Фиг. 2

также из (7); (p, u) -диаграмма состоит из двух ветвей, пересекающихся в ее центре под конечным углом, тангенс которого равен величине акустического импеданса.

Задача определения параметров ударной волны при соударении бойка с первой пластиной преграды сводится к определению точки пересечения A_1 прямых p_0 и p_1 (фиг. 2)

$$(8) \quad p_0 = -R_0(u - u_0), \quad p_1 = R_1 u$$

где $R_0 = \rho_0 c_0$ — акустический импеданс материала бойка, $R_1 = \rho_1 c_1$ — акустический импеданс материала первой пластины.

Из (8) следует:

$$(9) \quad u_{a1} = \frac{R_0}{R_0 + R_1} u_0, \quad p_{a1} = \frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1} u_0$$

При распространении образовавшейся ударной волны по пластинам мишени нужно рассматривать распад разрыва на каждой контактной поверхности $a_i a_i$ ($i = 2, 3, \dots, m + 1$).

Рассмотрим случай соударения бойка с преградой, у которой акустический импеданс пластин уменьшается от пластины к пластине в направлении распространения ударной волны, возбужденной бойком. Положим

$$(10) \quad R_0 \geq R_1 > R_2 \dots > R_m$$

Выберем такую преграду, чтобы для каждой пластины выполнялось соотношение

$$(11) \quad l_k / c_k = l_{k+1} / c_{k+1}$$

где l_k, l_{k+1} — соответственно толщины предыдущей и последующей пластин в преграде. В этом случае окончательные массовые скорости в k -пластине определяются только распадом разрыва на $(k + 1)$ -й контактной поверхности.

В плоскости переменных p, u состояния пластинчатой преграды описываются пучком прямых, выходящих из точки O (фиг. 2)

$$p_i = R_i u \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

При переходе ударной волны с параметрами p_{a1}, u_{a1} (точка A_1) из первой пластины преграды во вторую от контактной поверхности $a_2 a_2$ в обе стороны распространяется волна с параметрами p_{a2}, u_{a2} . Массовая скорость и давление в этой волне определяются точкой пересечения A_2 прямой p_2 и прямой p_1^- , симметричной p_1 относительно $u = u_{a1}$ (p_i^- симметричны прямой p_i относительно $u = u_{ai}$). В дальнейшем этот процесс повторяется. Видно (фиг. 2), что при прохождении ударной волны по пластинчатой преграде, у которой акустический импеданс уменьшается от пластины к пластине, массовые скорости за фронтом ударной волны растут от пластины к пластине. На этом основан эффект ускорения пластин.

Из фиг. 2 можно найти соотношение, связывающее массовую скорость u_m последней пластины преграды с начальной скоростью u_0 бойка

$$(12) \quad u_m = \frac{2^m}{\prod_{i=1}^m (1 + R_i / R_{i-1})} u_0$$

Из (12) видно, что если для пластинчатой мишени выполнено соотношение (10), то $u_m > u_0$. Акустическое приближение для (p, u) -диаграмм упрощает громоздкие математические выкладки, сохраняя и обнажая физический смысл явления.

Эффект увеличения массовой скорости при соударении бойка с пластинчатой преградой будет иметь место и для больших скоростей соударения, когда акустическое приближение неприменимо.

Для проверки (12) были проведены эксперименты по соударению пластины — бойка с пластинчатой преградой. Постановка эксперимента ясна из фиг. 1. На этой фигуре 1 — капсюль-детонатор, 2 — генератор плоской детонационной волны, 3 — заряд взрывчатого вещества (ТГ 50/50), находящийся в контакте с бойком 4, 5 — пластинчатая преграда.

В экспериментах измерялись скорость бойка (u_0) и скорость (u_m) последней пластины преграды. Во всех экспериментах заряд ВВ толщиной 10 мм и стальной боек 3 мм толщиной оставались постоянными: менялось сочетание материала пластин в преграде. Съемка производилась как на импульсной рентгеновской установке, так и на СФР, работающем в режиме покадровой съемки. Измеренная скорость бойка $1.46 \text{ км/сек} \pm 14\%$. Результаты экспериментов приведены в таблице. В последней колонке таблицы приведены значения u_m / u_0 , вычисленные по (12), величины ρ_i и c_i для материалов бойка и пластин преграды взяты из [1].

i	Преграда		u_m/u_0 среднее экспериментальное	u_m/u_0 по формуле (12)
	материал	толщина, мм		
1	медь	3	1.66	1.48—1.5
2	латунь	2		
3	дюралюминий	1		
1	медь	3	1.33	1.44—1.46
2	дюралюминий	1		
1	дюралюминий	3	2.06	2.45
2	полиэтилен	1		

Импульсная рентгеносъемка дает возможность определять скорости любой пластины преграды. Это позволяет дополнительно контролировать правильность приведенных рассуждений. На фиг. 2 точками u_0', u_1', \dots на оси u указаны состояния бойка и пластин преграды после прохождения по ним ударной волны (k -пластина переходит из состояния p_{ak}, u_{ak} в состояние $p = 0, u = u_k'$ по прямой p_k^+ , симметричной прямой p_k^- относительно $u = u_{a(k+1)}$).

На фиг. 3 приведены фотографии покадровой съемки на рентгене удара стальной пластины по преграде, состоящей из 3 мм медной, 2 мм латунной и 1 мм дюралюминиевой пластин. На первом кадре виден движущийся боек до соударения с преградой (16 мксек), а на последующих — разлет пластин преграды (35 и 40 мксек). Времена отсчитываются с момента инициирования капсюля-детонатора.

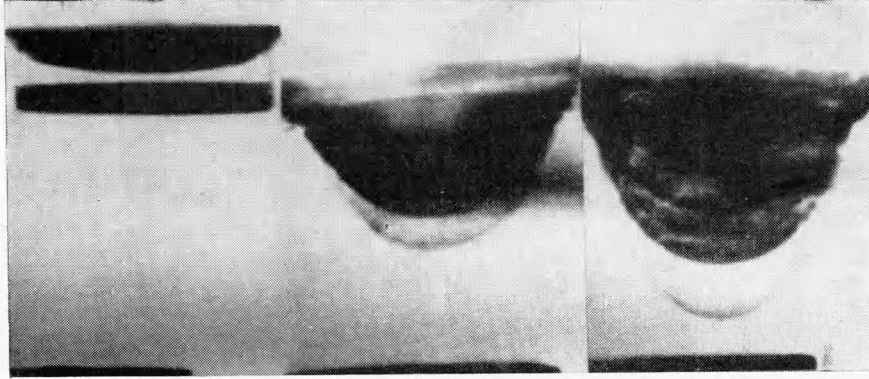
Эксперименты подтверждают эффект увеличения массовой скорости при ударе бойка по преграде из пластин, в которой величины акустического импеданса удовлетворяют соотношению (10).

Из фиг. 2, если рассматривать состояния за фронтами ударных волн на каждом контактном разрыве $a_i a_i$ справа налево, т. е. от точки A_m до A_1 , следует важный физический эффект — увеличение амплитуды давления при распространении ударной волны в пластинчатой преграде, у которой

$$(13) \quad R_1 < R_2 < \dots < R_m$$

т. е. акустический импеданс увеличивается от пластины к пластине в направлении распространения ударной волны.

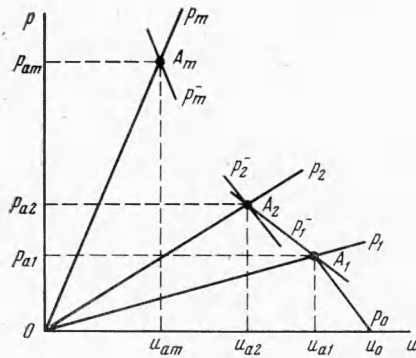
На аналогичный эффект кумуляции в плоской ударной волне указал Е. И. Забабахин [2]. Им рассмотрено движение волны с фронтом, параллельным слоям, в системах с чередующимися плоскими слоями из легкого и тяжелого веществ. Если толщины тяжелых слоев равны между собой (то



Фиг. 3

же для легких слоев), т. е. система периодическая, то в ней может идти ударная волна с периодически меняющимся давлением на фронте. Если каждый тяжелый слой сделать тоньше предыдущего (то же для легких слоев), то при ударе он может получить большую скорость, следующему слою

он передаст еще большую скорость и т. д., т. е. ударная волна будет усиливаться.



Фиг. 4

Рассмотренный случай пластинчатой преграды также указывает на возможность усиления амплитуды ударной волны в плоских системах слоев с различными акустическими импедансами, подчиняющимися соотношению (13). Усиление будет иметь место лишь в случае, если потери энергии на нагревание будут невелики. Для оценки потерь энергии на нагревание и остаточную кинетическую энергию слоев расчеты нужно провести для реальных (p, u)-диаграмм материала слоев преграды,

составленной из слоев с учетом (11) и (13).

Соответствующие формулы для величин давления и массовой скорости для $m + 1$ слоя преграды можно получить из фиг. 4

$$(14) \quad p_{a(m+1)} = \frac{2^m}{\prod_{i=1}^m (1 + R_i / R_{i+1})} p_{a1}, \quad u_{a(m+1)} = \frac{2^m}{\prod_{i=1}^m (1 + R_{i+1} / R_i)} u_{a1}$$

где p_{a1} и u_{a1} определяются соотношением (9). Так как для преграды (13) $R_i < R_{i+1}$, то формулы (14) указывают на рост давления в проходящей ударной волне при одновременном уменьшении массовой скорости.

Поступила 11 VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М., «Наука», 1966.
2. Забабахин Е. И. Явления неограниченной кумуляции. Механика в СССР за 50 лет. т. 2. М., «Наука», 1970.