

рость, как и следовало ожидать, изменяется медленнее. Падение начальной скорости звука вместе с начальной плотностью увеличивает изменение скачка скорости на фронте. Рост начальной скорости звука влияет на изменение массовой скорости вещества в обратную сторону.

Вариант	α	β	κ	δ
1	0,5	0,2	0	0
1'	0,5	0,2	-0,5	-0,2
2	0,5	0	0	0
2'	0,5	0	-0,5	0
3	0,185	0,0342	0	0
3'	0,185	0,0342	-0,185	0,0342

4. Квадратичные приближения дают хорошее согласие с результатами численного решения: лучше всего для плотности сжатого вещества, несколько хуже для скорости и давления и, как следовало ожидать, хуже всего для доли теплового давления в общем давлении.

Таким образом, полученные разложения позволяют проследить за общими закономерностями влияния неоднородности начальных свойств среды на распространение ударной волны в ней. Выбирая соответствующую неоднородную среду, можно до известной степени управлять распространением в ней ударной волны.

В заключение приношу благодарность А. С. Компанейцу за общее руководство работой и П. А. Ямпольскому, принявшему участие в постановке настоящей задачи.

Поступила в редакцию
25/1 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Гандельман, Д. А. Франк-Каменицкий. Докл. АН СССР, 1956, 107, 811.
2. Ю. П. Райзер. ПМТФ, 1964, 4, 49.
3. Ю. П. Райзер. Докл. АН СССР 1963, 153, 551.
4. W. Choster, R. Collins. Isr. Technol. 1970, 8, 4, 345.
5. J. D. Shraiman, J. P. Hui, B. Ahlborn. J. Fluid. Mech., 1970, 43, 3, 487.
6. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
7. Х. С. Кастенбойм. Канд. дисс. М., 1971.
8. Г. С. Росляков, Л. А. Чудов. Численные методы в механике сплошных сред. Ч. 3. Изд. МГУ, 1969.

УДК 662.215.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СТЕНКИ ТРУБЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ВНУТРЕННЕГО ЗАРЯДА ВВ

Н. Н. Тарасенко

(Днепропетровск)

Вопрос о движении стенки трубы, находящейся под внутренним или наружным давлением, рассматривается в ряде работ [1—9]. В работах [3—9] исследуется (в основном теоретически) радиальное движение стенки трубы под действием продуктов детонации (ПД) внутренне-

го сплошного цилиндрического заряда ВВ [3, 5—9] или наружного заряда ВВ в виде полого цилиндра [4, 5].

В работе [7] решена двумерная задача о движении стенки трубы под действием ПД с учетом осевого истечения ПД. В остальных упомянутых работах при определении радиальной скорости движения стенки трубы делалось допущение об отсутствии осевого истечения ПД (рассматривалась одномерная схема метания). При решении одномерной задачи о движении стенки трубы, подверженной импульсной нагрузке, авторами делались некоторые допущения для упрощения решения этой довольно сложной математической задачи, задавался закон падения давления в ПД, и с помощью динамических уравнений механики сплошной среды получались нелинейные дифференциальные уравнения движения стенки трубы, которые, как правило, интегрируются только численно.

В настоящей работе приведен анализ экспериментов по определению скорости движения стенки металлической трубы под действием ПД внутреннего заряда ВВ, на основании которого предложены формулы для определения радиальной скорости стенки трубы в зависимости от скорости детонации ВВ в заряде, относительного веса заряда, материала трубы, отношения ее диаметра к толщине стенки и приращения диаметра в процессе взрывной раздачи, а также приведено сравнение результатов экспериментов и расчетов по формулам из работ [3, 6, 9], не требующим машинного счета.

Методика экспериментов

Для измерения радиальной скорости стенки трубы v (в эксперименте средней скорости на некотором участке) применялся электроконтактный способ с использованием катодного осциллографа (ОК-17М) и конденсаторной схемы. Запуск развертки на экране осциллографа производился при соударении стенки трубы с пусковым контактом датчика, выдвинутым вперед и в сторону от измерительных контактов (рис. 1). На второй луч подавались метки времени от ГСС (ГЗ-7А). Пусковой и два измерительных контакта изготавливались из медной проволоки толщиной 0,3 мм. Оба измерительных контакта располагались в плоскости, перпендикулярной к оси трубы. Для уменьшения тормозящего влияния первого измерительного контакта на характер дальнейшего движения стенки трубы в зоне соударения с контактом и предотвращения соприкосновения измерительных контактов между собой первый контакт изгибался под углом около 45° к направлению радиуса трубы (рис. 1). База между измерительными контактами выбиралась равной от 0,3 (при наружном диаметре трубы $d_r=20$ мм) до 0,6 мм (при $d_r=60$ мм) и измерялась с погрешностью не более 5 мк под микро-

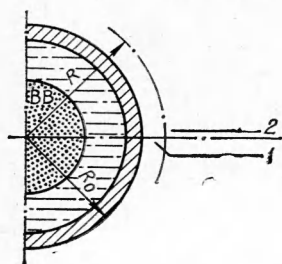


Рис. 1. Схема расположения контактов игольчатого датчика для определения радиальной скорости движения стенки трубы.

скопом (УИМ-21). Расстояние между концами измерительных контактов в поперечном направлении равнялось $0,2 \div 0,4$ мм. Погрешность определения расстояния ($1 \div 6$ мм) от стенки трубы в исходном положении до первого измерительного контакта оценивалась в 0,1 мм. Длина «метаемой» трубы равнялась $2 \div 5$ ее диаметрам. Датчик устанавливался на расстоянии 0,7 длины трубы от ее начала, куда при открытых торцах трубы наиболее поздно приходит волна разрежения по ПД. Измеренное среднее значение v на базе считалось равным мгновенному значению v на ее середине.

Определялись скорости движения стенок алюминиевых, медных и стальных труб под действием ПД цилиндрических зарядов аммиачно-селитряных ВВ (аммиачная селитра+тротил) в диапазонах скоростей детонации $D=1,3\div 4,0$ км/с (в ряде случаев в качестве флегматизатора применялась поваренная соль).

Значения D получали при взрывании аналогичных зарядов ВВ практически в тех же условиях при помощи осциллографа (ОК-17М) и ионизационных датчиков (база измерения D составляла $50\div 200$ мм).

Эксперименты по определению v , как правило, дублировались. Всего было проведено около 180 опытов. Среднеквадратичное отклонение значений v при воспроизведении опытов составило 5,3%. Опыты по нахождению D дублировались выборочно. При этом среднеквадратичное отклонение было равно 2,6%.

Результаты экспериментов

На рис. 2 результаты экспериментов представлены в координатах $\frac{v}{D} - r$, где r — относительный вес заряда, равный отношению веса заряда к весу метаемой среды на единичной длине (в ряде опытов между соосно собранными трубой и зарядом заливалась вода, и вес метаемой среды слагался из веса трубы и слоя воды).

По результатам всех опытов построена методом наименьших квадратов результирующая кривая, аналитическое выражение которой имеет вид:

$$\frac{v}{D} = f(r) = 0,413 \cdot r^3 - 0,863 \cdot r^2 + 0,634 \cdot r + 0,058, \quad (1)$$

$$0,03 \leq r \leq 1,08.$$

Таким образом значения v можно найти в зависимости от D и r из выражения (1) без учета остальных факторов, влияние которых будет рассмотрено ниже. Среднее квадратичное отклонение значений v , рассчитанных по формуле (1) от опытных данных, составило 11,3%.

На рис. 2 можно отметить зависимость отношения v/D от материала трубы и величины R/R_0 (где R_0 и R — соответственно начальный наружный радиус трубы и наружный радиус расширяющейся трубы в момент измерения v , рис. 1). Эту зависимость можно учитывать, вводя в правую часть выражения (1) коэффициент A (рис. 3). На рис. 3 видна тенденция к уменьшению скорости движения стенок труб, выполненных из более труднодеформируемых металлов. Этот естественный факт подчеркивает, что гидродинамический подход к решению рассмат-

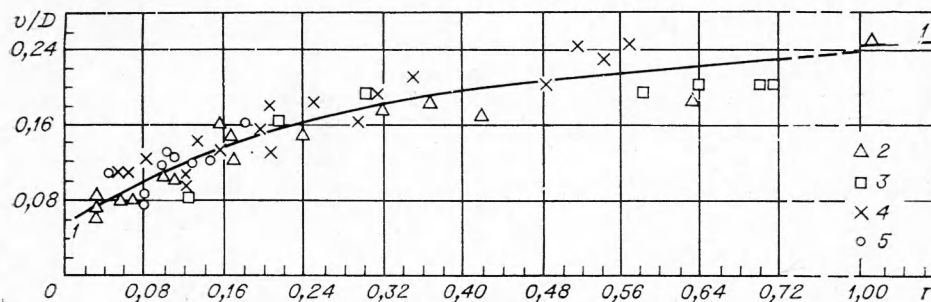


Рис. 2. Зависимость отношения радиальной скорости движения стенки трубы v (алюминий, медь, сталь) к скорости детонации D внутреннего заряда ВВ от относительного веса заряда r .

1 — по формуле (1); отношение радиуса расширяющейся трубы R (в момент измерения v) к начальному ее радиусу R_0 : 2 — $1,08 \pm 1,12$; 3 — $1,13 \pm 1,16$; 4 — $1,17 \pm 1,20$; 5 — $1,21 \pm 1,24$.

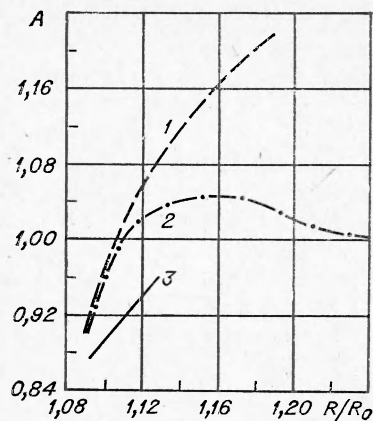


Рис. 3. Зависимость коэффициента A от материала метаемой трубы и R/R_0 .

Материал трубы: 1 — алюминий, 2 — медь, 3 — сталь.

риваемой задачи является приближенным, и для более точных расчетов необходимо учитывать прочностные свойства материала трубы.

Заметно также ускорение движения стенок стальных и алюминиевых труб при росте отношения R/R_0 . Зависимость $A(R/R_0)$ для медных труб имеет максимум. Для более точного определения v , чем это можно сделать, используя выражение (1), необходимо вводить коэффициент A , учитывающий зависимость v от материала трубы (алюминий, медь или сталь) и отношения R/R_0 , который определяется графически из рис. 3 или аналитически

$$A_{Al} = -22,0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 + 53,32 \frac{R}{R_0} - 31,08,$$

$$1,09 \leq \frac{R}{R_0} \leq 1,19; \quad (2)$$

$$A_{Cu} = 189,3224 \left(\frac{R}{R_0} \right)^3 - 679,2980 \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 + 811,4723 \frac{R}{R_0} - 321,7098, \quad (3)$$

$$1,09 \leq \frac{R}{R_0} \leq 1,20;$$

$$A_c \approx 2,29 \frac{R}{R_0} - 1,63, \quad 1,09 \leq \frac{R}{R_0} \leq 1,13. \quad (4)$$

Таким образом, можно записать:

$$\frac{v}{D} \approx A (0,413r^3 - 0,863r^2 + 0,634r + 0,058), \quad (5)$$

$$0,03 \leq r \leq 1,08.$$

Среднеквадратичное отклонение опытных точек в случае применения формулы (5) снижается до 10,0%.

Отмечается уменьшение экспериментальных v/D относительно значений, определенных по формуле (1) при $\frac{d_T}{s_T} < 20$ (где s_T — толщина

стенки трубы). На рис. 4 представлена зависимость $\delta \left(\frac{v}{D} \right)_{cp}$ от $\frac{d_T}{s_T}$

(где $\delta \left(\frac{v}{D} \right)_{cp} = \left(\frac{v_{\text{экс}} - v_{\text{расч}}}{v_{\text{экс}}} \right)_{cp}$), которая не имеет места при $\frac{d_T}{s_T} \geq 20$,

а при $10 \leq \frac{d_T}{s_T} < 20$ выражается кривой с малой кривизной, которую можно аппроксимировать прямой

$$\delta \left(\frac{v}{D} \right)_{cp} \approx -0,021 \left(20 - \frac{d_T}{s_T} \right). \quad (6)$$

Значения v уменьшаются при $\frac{d_T}{s_T} < 20$, по-видимому, в первую очередь из-за увеличения прочности трубы как конструкции.

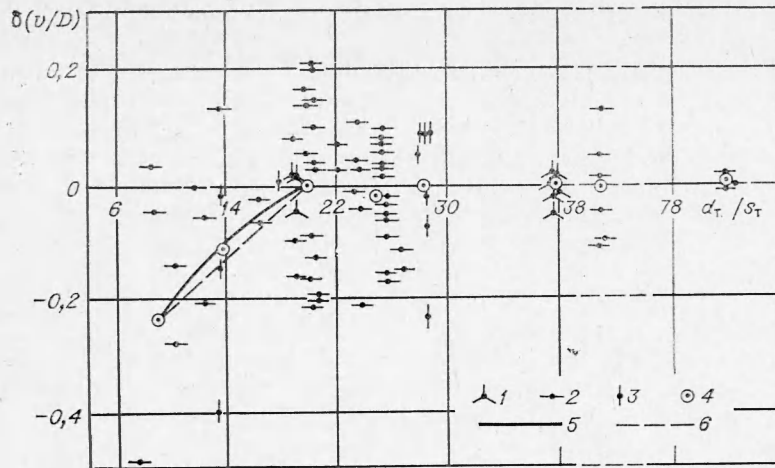


Рис. 4. Зависимость $\delta\left(\frac{v}{D}\right)$ от d_T/s_T .

1 — алюминий, 2 — медь, 3 — сталь; 4 — среднее значение $\delta\left(\frac{v}{D}\right)$, 5 — зависимость $\delta\left(\frac{v}{D}\right)_{\text{ср}}$ от $\frac{d_T}{s_T}$; 6 — аппроксимирующая прямая.

Результаты опытов при $\frac{d_T}{s_T} < 20$ не учитывались при построении кривых, определяющих величину коэффициента A (см. рис. 3). Поэтому результирующее выражение для определения v будет иметь вид:

$$\frac{v}{D} \approx A(0,413r^3 - 0,863r^2 + 0,634r + 0,058) \cdot \left[1 - 0,021 \left(20 - \frac{d_T}{s_T}\right)\right],$$

$$0,03 \leq r \leq 1,08; \quad 10 \leq \frac{d_T}{s_T} < 20. \quad (7)$$

При $\frac{d_T}{s_T} \geq 20$ следует пользоваться формулой (5).

Для опытов с $\frac{d_T}{s_T} < 20$ среднеквадратичное отклонение при вычислении v по формуле (5) равно 11,6% и снижается до 8,9% при использовании формулы (7).

Отсутствие влияния изменения отношения $\frac{d_T}{s_T} > 20$ на скорость движения стенки трубы можно объяснить следующим образом. Согласно [2], величина внутреннего давления, необходимого для преодоления пластического сопротивления материала деформируемого полого цилиндра, пропорциональна $\ln\left(\frac{R_b}{R_a}\right)$, где R_b и R_a — соответственно наружный и внутренний радиусы цилиндра. Если учесть, что при раздаче трубы происходит заметное увеличение d_T/s_T , то в исследуемом диапазоне R/R_0 значение d_T/s_T может изменяться, например, от 20 до 24÷31. При таких d_T/s_T величина $\ln\left(\frac{R_b}{R_a}\right)^2$ начинает асимптотически приближаться к нулю и поэтому трудно уловить изменение влияния прочностных свойств трубы как конструкции на характер движения ее стенки.

Сравнение эксперимента с теорией

В работе [10] изложена одномерная схема метания тел продуктами детонации, предложенная Гарни [11]. При ряде упрощающих допущений из уравнений сохранения импульса и энергии удается получить простые формулы для определения скоростей метания двух тел в противоположные стороны, а также определить скорость при метании одного тела. В последнем случае формула Гарни имеет вид:

$$\frac{v}{D} = \frac{r}{r+2} \sqrt{\frac{3}{n^2-1}}, \quad (8)$$

где n — показатель адиабаты ПД. Для применения предположения Гарни в случае метания трубы, очевидно, достаточно воспользоваться законом сохранения энергии. Аналогично рассуждениям, приведенным в [10], будем считать распределение скоростей продуктов детонации удовлетворяющим отношению

$$v(R) = v_a \frac{R}{R_a}, \quad (9)$$

здесь v_a — скорость движения границы ПД — метаемая среда, R_a — внутренний радиус трубы, равный радиусу заряда, R — текущий радиус, отсчитываемый от центра трубы. Делаем допущение, что v_a постоянно по сечению трубы, тогда кинетическая энергия трубы будет $\frac{Mv_a^2}{2}$, где M — масса трубы.

Удельная внутренняя энергия продуктов взрыва Q_0 , связана с D и n отношением

$$Q_0 = \frac{D^3}{2(n^2-1)}. \quad (10)$$

Кинетическая энергия ПД определяется в данном случае выражением

$$\int_0^{2\pi} R d\varphi \int_0^{R_a} \rho_0 \frac{v^2(R)}{2} dR,$$

где φ — тангенциальная координата; ρ_0 — плотность ПД, равная плотности ВВ. Закон сохранения энергии запишем в виде

$$mQ_0 = \frac{Mv_a^2}{2} + \int_0^{2\pi} R d\varphi \int_0^{R_a} \rho_0 \frac{v^2(R)}{2} dR, \quad (11)$$

где m — масса ПД.

Подставив в (11) выражения (9) и (10) и проведя необходимые преобразования, можно получить формулу для метания трубы

$$\frac{v}{D} = \sqrt{\frac{2}{n^2-1}} \cdot \sqrt{\frac{r}{r+2}}, \quad (12)$$

а при $n=3$

$$\frac{v}{D} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r}{r+2}}. \quad (13)$$

Данная одномерная схема не позволяет учесть в формулах (12) и (13) изменения радиальной скорости трубы в зависимости от текущего радиуса.

Следует отметить хорошее совпадение положения результирующей экспериментальной кривой (см. рис. 2) с кривой зависимости v/D от r , построенной по формуле (13) в диапазоне значений r от 0,08 до 0,40 (рис. 5, 3). Это совпадение, по-видимому, не соответствует абсолютно-

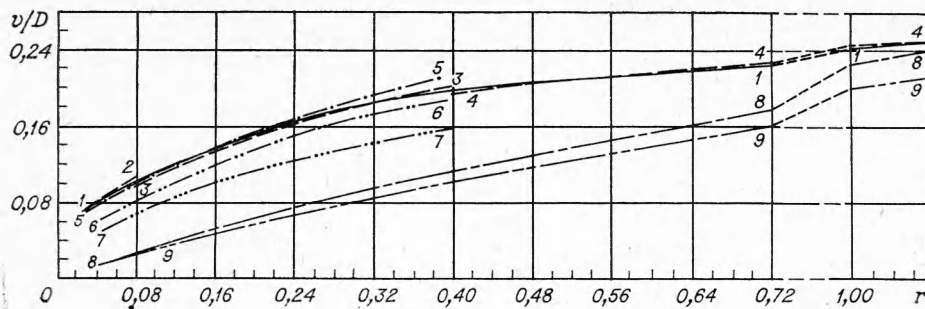


Рис. 5. Зависимость v/D от r .

1 — экспериментальная результирующая кривая; 2 — по уравнению (14) без учета коэффициента A ; 3 — по уравнению (13) в диапазоне r от 0,08 до 0,40; 4 — по уравнению (18) без учета коэффициента A ; 5, 6, 7 — по формуле (20) [3] при n и R/R_0 соответственно: 2 и 1,23; 2,5 и 1,23; 2 и 1,10; 8 — по формуле $\frac{v}{D} = 1,2 \frac{\sqrt{1+1,18r}-1}{\sqrt{1+1,18r}+1}$ [14, 15]; 9 — по формуле (8) [10].

му реальному процессу, так как у применяемых ВВ n существенно меньше трех [12, 13]. В то же время в одномерной схеме не учитывается влияние осевого истечения ПД. Учет $n < 3$ привел бы к превышению расчетных значений v/D , вычисляемых по формуле (12), относительно значений v/D , вычисляемых по формуле (13) при $n=3$. С другой стороны, учет влияния осевого истечения ПД и градиента скорости v по толщине стенки трубы привел бы к снижению расчетных значений

Диапазон изменения значений r	Диапазон изменения значений $\frac{d_T}{s_T}$	Формула	Количество экспериментов	Среднеквадратичное отклонение от расчетных данных от эксперимента (%) по		
				(14) — (19)	(5)	(7)
$0,03 \leq r < 0,08$	$\frac{d_T}{s_T} \geq 20$	$\frac{v}{D} \approx 0,29A \cdot \sqrt{\frac{r+0,017}{r+0,667}}$ (14)	29	12,2	11,0	—
	$10 \leq \frac{d_T}{s_T} < 20$	$\frac{v}{D} \approx 0,29A \cdot \sqrt{\frac{r+0,017}{r+0,667}} \times \left[1 - 0,021 \left(20 - \frac{d_T}{s_T} \right) \right]$ (15)	10	7,8	—	7,8
$0,08 \leq r < 0,40$	$\frac{d_T}{s_T} \geq 20$	$\frac{v}{D} \approx 0,50A \cdot \sqrt{\frac{r}{r+2}}$ (16)	85	11,5	9,5	—
	$10 \leq \frac{d_T}{s_T} < 20$	$\frac{v}{D} \approx 0,50A \cdot \sqrt{\frac{r}{r+2}} \times \left[1 - 0,021 \left(20 - \frac{d_T}{s_T} \right) \right]$ (17)	20	10,0	—	10,2
$0,40 \leq r < 1,08$	$\frac{d_T}{s_T} \geq 20$	$\frac{v}{D} \approx 0,32A \cdot \sqrt{\frac{r}{r+0,667}}$ (18)	23	10,0	8,3	—
	$10 \leq \frac{d_T}{s_T} < 20$	$\frac{v}{D} \approx 0,32A \cdot \sqrt{\frac{r}{r+0,667}} \times \left[1 - 0,021 \left(20 - \frac{d_T}{s_T} \right) \right]$ (19)	8	7,7	—	8,0
Средневзвешенное значение по результатам всех опытов.				10,9	9,5	

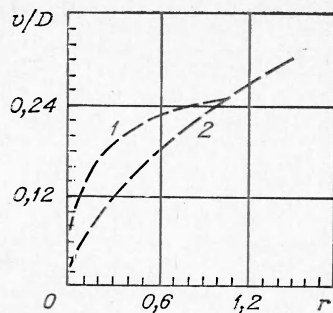


Рис. 6. Сравнение экспериментально определенной зависимости v/D от r при метании пластин [15] и раздаче труб.
1 — по формуле (1); 2 — обобщающая кривая по данным [15] (метание пластин).

v/D , определенных по одномерной схеме, например, с использованием формулы (12). По-видимому, влияние этих противоположных факторов практически компенсируется, что ведет к совпадению кривых 1 и 3. В диапазонах $0,03 \leq r < 0,08$ и $0,40 \leq r \leq 1,08$ с кривой 1 (см. рис. 6) хорошо совпадают кривые 2 и 4 (см. таблицу). Таким образом, приближенную зависимость v/D от r также можно представить в более лаконичном виде.

Из анализа значений σ , приведенных в таблице, следует, что вычисления v по формуле (5) более точные по сравнению с вычислениями по формулам (14), (16) и (18).

Отмечено, что средние отклонения рассчитанных v от опытных данных при отсутствии слоя воды между зарядом и трубой примерно на 2% выше, чем с водяной прослойкой. По-видимому, это объясняется в первую очередь сжимаемостью воды (более существенной, чем у металлов), что должно снижать значения v при наличии водяной прослойки. Поэтому для определения v при взрывании зарядов ВВ, заполняющих трубу полностью, в правые части формул (1), (5), (7), (14) — (19) целесообразно вводить коэффициент 0,98.

В работе [15] представлена экспериментальная зависимость значений v/D от r при метании плоских металлических пластин зарядами порошкообразных ВВ (рис. 6). Там же нанесена результирующая кривая из рис. 2. Можно отметить более высокое положение кривой 1 относительно кривой 2, что естественно, так как КПД заряда при взрывании в трубе должен быть выше, чем при взрывании на пластине. При росте r разница в величинах v/D для метания стенки трубы и пластины при одном и том же r уменьшается. Это происходит, по-видимому, потому, что на трубу начинает действовать преимущественно только так называемая эффективная часть заряда, в данном случае периферийный слой некоторой толщины.

В работе [3] рассмотрен вопрос о движении стенки трубы по одномерной схеме. С учетом переменного n формула из [3] имеет вид

$$\frac{v}{D} = \sqrt{\frac{1}{n^2 - 1} \cdot \frac{m}{M} \cdot \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{2n-2} \right]}. \quad (20)$$

При ее выводе использованы соображения о мгновенной детонации и предположения о несжимаемости материала метаемой трубы. В случае, когда $n=3$ и $R \rightarrow \infty$

$$\frac{v}{D} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r}{2}}. \quad (20')$$

В реальных процессах удовлетворительное совпадение расчета по формуле (20) с экспериментом наблюдается только при $\frac{R}{R_0} > 1,2$.

В работе [6] предлагается формула для приближенного расчета осесимметричного движения стенки трубы при деформации взрывом (при $n=3$)

$$v = \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot D^2 \cdot s}{2\rho_T s_T}}, \quad (21)$$

где ρ_T — плотность материала трубы; s — приращение радиуса трубы по достижении стенкой значения v . Вычисленные по формуле (21) v в $1,1 \div 3,4$ раза превышают опытные данные, полученные в настоящей работе. Среднее превышение равно 1,93, поэтому в правую часть выражения (21) целесообразно вводить коэффициент 0,52. Среднеквадратичное отклонение расчетных данных по формуле (21) с коэффициентом 0,52 от опытных данных составляет 23%.

В монографии [9] предлагается упрощенная формула для определения скорости радиального перемещения стенки трубы

$$v_s = D \cdot r_0^3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{8 \cdot \rho_T \cdot r_1 \cdot s_T} \left[\frac{1}{r_0^4} - \frac{1}{(r_0 + \Delta)^4} \right]}, \quad (22)$$

где r_0 — начальный радиус заряда; r_1 — внутренний радиус трубы; Δ — приращение радиуса цилиндрической полости, в которой происходит расширение ПД. Значения $v_s/v_{\text{экс}}$ колеблются от 0,95 до 2,73 при среднем значении 1,43, вследствие чего в правую часть выражения (22) целесообразно вводить коэффициент 0,70. Среднеквадратичное отклонение расчетных данных по (22) с коэффициентом 0,70 от опытных данных составляет 28%.

1. На основании экспериментальных данных предложены формулы для определения радиальной скорости стенки трубы v под действием продуктов детонации внутреннего заряда ВВ в зависимости от скорости детонации, относительного веса заряда, материала трубы, отношения ее диаметра к толщине стенки и приращения диаметра в процессе взрывной раздачи. Среднеквадратичное отклонение результатов, вычисленных по предлагаемым формулам от опытных данных, составляет около 10%.

2. Наблюдается зависимость v от отношения диаметра трубы d_T к толщине ее стенки s_T . Значения v падают при $\frac{d_T}{s_T} < 20$ (при прочих равных условиях). Рост $\frac{d_T}{s_T} > 20$ не влияет на величину v .

3. Расчетная схема метания тел продуктами детонации, предложенная Р. Гарни, хорошо согласуется с экспериментальными данными настоящей работы.

4. Проведено сравнение экспериментальных данных с рядом расчетных схем других авторов.

Автор выражает благодарность А. А. Дерибасу за ценные советы при проведении работы.

Поступила в редакцию
8/II 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Бронский. Вести. Моск. ун-та, 1956, 1.
2. А. А. Ильюшин, П. М. Огибалов. Упруго-пластические деформации полых цилиндров. М., Изд-во Моск. ун-та, 1960.
3. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
4. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас, С. А. Кутюлин. НТПГВ, 1965, 2.
5. Ю. В. Гаек, Н. Е. Никитченко и др. ФГВ, 1967, 3, 3.

6. Р. П. Дидык, С. С. Красновский, А. Г. Тесленко. ФГВ, 1968, 4, 2.
7. А. А. Дерибас, Е. Е. Кузьмин. Движение металлической трубки под действием продуктов взрыва. В сб. «Динамика сплошной среды». Вып. 8. Новосибирск, 1971.
8. Н. С. Санасарян. ФГВ, 1971, 7, 4.
9. В. Г. Степанов. Основы технологии развальцовки труб в судовых теплообменных аппаратах. Ленинград, «Судостроение», 1972.
10. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
11. R. W. Gurney. The initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Grenades. V. R. L. Report 405, 1943.
12. А. Н. Дремин, К. К. Шведов и др. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1971, 1.
13. Г. Е. Кузьмин, В. И. Мали, В. В. Пай. ФГВ, 1973, 9, 4.
14. A. Aji, H. Hurwitj, Sternberg. Phys. Fluids, 1967, 4, 2.
15. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов и др. ФГВ, 1967, 3, 2.

УДК 534.222.3

О КИНЕМАТИКЕ СЖАТИЯ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Г. Е. Кузьмин

(Новосибирск)

Взрывная обработка порошкообразных материалов в последние годы привлекает большое внимание. Она используется для получения монолитных готовых изделий из порошкообразных заготовок и для синтеза новых материалов с нужными свойствами. В связи с этим представляют большой интерес различные попытки построения уравнений состояния (или, точнее, определяющих уравнений) для порошкообразных материалов. С помощью этих уравнений можно будет, в частности, рассчитывать процесс взрывной обработки и предсказывать поведение таких материалов в различных условиях нагружения. Для решения сложной задачи построения определяющих уравнений желательно широкое привлечение экспериментальных результатов. В частности, много полезной информации можно получить, если знать распределение перемещений и скоростей в различных экспериментах с исследуемыми веществами.

В работе [1] был описан упрощенный метод определения параметров течения за коническими ударными волнами в цилиндрических образцах из порошкообразных материалов. По этому методу для определения кинематических параметров применялась математическая обработка рентгеновских снимков исследуемых процессов. Расчеты, выполненные этим методом, достаточно хорошо описывали рассмотренную конфигурацию течения. Этот метод удобен и для приближенной оценки параметров течения в тех случаях, когда образующая ударной волны уже не является прямой линией, хотя при этом неизбежны потери точности.

Ниже описывается универсальный способ определения параметров течения при взрывном обжатии порошков, точность которого мало зависит от геометрии течения. Большое преимущество нового метода состоит в том, что он основан на классическом методе наименьших квадратов и не требует никаких дополнительных априорных предположений о характере течения, но он является более трудоемким, чем описанный в [1], и поэтому для эффективного применения необходимы ЭВМ. Этот метод хорошо применим как для цилиндрического, так и для плоского