

3. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., Наука, 1975.
4. Р. Мак-Куин, С. Марш и др.— В кн.: Высокоскоростные ударные явления. М., Мир, 1973.
5. М. Райс, Р. Мак-Куин, Дж. Уолш.— В кн.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., Мир, 1965.
6. Р. Мак-Куин, С. Марш.— В кн.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., Мир, 1965.
7. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 3.
8. M. Born, Y. Maue. Z. Phys., 1932, 75, 1.
9. Л. П. Орленко. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М., Машиностроение, 1964.
10. D. R. Cragg. J. Appl. Phys., 1963, 34, 9.
11. J. O. Erkmann, A. B. Christensen. J. Appl. Phys., 1967, 38, 13.
12. С. А. Новиков, Л. М. Синицына. ПМТФ, 1970, 6.
13. Г. П. Меньшиков, В. А. Одинцов, Л. А. Чудов. Изв. АН СССР, МТТ, 1976, 1.
14. Д. Гилман. Механика. Сб. переводов, № 2, 1970.

РЕАКЦИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ НА ВНУТРЕННЕЕ ВЗРЫВНОЕ ЛОКАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ (сообщение I)

*В. А. Могилев, А. Г. Иванов, Ю. А. Фатеев,
А. Т. Шитов, В. А. Рыжанский
(Москва)*

В последние годы проявляется интерес к исследованию поведения тонкостенных труб при взрыве в них сферических и цилиндрических зарядов ВВ [1—6]. В то же время сравнительно мало изучено (см., например, [7]) действие на оболочку трубы продуктов взрыва (ПВ) зарядов ВВ в форме цилиндров малой высоты (или плоских зарядов ВВ), практическое применение которых в ударных трубах взрывного действия описано в [8—10]. В [8, 10] приведены результаты опытов, в которых плоские заряды детонировали в поперечном сечении стальных труб, а в [8, 9] — на дне колодцев, облицованных стальными трубами. При этом характер деформирования либо разрушения конструкций не исследовался. Настоящая работа посвящена изучению обусловленных локальностью нагружения особенностей деформирования тонкостенных труб при взрыве в них плоских зарядов ВВ.

Проведенные ранее эксперименты показали, что при взрыве в трубе соосного с ней заряда ВВ в форме диска, инициируемого в центре, ее оболочка испытывает локальную деформацию радиального расширения [7]. Представляется, что это обусловлено своеобразием разлета ПВ, образующихся при детонации плоского заряда. В этом случае основная масса ПВ летит практически вдоль нормали к плоским поверхностям диска, слабо воздействуя на оболочку трубы, а нагружает ее в основном та малая часть ПВ, которая разлетается в радиальном направлении с цилиндрического края заряда.

Используя схему, предложенную в [11], оценим массу радиально летящих ПВ (m_R). При этом рассмотрим два случая:

а) заряд ВВ детонирует в свободном пространстве (рис. 1, а). Масса m_R содержится в кольце треугольного сечения (рис. 1, а, треугольник ОАВ), который формируется при взаимодействии волн разрежения, распространяющихся от свободных поверхностей диска

$$m_R = \pi \rho r h^2 (1 - 1/3 \cdot h/r), \quad (1)$$

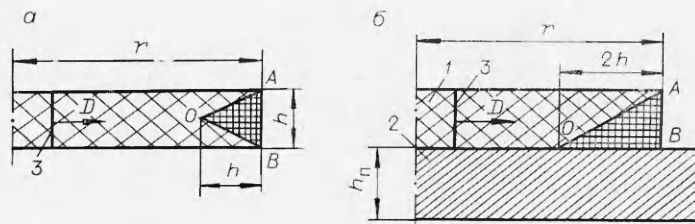


Рис. 1. Схемы детонации заряда ВВ в свободном пространстве (а) и на подложке (б).

1 — заряд ВВ; 2 — подложка; 3 — фронт детонационной волны.

где r , h — радиус и толщина диска соответственно; ρ — плотность ВВ; б) заряд ВВ детонирует на абсолютно жесткой подложке (рис. 1, б)

$$m_R = 2\pi\rho rh^2(1 - 2/3 \cdot h/r). \quad (2)$$

Рассмотрим результаты исследований деформирования труб с внутренним радиусом $R_0 = 75$ мм и относительной толщиной стенки $\delta/R_0 = 2,8\%$ в эксперименте, проведенном по схеме, показанной на рис. 2. Варьировались размеры и масса зарядов ВВ (m) и регистрировались зависимости окружной и осевой деформаций от времени с помощью проволочных тензодатчиков по методике, изложенной в [12]. Тензометрирование проводилось вблизи поперечного сечения трубы, проходящего через центр заряда ВВ, где деформации наибольшие. Погрешность измерений не превышала 10%. Размеры зарядов и результаты опытов приведены в табл. 1, где $e_{\max}$, τ — максимальная окружная деформация и время ее достижения, соответственно; e_{ax} — максимальная (по модулю) осевая деформация растяжения или сжатия (со знаком + или — соответственно); $W_{\max}$, $\dot{e}_{\max}$ — максимальные скорости радиального перемещения и окружной деформации оболочки трубы. Зависимость $W_{\max}(m_R)$ приведена на рис. 3.

Эксперимент показал следующее.

1. Результаты опытов с детонацией зарядов ВВ как в свободном пространстве, так и на жесткой подложке соответствуют друг другу, если значения m_R вычислять по формулам (1) и (2). Это дополнительно подтверждает справедливость последних.

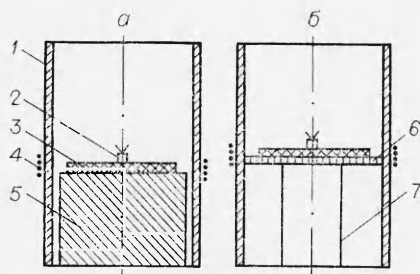


Рис. 2. Схемы постановки опытов с имитацией абсолютно жесткой подложки (а) и с подложкой из фанеры (б).

1 — труба; 2 — капсюль-детонатор; 3 — заряд ВВ; 4 — тензодатчики; 5 — стальной цилиндр (имитатор абсолютно жесткой подложки); 6 — фанерная подложка; 7 — подставка в виде бумажной трубы.

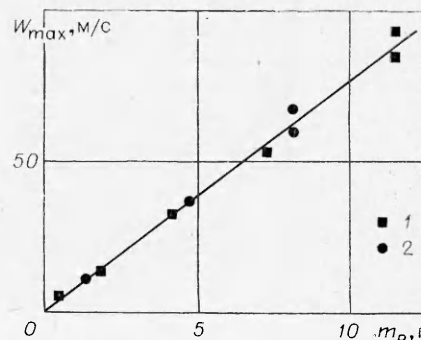


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости радиального перемещения оболочки трубы от интенсивности взрывного нагружения.

1, 2 — опыты по схеме рис. 2, а и б соответственно.

Т а б л и ц а 1

Схема опыта	m , г	r , мм	h , мм	m_R , г	$W_{\max}$, м/с	$e_{\max}'$, с ⁻¹	$e_{\max}$, %	τ , мкс	e_{ax} , %	e_0 , %
Рис. 2, а	13,4	50	1	0,47	5,2	70	0,086	25	0	0
	26,8	50	2	1,86	14,0	186	0,250	27	+0,025 -0,043	0,1
	40,2	50	3	4,13	33,0	440	1,330	60	+0,173 -0,360	1,3
	53,6	50	4	7,23	53,0	710	4,460	125	+0,178 -0,397	3,6
	65,6	50	5	11,14	93,0	1210	10,0	160	—	7,8
	65,6	50	5	11,14	85,0	1100	8,5	150	—	9,5
Рис. 2, б	2,9	10	6	1,37	11,0	141	0,27	30	+0,046 -0,040	—
	26	30	6	4,81	37,0	480	1,08	50	+0,430 -0,440	—
	72	50	6	8,25	67,0	873	4,17	75	+0,26	2,7
	72	50	6	8,25	60,0	776	3,95	80	+0,35	2,9
	141	70	6	11,69	—	—	Труба разрушена	—	—	16,9
	141	70	6	11,69	—	—	То же	—	—	13,6

П р и м е ч а н и е. Признаком разрушения трубы считалось появление в ней сквозной трещины, что устанавливалось при внешнем осмотре после опыта.

2. Осевые деформации оболочки трубы примерно на порядок меньше окружных.

3. Максимальная скорость радиального перемещения оболочки пропорциональна массе ПВ, разлетающихся в радиальном направлении, т. е.

$$W_{\max} \propto m_R. \quad (3)$$

Столь не очевидный результат, как пропорциональность $W_{\max}$ величине m_R независимо от значения h , изменявшегося от 1 до 6 мм (т. е. независимо от ширины зоны воздействия ПВ на трубу), можно объяснить, если распределения радиальной скорости $W(L)$ вдоль образующей трубы подобны для различных m_R , а протяженность вдоль образующей трубы зоны, вовлекаемой в движение, постоянна для данной трубы и не зависит от h (или, иными словами, постоянна масса стенки трубы, участвующая в отборе энергии взрыва).

Серия опытов (табл. 2), проведенных по схеме рис. 2, б, подтвердила правильность высказанных предположений. На рис. 4 приведена полученная в опытах зависимость

$$e_0(x/\sqrt{R_0\delta}),$$

где $\sqrt{R_0\delta}$ — параметр, учитывающий влияние кривизны и толщины оболочки на процесс ее деформирования. Судя по этой зависимости, размер деформированного участка трубы L вдоль образующей (участвовавшего в отборе энергии взрыва) слабо зависит от интенсивности нагружения и имеет величину $\approx 5\sqrt{R_0\delta}$. Тогда масса этого участка

$$M \approx 10\pi\rho_T(R_0\delta)^{3/2}. \quad (4)$$

Факт постоянства ширины деформированного участка трубы независимо от интенсивного нагружения,

Т а б л и ц а 2

Материал трубы	Номер опыта	δ/R_0 , %	m , г	R_0 , мм	h , мм	r , мм
Ст. 20	1	2,8	59,6	75	5	50
	2	7,0	470	128	25	60
	3	7,0	470	128	45	45
Ст. 3	4	4,0	4350	303	35	155

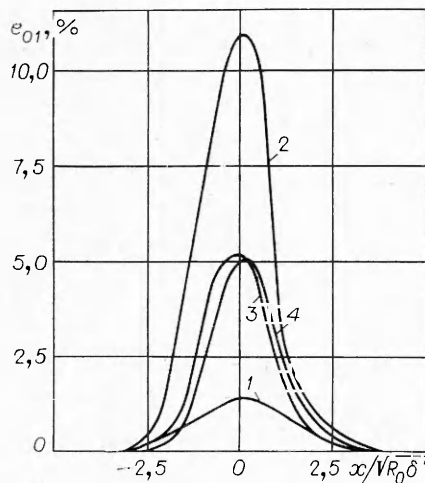


Рис. 4. Распределение остаточной окружной деформации трубы (вдоль образующей) после взрыва в ней плоского заряда ВВ (начало отсчета координаты x совпадает с плоскостью заряда ВВ). Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

ния оболочки трубы. Несомненно, при определенном соотношении h , R_0 и δ наступит такой момент, когда и размер деформированного участка трубы вдоль образующей L также будет пропорционален h . С этого момента заряд перестает быть плоским.

Для исследования зависимости $L(h)$ проведена серия опытов по схеме рис. 2, б на трубах с $R_0 = 128$ мм и $\delta/R_0 = 7\%$. Варьировалась только высота заряда ВВ. В результате эксперимента получена зависимость $L/\sqrt{R_0\delta}(h/\sqrt{R_0\delta})$, приведенная на рис. 5, из которой следует, что при

$$h/\sqrt{R_0\delta} \lesssim 1 \quad (5)$$

размер зоны деформации оболочки трубы вдоль образующей не зависит от толщины заряда и, следовательно, от размера области нагружения оболочки.

Таким образом, в описанном эксперименте заряды ВВ можно считать плоскими, а нагружение трубы — локальным, если размеры заряда ВВ и трубы удовлетворяют соотношению (5). Справедливость этого утверждения для труб с другими соотношениями R_0/δ нуждается в дополнительной проверке.

Поступила в редакцию
29 / V 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Тарасенко. ФГВ, 1974, 10, 5.
2. А. Ф. Демчук. ПМТФ, 1968, 5.
3. Н. Н. Санасарян. ФГВ, 1971, 7, 4.
4. А. Г. Иванов, Л. И. Рочкин и др. ФГВ, 1974, 10, 1.
5. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
6. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Сеницын. ПМТФ, 1968, 6.
7. L. W. Bickel, M. Z. Vigil. Shock Vibrat. Bull., 1968, 39, 5.
8. R. E. Deal, A. N. Bluckwell. Rev. Sci. Instr., 1966, 37, 5.

9. Е. Ф. Горбунов, А. Г. Иванов и др. ФГВ, 1977, 13, 5.
10. Э. Э. Лип, А. В. Сиденко, А. И. Фунтиков. ФГВ, 1979, 15, 2.
11. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1975.
12. А. Т. Шитов, В. Н. Минеев и др. ФГВ, 1976, 12, 2.

О РОЛИ «ВСПЫШКИ» И СОУДАРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ФОРМИРОВАНИИ МНОГОФРОНТОВОЙ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗАХ

В. Ю. Ульяницкий
(Новосибирск)

Многочисленные экспериментальные исследования, например [1—4], показали, что соударение поперечных волн в многофронтной структуре приводит к резкому подъему давления в точке столкновения и сильному ускорению фронта детонационной волны, что эквивалентно некоторому мощному микровзрыву. Рассматривая такой микровзрыв в качестве поддерживающего механизма многофронтной структуры, авторы [5] построили замкнутую модель ячейки, которая описывает все основные характеристики регулярной структуры. Однако хорошо известно, что при достаточной интенсивности ударной волны в зоне индукции за ее фронтом может быть возбуждена детонация в ударно-сжатом газе. Наиболее четко такой механизм проявляется в переходных процессах на стадии инициирования детонации, например, при отражении ударной волны от стенки во взрывчатой смеси [6, 7]. Другим примером может служить возбуждение пульсаций галопирующего режима [8].

На основе этих фактов можно предположить, что в принципе не исключена возможность возбуждения детонации газа в зоне индукции за ударной волной в конце ячейки многофронтной волны. Причем воздействие такой «вторичной» детонации газа в зоне индукции на окружающую структуру фронта также можно описать действием некоторого «эквивалентного» микровзрыва. Именно такой процесс «вторичной» детонации в дальнейшем будем называть «вспышкой».

Идея о возбуждении многофронтной структуры в результате адиабатической вспышки во фронте детонационной волны уже высказывалась ранее, например, для объяснения пульсаций фронта в жидких ВВ [9]. Цель настоящей работы — исследование соотношения ролей «вспышки» и соударения поперечных волн в формировании многофронтной структуры.

Рассмотрим гипотетическую регулярную структуру, в которой единственным поддерживающим механизмом будет «вспышка», а влияние поперечных волн считается несущественным. Следует ожидать, что такая структура и регулярная, поддерживаемая только соударением поперечных волн [5], будут предельными для реальной, как правило, нерегулярной структуры. Математический аппарат модели [5] без особого труда можно модернизировать для построения модели регулярной ячейки, генерируемой «вспышкой». В дальнейшем для краткости будем называть эти модели С и В соответственно.

Схема ячейки приведена на рис. 1. В результате «эквивалентного», различного для обеих моделей микровзрыва радиуса r_0 в начале ячейки в направлении движения всего фронта в целом распространяется затухающая детонационная волна. Как и в [5], считается, что реакция за фронтом такой волны на начальном участке движения ($r_0 \leq r \leq r_{*0}$) мгновенна, а после точки разделения $r = r_{*0}$ тепловыделение отсутствует