

На рис. 1 даны результаты исследований непосредственно самого канала разряда. В этом случае кривые  $p(t)$  практически совпадают, однако в поведении скоростей заметно существенное различие. На рис. 2 показаны характеристики в непосредственной близости от канала разряда  $r/a_0=1$ . Расхождение в давлениях по-прежнему незначительные, а в гидродинамических скоростях они достигают 50%. Этот эффект с увеличением расстояния сглаживается. Примером этого могут служить данные рис. 3 для  $r/a_0=15$ . Аналогичная ситуация сохраняется во всем исследованном интервале  $M=0,2 \div 1$  и  $r/a_0=1 \div 20$ .

Итак, приближение Кирквуда — Бете при расчете профилей давлений и давлений в канале разряда дает погрешность, не превышающую 10%. При расчете гидродинамических скоростей стенки канала разряда погрешность может достигать 25%. Приближение Кирквуда — Бете дает неудовлетворительные результаты при расчете гидродинамических скоростей вблизи канала разряда.

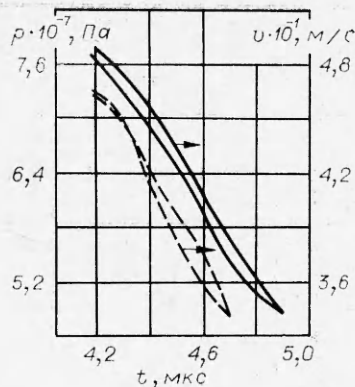


Рис. 3.

Поступила в редакцию  
24/VI 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев, Наукова думка, 1977.
2. К. А. Наугольных, Н. А. Рой. Электрические разряды в воде. М., Наука, 1971.
3. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
4. В. К. Кедринский. ФГВ, 1972, 8, 1.
5. А. И. Жуков.— Тр. Мат. ин-та им. В. А. Стеклова, вып. 58, 1960.
6. А. В. Иванов.— Тр. Николаев. кораблестроит. ин-та, вып. 114, 1976.

### РЕАКЦИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ НА ВНУТРЕННЕЕ ВЗРЫВНОЕ ЛОКАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ (СООБЩЕНИЕ II)

В. А. Могилев, А. Г. Иванов, Ю. А. Фатеев  
(Москва)

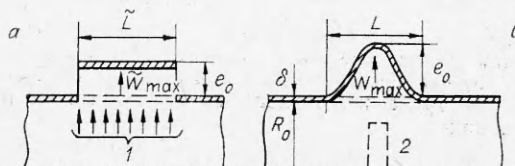
В [1] экспериментально выявлен ряд особенностей в деформировании тонкостенных стальных труб при внутреннем взрывном локальном нагружении и оценена масса продуктов взрыва (ПВ), воздействующих на их стенку. Основываясь на этих данных, найдем условие, при котором многократный подрыв цилиндрического заряда ВВ малой высоты (заряд в виде диска) в стальной трубе не вызывает остаточной деформации стенки последней, полагая, что разрушение трубы данного габарита происходит за пределом текучести. Для этого рассмотрим в обозначениях работы [1] одномерное деформирование стенки трубы по схеме рис. 1, а (для сравнения на рис. 1, б показан характерный профиль деформации, наблюдаемый в опытах), в которой приняты следующие допущения:

1) происходит мгновенное осевое инициирование заряда ВВ, обеспечивающее строго радиальное движение детонационной волны, так что масса  $m_R$  оценивается формулами (1), (2) из [1];

2) при подрыве заряда стенке мгновенно сообщается кинетическая энергия, которая равномерно распределена по массе кольца, участвующего в отборе энергии

Рис. 1. Деформация труб при локальном нагружении.

(а) — типичный профиль деформации стенки, регистрируемый в опытах;  $\bar{L} \sim (R_0 \delta)^{1/2}$ , 1 — нагрузка; б) упрощенная схема, 2 — заряд.



Номер опыта	Труба				Заряд			e, %	λ
	тип	R <sub>0</sub> , мм	$\frac{\delta}{R}$ , %	материал	r, мм	h, мм	m, г		
1	1	60	10,5	Ст. 20	45	3	32,4	0	0,4
2					45	5	54,0	0	1,0
3					45	10	108,0	6	4,9
4	2	75	2,8	Ст. 20	50	1	13,4	0	0,5
5					50	2	26,8	0,1	2,1
6					50	3	40,2	1,3	4,7
7					50	4	53,6	3,6	8,3
8					50	5	65,6	9,5	13,0
9					50	3	36,0	0,2	2,0
10					50	5	59,6	1,8	5,9
11					50	6	71,7	4,5	8,4
12					50	7	83,3	5,5	11,0
13					10	6	2,9	0,1	1,4
14					30	6	26,0	0,9	5,0
15					50	6	72,0	4,0	8,5
16					50	6	72,0	4,8	8,5
17					70	6	141,0	Разрушение	12,1
18	3	128	7,0	Ст. 20	120	2,6	201,0	0	0,4
19					60	10,0	192,0	0	1,75
20					120	4,6	315,0	0	0,9
21					120	6,9	471,0	0,6	1,85
22					120	7,9	544,0	1,8	2,4
23					120	10,0	770,0	2,8	4,1
24					77	22,0	700,0	6,9	10,3
25					77	20,0	635,0	5,3	8,5
26					77	15,0	470,0	2,1	5,0
27					60	25,0	470,0	5,1	9,4
28					45	45,0	470,0	10,8	16,6
29					120	20,0	1540,0	Разрушение	14,4
30	4	204	4,4	Ст. 20	155	20,0	2540,0	Разрушение	9,3
31	5	257	3,0	Ст. 35	225	4,3	1050,0	0	0,6
32					225	6,4	1570,0	0	1,2
33					225	8,0	1960,0	0,19	2,1
34					225	8,7	2130,0	0,42	2,1
35					225	10,8	2650,0	0,72	3,2
36					45	10,0	107,0	0	1,2
37					60	10,0	190,0	0	1,7
38	6	303	3,9	Ст. 3	155	35,0	4350,0	5,1	8,4
39					120	56,0	4420,0	14,0	17,0
40					200	20,0	4400,0	1,9	5,1
41	7	600	2,0	Ст. 3	550	7,5	10000	0	0,63
42					550	15,0	20000	1,2	4,5
43	8	1650	1,8	Ст. 3	1550	7,5	99000	0	0,1

взрыва. В дальнейшем кольцо движется с начальной скоростью

$$W_{\max} \sim m_R \sim \rho D m_R / M.$$

Здесь  $M = 2\pi \rho_T (R_0 \delta)^{3/2}$  — масса кольца трубы шириной  $(R_0 \delta)^{1/2}$ ;  $D$  — скорость детонации заряда; знаком  $\sim$  отмечены параметры движения стенки на схеме рис. 1, а;

3) отсутствуют затраты энергии на осевую деформацию трубы;

4) труба изготовлена из мягкой стали,  $\sigma$  —  $e$ -диаграмма которой записывается в виде

$$\sigma = Ee \text{ при } e \leq \sigma_s/E,$$

$$\sigma = \sigma_s \text{ при } e \geq \sigma_s/E,$$

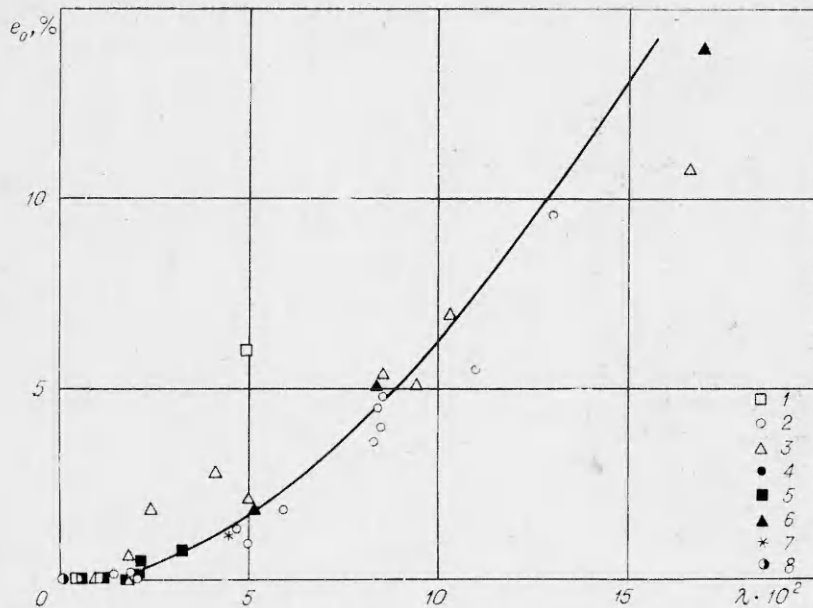


Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $e_0(\lambda)$  по результатам опытов таблицы (номер точки соответствует типу трубы).

причем  $\sigma$  не зависит от скорости деформирования, когда  $\dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ с}^{-1}$  [2] ( $\sigma$  — окружное напряжение в стенке трубы,  $\sigma_s$  — предел текучести).

При указанных условиях запишем уравнение движения кольца трубы (см. рис. 1, а)

$$-\rho_T R \cdot d\bar{W}/dt = \sigma(\bar{\epsilon}).$$

Для малых деформаций, когда  $(R - R_0)/R_0 \ll 1$ , его решение, связывающее максимальную начальную скорость движения стенки трубы и ее остаточную деформацию, имеет вид

$$\bar{W}_{\max} = k_1 W_{\max} = \left( \frac{\sigma_s^2}{\rho_T E} + \frac{2\sigma_s \tilde{e}_0}{\rho_T} \right)^{1/2},$$

откуда

$$e_0 = \frac{\tilde{e}_0}{k_2} = \frac{k_1^2 \rho_T}{k_2^2 2\sigma_s} W_{\max}^2 - \frac{1}{k_2} \frac{\sigma_s}{2E}, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2$  — константы, меньшие единицы.

Запишем выражение для  $W_{\max}$  (подрыв заряда в свободном пространстве) [1]

$$W_{\max} \sim \frac{\rho D p h^2 \left(1 - \frac{1}{3} \frac{h}{r}\right)}{\rho_T (R_0 \delta)^{3/2}} \sim D \frac{m}{M} \frac{h}{r} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{h}{r}\right) = D\lambda. \quad (2)$$

Для заряда, расположенного на абсолютно жесткой подложке

$$\lambda = 2m/M \cdot h/r \cdot (1 - 2/3 \cdot h/r). \quad (3)$$

Подставляя выражение для  $W_{\max}$  в (1), получим

$$e_0 = \frac{k_1^2 \rho_T D^2}{k_2^2 2\sigma_s} \lambda^2 - \frac{1}{k_2} \frac{\sigma_s}{2E}. \quad (4)$$

Коэффициент  $k_2$  определяется из условия  $e_{\max} = e_0 + \sigma_s/E = 0$  при  $\lambda = 0$ , что дает  $k_2 = 1/2$ . Формула (4) при  $e_0 = 0$  определяет условие, когда деформация трубы не выходит за пределы текучести

$$\lambda \leq 1/k_1 \cdot \sigma_s / D \sqrt{\rho_T E}. \quad (5)$$

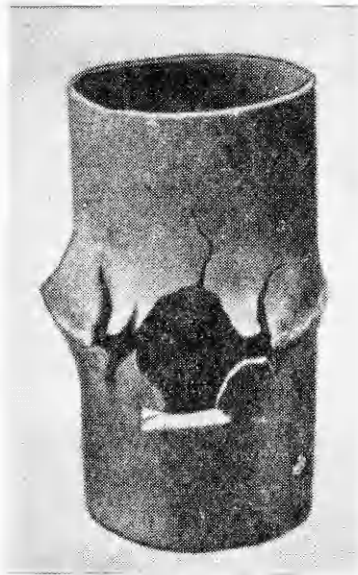


Рис. 3. Характер разрушения трубы при локальном нагружении.

Для определения коэффициента  $k_1$  проведены специальные эксперименты. Их постановка заключалась в том, что в поперечном сечении труб разных размеров подрывались заряды ВВ в виде диска, инициируемого по центру плоского основания капсулом-детонатром. Физико-механические характеристики зарядов аналогичны зарядам из [1]. В опытах регистрировался профиль остаточной деформации стенки труб. Характеристики опытов приведены в таблице. Графически экспериментальные результаты представлены на рис. 2.

Аппроксимирующая экспериментальные значения кривая выражается зависимостью

$$e_0 = 6 \cdot 10^{-3} (\rho_T D^2 / 2\sigma_s) \cdot \lambda^2 - \sigma_s / E. \quad (6)$$

Из сопоставлений уравнений (4), (6) находим  $k_1 = 5,5 \cdot 10^{-2}$  и, подставляя это значение в уравнение (5), получим граничное значение  $\lambda$ , которое совместно с уравнениями (2), (3) связывает параметры трубы с параметрами заряда ВВ и решает поставленную задачу.

Как следует из рис. 2, результаты подавляющего большинства опытов удовлетворительно аппроксимируются уравнением (6), что подтверждает обоснованность развитого выше подхода к описанию реакции трубы на подрыв в ней дискового заряда ВВ. Выпадают из общей закономерности результаты опытов, в которых  $h/r \approx 1$  либо  $h/(R-r) > 0,5$  при  $h/r \ll 1$ . В первом случае, по-видимому, становится существенным отклонение от схемы мгновенного осевого инициирования заряда, принятой при выводе формулы (5) (опыты 28, 39), а во втором, возможно, сказывается эффект эрозии материала трубы напротив цилиндрической поверхности заряда. Аналогичное явление (эрозия материала) обнаружено в [4] и объяснено развитием неустойчивости на границе ПВ — ударная волна, которая и приводит к эрозии стенки трубы.

В некоторых опытах с  $\lambda \geq 10^{-1}$  происходило разрушение труб. Характер разрушения показан на рис. 3. Трещины вдоль образующей не выходят существенно за пределы той области, где происходит основное поглощение энергии взрыва.

Таким образом, в работе получено полумпирическое соотношение, определяющее максимальную остаточную деформацию стенки трубы при подрыве в ней заряда ВВ в виде диска.

Поступила в редакцию  
29/V 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Могилев, А. Г. Иванов и др. ФГВ, 1981, 17, 2.
2. Ю. Н. Работнов. ПМТФ, 1968, 3.
3. G. R. Hoggar, R. F. Recht. Exp. Mech., 1969, 10, 441.
4. В. И. Цыпкин, В. Н. Минеев и др. ЖТФ, 1975, 45, 3, 624.

#### ПРИМЕНЕНИЕ КВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

С. И. Бодренко, Н. Н. Гердюков, Ю. А. Крысанов,

С. А. Новиков

(Москва)

Кристаллический кварц отличается от других пьезоэлектриков стабильностью коэффициента преобразования механического напряжения в электрический сигнал в широком диапазоне температур, независимостью его от скорости нарастания и величины напряжения в диапазоне давлений до 2 ГПа [1]. В [2] описана конструкция