

РЕАКЦИЯ СТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРА НА ВНУТРЕННЕЕ ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ ВОДОЙ

В. А. Рыжанский, А. Г. Иванов, Н. П. Ковалев, Г. П. Симонов,
Ю. Д. Чернышев, В. Н. Минеев*, В. В. Жуков**

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

* Объединенный институт высоких температур РАН, 127412 Москва

** Опытное конструкторское бюро машиностроения, 603603 Нижний Новгород

Приведены результаты экспериментального исследования реакции стальных цилиндрических контейнеров на внутреннее взрывное нагружение в зависимости от степени наполнения водой. Эксперимент сопровождался численными расчетами системы «взрывчатое вещество — заполняющая среда — контейнер». Обнаружено существенное влияние заполняющей среды на форму и деформацию контейнера. При этом основное значение имеют сжимаемость заполняющей среды и отношение ее массы к массе деформируемых стенок контейнера.

В технике локализации взрывов широко используются взрывозащитные контейнеры с цилиндрической несущей оболочкой. При изучении взрывостойкости оболочек, труб и сосудов, заполненных воздухом или водой (см., например, [1–6]), было, в частности, установлено сильное влияние заполняющей среды на реакцию контейнера [1, 4]. Однако без углубленного изучения взрывных процессов причины этого влияния оставались неясными. Настоящая работа посвящена данному аспекту проблемы локализации взрыва.

Работа выполнена в рамках обширной программы 1976–1987 гг. по изучению взрывостойкости корпуса быстрого реактора типа БН-600 [6]. Этот корпус частично заполнен жидким натрием, близким по ряду физико-механических свойств к воде. В случае аварийного взрывоподобного энерговыделения в активной зоне импульсному нагружению подверглось бы не только внутриреакторное оборудование, но и корпус. Поскольку при аварии он служит барьером на пути ее развития, взрывостойкость является важной характеристикой его прочности [7].

Постановка эксперимента. Схемы проведения опытов приведены на рис. 1. Объекты исследования — цилиндрические контейнеры двух типоразмеров: большие (№ 1 и 2) и малые (№ 3 и 4), выполненные из стали 12Х18Н10Т; торцевые элементы контейне-

ров — дно и крышка — были плоскими. Размеры оболочек: наружный радиус $R_0 = 1,22$ и $0,1525$ м, толщина $h_0 = 0,03$ и $0,004$ м, длина $L \approx 5,5$ и $\approx 0,62$ м. Учитывая близость значений h_0/R_0 ($\approx 2,5$ и $2,6\%$) и L/R_0 ($\approx 4,5$ и $4,1$), оболочки разномасштабных контейнеров можно считать геометрически подобными. Поэтому для сравнительного анализа результатов эксперимента различие размеров оболочек представляется несущественным.

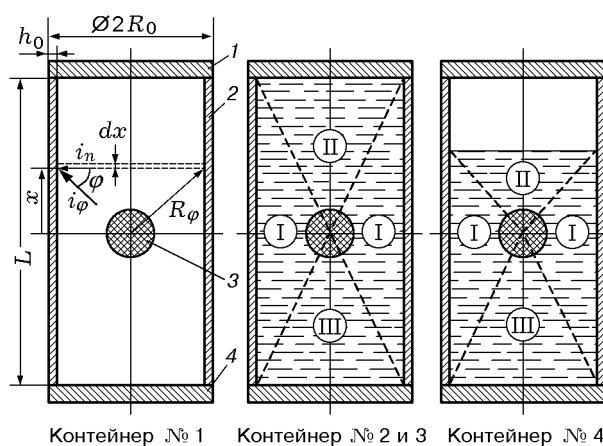


Рис. 1. Схемы постановки опытов с контейнерами: 1 — крышка, 2 — оболочка, 3 — заряд ВВ, 4 — дно; римскими цифрами помечены секторы нагружения контейнеров

Таблица 1

Исходные данные опытов и кинематические параметры оболочек в среднем поперечном сечении

Номер контейнера	R_0 , м	h_0/R_0 , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	m , кг	ξ , %	Деформация	v_0 , м/с	ε_{\max} , %	t_{\max} , мкс	ε_{Π} , %
1	1,22	2,5	314	112,51	1,29	Окружная	$\approx 91^*$	$\approx 8,7^*$	$\approx 1900^*$	7,9
						Меридиональная	—	-0,3	800	0
2	1,22	2,5	314	77,80	0,89	Окружная	182	39,1	7300	37,5
						Меридиональная	—	—	—	-3,0
3	0,1525	2,6	315	0,071	0,39	Окружная	106	17,1	650	16,3
4	0,1525	2,6	315	0,071	0,39	— // —	107	18,5	675	16,9

Примечание. *Расчетная оценка в плоскости центра взрыва, смещенной от датчика на ≈ 130 мм (см. сноску 3).

Исследовались следующие случаи заполнения контейнеров:

- воздухом (контейнер № 1),
- водой (контейнеры № 2 и 3),
- водой на 3/4 объема (контейнер № 4)¹.

В центре контейнера, установленного вертикально на деревянном щите на бетонированной площадке (№ 1 и 2) или на деревянном столе (№ 3 и 4), подрывали шаровой заряд из конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Детонацию инициировали в центре заряда. Все контейнеры подвергались однократному нагружению взрывом заряда из сплава тротила с гексогеном (ТГ): контейнеры № 1 и 2 — из ТГ 40/60 (цифры в маркировке указывают массовое содержание компонентов, плотность ВВ $\rho_{ВВ} = 1720$ кг/м³, теплота взрыва $Q = 4,93$ МДж/кг), № 3 и 4 — из ТГ 50/50 ($\rho_{ВВ} = 1650$ кг/м³, $Q = 4,78$ МДж/кг). Поскольку для больших и малых контейнеров использовались ВВ разной мощности, для удобства сравнения результатов в табл. 1 указаны тротиловые эквиваленты масс зарядов, определенные по формулам, полученным на основе [8, с. 493, 575, 576] при условии энергетического подобия сравниваемых ВВ и равенства ударных импульсов давления: при взрыве в воздухе (массой воздуха пренебрегаем)

$$m = m_x \sqrt{Q_x/Q}, \quad (1)$$

при взрыве в воде (в акустическом приближении)

$$m = m_x Q_x/Q, \quad (2)$$

¹Материалы опытов с контейнерами № 1 и 4 публикуются впервые, а с № 2 и 3 приведены в [6].

где m , Q (4,232 МДж/кг) — масса и теплота взрыва эквивалентного заряда тротила ($\rho_{ВВ} = 1620$ кг/м³); m_x , Q_x — эти же параметры иного ВВ. Для сравнительного анализа эффективности взрыва удобно использовать такой параметр, как относительная масса ВВ:

$$\xi = m/M, \quad (3)$$

где $M \approx 8\pi\rho R_0^2 h_0$ — масса оболочки длиной $4R_0$, $\rho = 7800$ кг/м³ — плотность стали.

Для нагружения контейнеров № 3 и 4, различающихся степенью заполнения водой, использовались одинаковые заряды ВВ, причем контейнер № 3 считался контрольным.

Опыты проводили при нормальных условиях. Методами скоростной фотохронографии [9] или тензометрии регистрировали расширение оболочек $r(t) = R(t) - R_0$ в разных поперечных сечениях (t — время от начала процесса, R — текущее значение наружного радиуса) или относительную деформацию $\varepsilon(t) = r(t)/R_0$; относительная погрешность данных не более 5 и 10 % соответственно. При тензометрировании применяли проволочные бифилярные тензодатчики, кольцевые (см. [10]) и зигзаг-решетки (с базой $50 \div 100$ мм)². Кроме того, проводилась скоростная киносъемка контейнеров. После опытов определяли пластическую (остаточную) деформацию оболочек (относительная погрешность не более 0,2 %) по разметке, выполненной заранее без повреждения их поверхности.

²С помощью кольцевого тензодатчика и зигзаг-решетки регистрировали соответственно окружную и меридиональную деформации. Бифилярная конструкция использовалась для компенсации электромагнитных наводок.

Результаты опытов. Исходные данные и некоторые результаты измерений приведены в табл. 1–3, где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести стали, v_0 — максимальная начальная скорость расширения, ε_{\max} и t_{\max} — максимальная деформация и время ее достижения, $\varepsilon_{\text{п}}$ — пластическая окружная деформация. На рис. 2 и 3 приведены фотографии контейнеров после нагружения, схемы их тензометрирования и эпюры окружной пластической деформации вдоль образующей оболочки. На рис. 4 даны типичные осциллограммы тензометрирования (на примере контейнера № 1), на рис. 5 — зависимости $\varepsilon(t)$ в различных поперечных сечениях контейнера № 4 и в среднем поперечном сечении контрольного контейнера № 3 (пунктирная линия).

Рассмотрим полученные результаты.

1. У контейнера № 1 (с воздухом) в результате взрыва вначале раздулась оболочка в средней зоне, затем выпучились дно и крышка. Последняя оторвалась от оболочки и отлетела на ≈ 360 м в сторону. По данным кино съемки, она взлетела с вертикальной составляющей скорости ≈ 150 м/с, траектория полета была крутой и, по-видимому, высокой (по баллистическим оценкам, до ≈ 800 м). При падении крышки образовалась выбоина в грунте (супесь) глубиной до ≈ 1 м.

Видно (см. рис. 2, 4, табл. 1, 2), что оболочка расширилась в основном в сравнительно узкой ($\approx 2R_0$) средней зоне, ближайшей к центру взрыва³. При расширении сильно до-

минировала окружная деформация растяжения (до 8% в средней части оболочки), а меридиональная деформация была упругой (см. рис. 4, датчик 4): амплитуда до $\approx 0,3\%$; пластическая меридиональная деформация не обнаружена. По мере удаления от средней зоны окружная деформация резко убывает до нуля у краев оболочки, а на краях принимает отрицательные значения. Это локальное сужение краев оболочки обусловлено их стягиванием к оси при выпучивании торцов. Таким образом, в целом напряженно-деформированное состояние оболочки, исключая края, было близким к плоской (окружной) деформации.

2. Контейнеры № 2 и 3 (заполненные водой) приняли после взрыва бочкообразную форму (см. рис. 2, 3): их оболочки выпучились почти по всей длине (исключая края) с максимальной деформацией в среднем поперечном сечении, ближайшем к центру взрыва. Как и в опыте с воздухом, напряженно-деформированное состояние оболочек близко к плоской деформации с доминантой окружного растяжения (меридиональная деформация сжимающая, в среднем поперечном сечении ее абсолютное значение на порядок меньше окружной). Но в отличие от опыта с воздухом оболочка с водой деформируется в пульсирующем режиме (см. рис. 5, пунктирная линия). На удалении от среднего поперечного сечения пластическая окружная деформация плавно снижается до нуля у краев (см. рис. 2, 3). На краях она принимает отрицательные значения, обусловленные выпучиванием дна и крышки. Что касается пластической меридиональной деформации, то по мере удаления от среднего поперечного сечения она быстро исчезает [6].

Таблица 2

Параметры деформации в различных поперечных сечениях контейнера № 1 (см. рис. 2)

x , м	Номер датчика	Направление регистрации	v_0 , м/с	ε_{\max} , %	t_{\max} , мкс	$\varepsilon_{\text{п}}$, %
–1,2	1	Окружное	33	1,8	1200	1,5
–0,8	2	— // —	44	3,3	1600	2,9
–0,4	3	— // —	85	7,0	1800	6,6
0	4	Меридиональное	—	0,3	800	0
	5,6	Окружное	91	8,4	1900	7,5
0,8	7	— // —	33	1,8	1200	1,5
1,2	8	— // —	42	1,3	900	1,0

³Из-за неточной установки заряда ВВ центр взрыва оказался ниже среднего поперечного сечения на ≈ 130 мм. Соответственно смещен и максимум деформации (см. рис. 2).

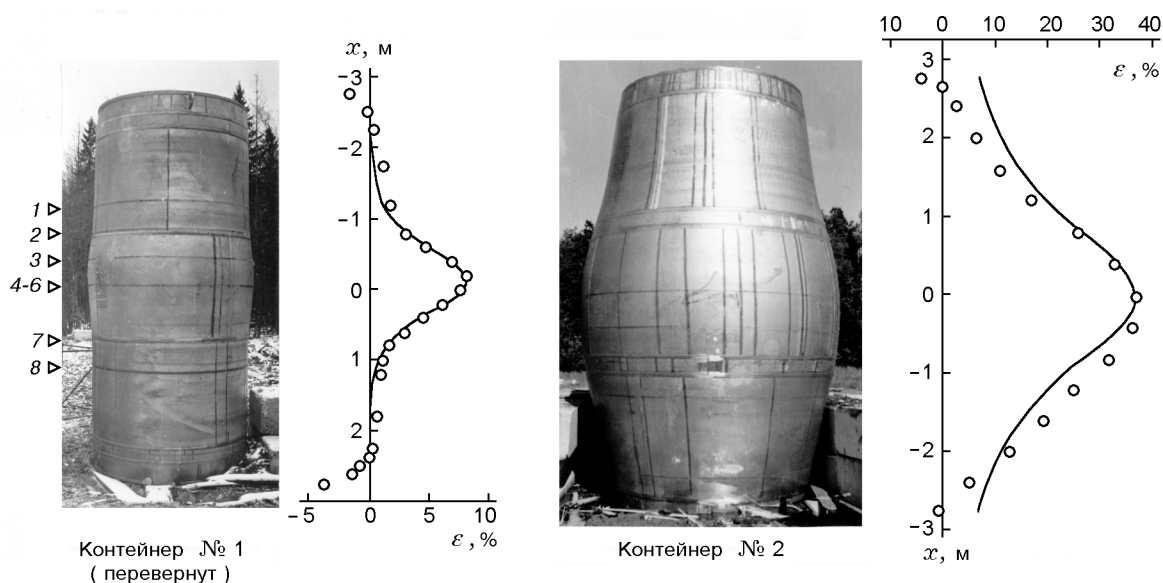


Рис. 2. Внешний вид контейнеров № 1 и 2 после нагружения:

треугольниками показано расположение тензодатчиков (их координаты указаны в табл. 2 и 3); точки — эксперимент, линии — расчет

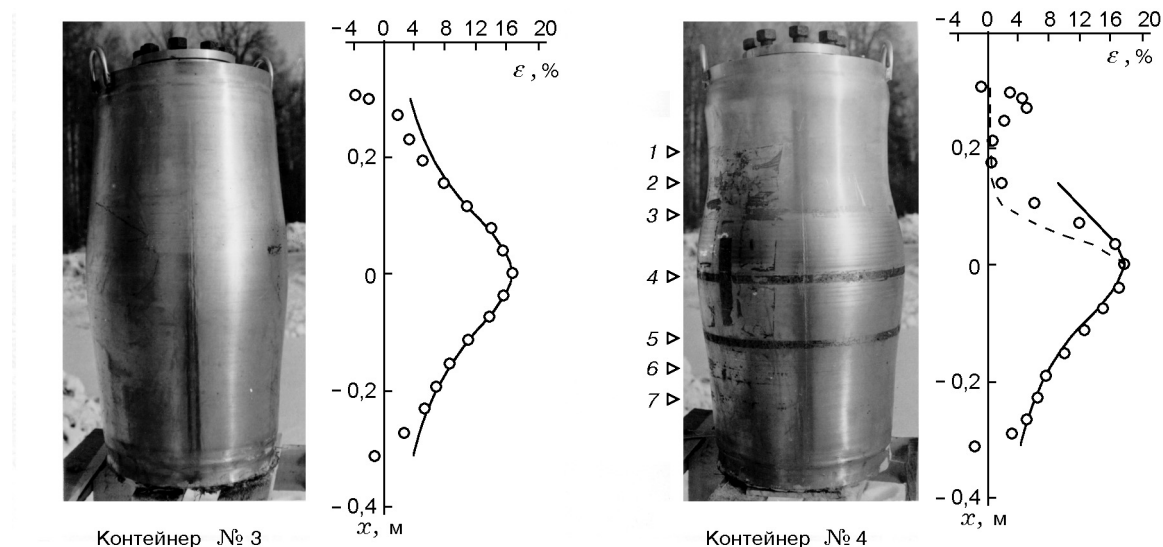


Рис. 3. Внешний вид контейнеров № 3 и 4 после нагружения:

треугольниками показано расположение тензодатчиков (их координаты указаны в табл. 3); точки — эксперимент, сплошные линии — расчет, штриховая линия — часть расчетной зависимости $\varepsilon_{II}(x)$ в случае заполнения воздухом

Несмотря на существенно меньшее значение ξ , чем в опыте с воздухом, деформация оболочек с водой значительно больше и обширнее (на всей длине). Отметим, что окружная деформация оболочки контейнера № 2 асимметрична относительно среднего сечения: выше него деформация заметно меньше, чем внизу. Это обусловлено большей податливостью крышки, чем дна, деформация которого затруднена со-

противлением малоподатливого основания. Поэтому ударная волна (УВ) отражается от дна с меньшими потерями и генерирует здесь более эффективные нагрузки на оболочку, чем УВ, отраженная от крышки. У контейнера № 3, установленного на существенно более податливом основании, такая асимметрия деформации оболочки практически отсутствует. Крышка контейнера № 2 была сорвана взрывом и от-

Таблица 3

Результаты измерений пластических деформаций контейнеров

Контейнер	№ 1	№ 2	Контейнер	№ 3	№ 4	Контейнер	№ 3	№ 4
x , м	$\varepsilon_{п}$, %		x , м	$\varepsilon_{п}$, %		x , м	$\varepsilon_{п}$, %	
-2,75	-1,9	-0,5	-0,310	-1,2	-2,5	0,155	7,5	—
-2,5	-0,5	—	-0,287	—	2,1	0,180	—	0
-2,4	—	5,8	-0,271	2,5	—	0,194	5,0	—
-2,25	0,2	—	-0,265	—	3,9	0,200*	—	—
-2	—	13,3	-0,233	4,8	—	0,216	—	0,4
-1,75	0,9	—	-0,227	—	5,4	0,223	3,1	—
-1,6	—	19,6	-0,200*	—	—	0,252	—	1,8
-1,2*	1,5	25,8	-0,194	6,3	—	0,271	1,9	—
-0,8*	2,9	32,4	-0,189	—	6,7	0,274	—	4,8
-0,6	4,5	—	-0,155	8,1	—	0,288	—	4,2
-0,4*	6,6	36,7	-0,150*	—	8,9	0,300	—	2,7
-0,2	7,9	—	-0,116	10,6	—	0,301	-1,9	—
0*	7,5	37,5	-0,113	—	11,8	0,310	-3,7	-1,2
0,2	5,9	—	-0,100*	—	—	Прогиб крышки, мм	12,5	7,5
0,4	4,4	33,3	-0,078	13,4	—			
0,6	2,9	—	-0,076	—	14,4			
0,8*	1,5	26,2	-0,039	15,0	—			
1	1,1	—	-0,038	—	16,2			
1,2*	1	17,4	0*	16,3	16,9			
1,6	—	11,3	0,036	—	15,7			
1,8	0,6	—	0,039	15,0	—			
2	—	6,8	0,072	—	11,5			
2,25	0,3	—	0,078	13,8	—			
2,4	0	2,7	0,100*	—	—			
2,5	-0,7	—	0,108	—	5,5			
2,6	-1,4	—	0,116	10,7	—			
2,65	—	0	0,144	—	1,4			
2,75	-3,6	-4	0,150*	—	—			

Примечание. * Координата тензодатчика.

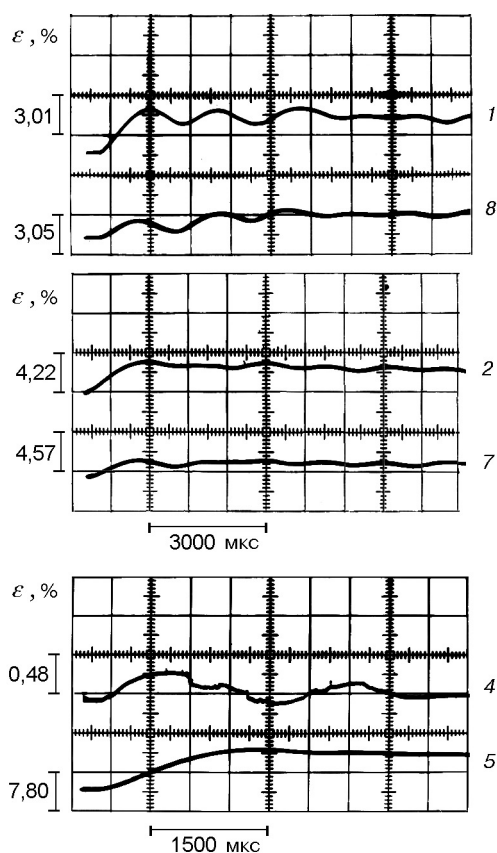


Рис. 4. Типичные осциллограммы тензометрирования контейнера № 1:

номера зависимостей $\varepsilon(t)$ (справа) соответствуют номерам датчиков на рис. 2 и в табл. 2

брошена на ≈ 20 м. Но в отличие от опыта с воздухом траектория полета крышки, по-видимому, была невысокой, так как при ее падении в грунте образовалась неглубокая (до $\approx 0,2$ м) выбоина.

Контейнер № 3, нагруженный при меньшем значении ξ , чем № 2, не разрушился.

3. Контейнер № 4 (заполненный водой на $3/4$ объема) не разрушился, но в отличие от контрольного (№ 3) принял несколько иную форму, напоминающую кувшин (см. рис. 3). Как и прежде, максимальная деформация оболочки имела место в среднем поперечном сечении (см. рис. 3, 4), но в зонах ниже и выше него форма ее резко различается. В нижней зоне, заполненной водой, деформация и ее распределение вдоль образующей оболочки практически совпадают с таковыми у контрольного контейнера. В верхней же зоне, частично заполненной водой, деформация резко (на длине $\approx R_0$, как

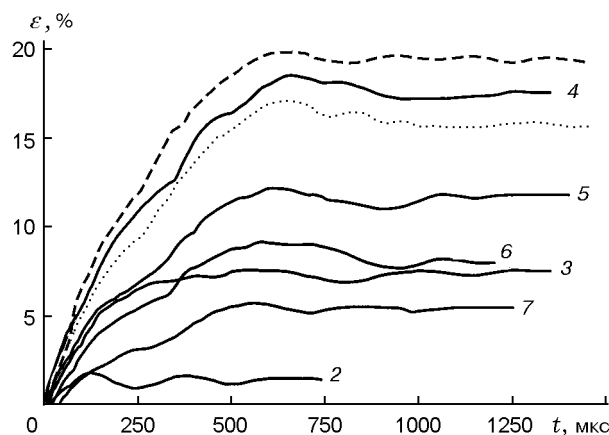


Рис. 5. Зависимости $\varepsilon(t)$, полученные по результатам тензометрирования контейнеров № 3 (пунктирная кривая) и № 4 (кривые 2–7):

номера 2–7 соответствуют номерам датчиков на рис. 3; датчик 1 показал отсутствие деформации; штриховая линия — расчет

у контейнера с воздухом) уменьшается до нуля в надводной части, но у самого края оболочки вновь заметно расширяется. У контрольного контейнера этот эффект отсутствует.

Данные опытов подтверждают и расширяют вывод [1, 4] о сильном влиянии заполняющей среды на поведение контейнера при взрыве. При этом обращают на себя внимание глубокие качественные отличия в поведении контейнера в зависимости от степени заполнения его водой. Прежде всего, это относится к деформации оболочки и ее форме. Нельзя также не отметить и существенную разницу в металлической способности заполняющей среды (см. выше о крышках контейнеров № 1 и 2).

Для понимания сущности исследуемых физических процессов, их причинно-следственной связи были проведены численные расчеты.

Численные расчеты проводились в переменных Лагранжа по программам решения двумерных задач газо- и гидродинамики и механики твердого тела. Рассматривались осесимметричное взаимодействие продуктов детонации (ПД) сферического заряда ВВ со средой, заполняющей полый стальной цилиндр с плоскими торцами, и динамическое воздействие среды на его стенки. При этом использовали следующие уравнения состояния:

для ВВ — в форме Зубарева [11] с параметрами из [8, с. 99] при характеристиках соответствующих ВВ,

для воздуха — табличное [12] при начальной плотности $1,29 \text{ кг/м}^3$,

для воды — в форме Ми — Грюнайзена [13] с параметрами $n = 7,15$, $\Gamma = 0,4$ при начальной плотности 1000 кг/м^3 и начальной скорости звука 1500 м/с ,

для стали — при плотности 7800 кг/м^3 с использованием для упругой области деформирования коэффициента Пуассона $\nu = 0,3$ и модуля Юнга $E = 210 \text{ ГПа}$, а для пластической области — с использованием $\nu = 0,5$ и уравнения деформирования стали в форме [14, с. 101] с учетом фактора упрочнения в виде [15, с. 138].

В [14] получено уравнение деформирования стали при плавном расширении стального кольца, однократно нагруженного импульсом изнутри (близкие к таким нагружение и расширение оболочки имели место в опыте с контейнером № 1, заполненным воздухом). В этом уравнении роль фактора упрочнения играет коэффициент k . В опытах с водой (контейнеры № 2 и 3) оболочки расширялись в пульсирующем режиме, обусловленном многократным импульсным нагружением. При этом они упрочнялись в результате каждой пульсации. Такое упрочнение исследовалось в [15], где получен интегральный фактор упрочнения $K(\varepsilon_0)$, зависящий от остаточной деформации оболочки ε_0 после пульсаций. Поэтому для контейнера с водой подходит уравнение [14] с фактором $K(\varepsilon_0)$ вместо k . Но использование $K(\varepsilon_0)$ вместо k делает уравнение [14] универсальным, подходящим для случаев как с водой, так и с воздухом, поскольку при отсутствии пульсаций (случай с воздухом) $\varepsilon_0 = 0$ и $K(0) = k$.

Расчеты для контейнера с воздухом (№ 1) проводили по программе «Д» [16], а для контейнеров с водой (№ 3 и 4) — по программам комплекса «Сигма» [17] с использованием уравнений движения оболочки в форме [18]. При этом, поскольку сжимаемость продуктов детонации и воздуха высока, их масса по сравнению с массой воды и контейнера мала, а деформация оболочки незначительна, контейнер № 1 считался абсолютно жестким, а воздушная среда над водой в контейнере № 4 была заменена вакуумом. Откольная прочность воды не учитывалась и считалось, что водная среда не теряет сплошности. Расчеты для контейнеров с водой проводили с использованием схемы

мгновенной детонации ВВ и с учетом податливости оболочек и торцов. Эти допущения значительно упростили расчеты без существенного ущерба для интересующих нас результатов.

Рассмотрим результаты опытов и расчетов.

Контейнер № 1 (с воздухом). Ввиду цилиндрической симметрии, на рис. 6, а приведена исходная расчетная сетка в 1/4 продольного сечения системы «ВВ — воздух — контейнер».

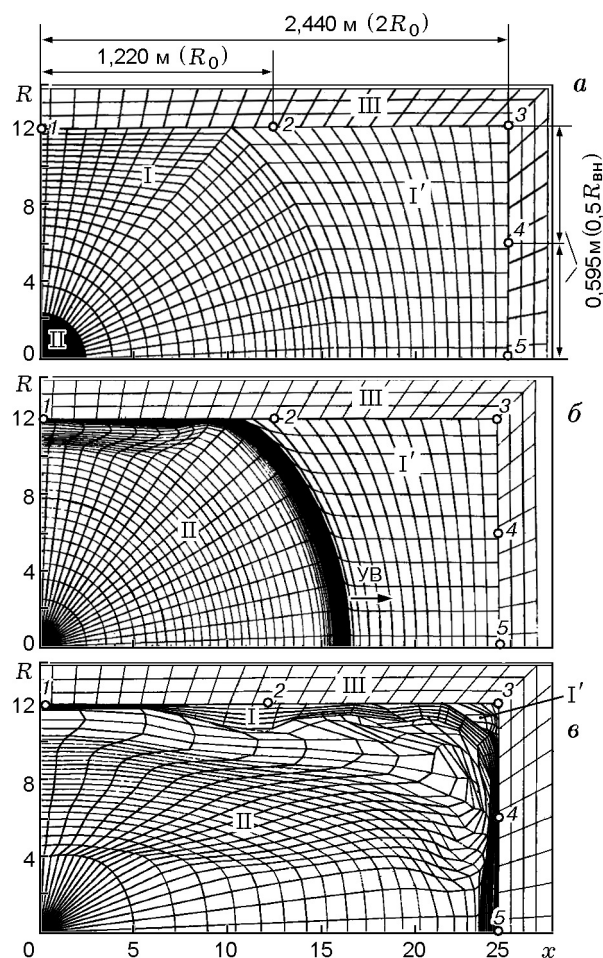


Рис. 6. Расчетная сетка системы «ВВ — воздух — контейнер» в исходном состоянии (а), ее деформация в начале воздействия взрыва на оболочку (б) и деформация в процессе дальнейшего разлета ПД (область II), сжатия вытесненного воздуха (области I и I') и распределения его тонким слоем по внутренней поверхности контейнера (в):

I и I' — воздух, II — ВВ, III — контейнер; 1-2-3-4-5 — граница «воздух — жесткая стенка»; на рисунке б стрелкой показано направление движения ВВ к торцу

Газодинамическое состояние среды в контейнере иллюстрировано расчетными сетками на рис. 6.

Детонация превращает ВВ в сферу из высокотемпературных пересжатых газообразных ПД и возбуждает в соседних слоях воздуха мощную сферическую ударную волну, расширяющуюся с начальной скоростью ≈ 9 км/с. Удаляясь от центра взрыва, она несколько слабеет в силу необратимых потерь энергии, и ее движение замедляется. Вслед за ней с некоторым отставанием расширяется сфера ПД.

При скорости ≈ 3 км/с УВ сначала достигает оболочки в среднем поперечном сечении, ближайшем к центру взрыва. Позже УВ достигает соседних сечений, более удаленных от центра взрыва, и делится на две симметричные части, расходящиеся вдоль оси к торцам (рис. 6, б). При этом поверхности фронтов УВ, ограниченные по краям жесткой оболочкой, почти не меняются и УВ движутся с минимальными энергетическими потерями.

Действие взрыва на оболочку наиболее эффективно в ее среднем сечении, так как направлено по нормали к ней. Здесь поток ударного импульса через единицу поверхности можно оценить [8, с. 487–500] как

$$i_0 \sim \frac{m}{R_0^2} \sqrt{Q \left(1 + \frac{\rho_a R_0^3}{\rho_{ВВ} R_{ВВ}^3} \right)}, \quad (4)$$

где ρ_a — начальная плотность воздуха, $R_{ВВ}$ — радиус заряда ВВ. После многократного отражения УВ от оболочки и приближающихся ПД воздух сильно сжимается (до $\approx 10^2$ раз), давление на оболочку достигает максимума (до ≈ 300 МПа) и она получает максимальную скорость v_0 .

На расстоянии x от среднего сечения оболочки испытывает косою удар, так как здесь направление действия ударных импульсов на оболочку отличается от нормального (см. рис. 1). При этом нормальная компонента $i_n(x)$ потока импульса $i_\varphi(x)$, действующего на оболочку под углом φ к нормали, равна [8, с. 499]

$$i_n(x) = i_\varphi(x) \cos^2 \varphi, \quad (5)$$

где

$$i_\varphi(x) \approx \frac{m}{R_\varphi^2} \sqrt{Q \left(1 + \frac{\rho_a R_\varphi^3}{\rho_{ВВ} R_{ВВ}^3} \right)}, \quad (6)$$

$$R_\varphi = R_0 \sqrt{1 + (x/R_0)^2} \quad (7)$$

— радиус фронта УВ,

$$\cos \varphi = [1 + (x/R_0)^2]^{-1/2}. \quad (8)$$

Из-за сильной сжимаемости воздух и ПД способны к значительным перемещениям, о чем можно судить по искривлению радиальных линий расчетной сетки (ср. рис. 6, а, б и 6, в). Поэтому при косою ударе возле оболочки формируются газодинамические потоки, скользящие вдоль нее к торцам вслед за УВ. При этом в силу удаления от центра взрыва (7) ударный импульс давления на оболочку слабеет сам по себе (6), его нормальная составляющая тем более уменьшается (5), а касательная — увеличивается. Поэтому ударное воздействие на оболочку резко ослабевает, а интенсивность течения вдоль оболочки возрастает. Таким образом, возникает сильный двумерный эффект, характерный для взрыва в цилиндрическом контейнере: под влиянием жесткого ограничения оболочкой одномерное радиальное расширение ПД трансформируется в мощные радиально-осевые газодинамические потоки.

Эти потоки содержат более 90% энергии взрыва, в том числе $\approx 75\%$ кинетической. Скорость головы потока (до ≈ 3 км/с) превышает скорость УВ (≈ 2 км/с), и они оказывают на торец мощное ударное воздействие: сначала УВ — на оси (пик давления до ≈ 40 МПа), затем УВ вместе с догнавшим ее потоком — в углу возле оболочки (пик давления до ≈ 160 МПа). При этом ПД занимают почти всю полость контейнера и отделены от его стенок лишь тонким слоем сжатого воздуха (см. рис. 6, в). Тем временем косою удар по оболочке приводит к возникновению вторичных волн давления в ПД. Они коллапсируют под углом к оси и формируют в ее окрестности «шнуровые» газовые струи (типа кумулятивных), устремленные к торцам и оказывающие на них наиболее мощное воздействие (пик давления в центре торца достигает ≈ 220 МПа). В опыте действие УВ, потоков и струй привело к выпучиванию торцов (по оценкам, на это потребовалось $\approx 0,25\%$ энергии взрыва) и отрыву крышки от оболочки (отрыву дна помешало жесткое основание).

В результате разлета ПД давление в центральной части контейнера резко снижается (менее 5 МПа). В эту зону разгружаются отраженные УВ и волны давления, после чего волновые процессы затухают, давление в контей-

нере быстро падает и выравнивается по объему.

Таким образом, в целом можно считать, что оболочка испытывает ударное нагружение, близкое к однократному, после чего плавно расширяется по инерции. Под действием внутренних усилий расширение оболочки замедляется до остановки с переходом в затухающие радиальные колебания (см. рис. 4, датчики 1, 2, 5, 7, 8).

Рассмотрим характер распределения пластической окружной деформации оболочки вдоль образующей. Учитывая, что состояние оболочки близко к плоской деформации с сильной окружной доминантой, выделим в ней на расстоянии x от среднего сечения элементарное кольцо шириной dx (см. рис. 1). Площадь внутренней поверхности кольца ($h_0/R_0 \ll 1$) —

$$dS = 2\pi R_0(1 - h_0/R_0)dx \approx 2\pi R_0 dx, \quad (9)$$

его масса —

$$dM \approx \rho h_0 dS. \quad (10)$$

Работа пластического деформирования кольца —

$$dW(x) \approx h_0 dS \int_0^{\varepsilon_{\text{п}}(x)} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (11)$$

где $\sigma(\varepsilon)$ — окружное напряжение в кольце. Эта работа происходит за счет кинетической энергии кольца:

$$dU(x) \sim \frac{[i_n(x)dS]^2}{2dM}. \quad (12)$$

Если пренебречь упругой деформацией, то согласно [14] при плавном расширении стального кольца со скоростью, уменьшающейся от максимума до нуля,

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_s + \eta \dot{\varepsilon}_0(x) = \text{const} = \sigma(x), \quad (13)$$

где $\sigma_s = \sigma_{0,2} + \sigma_\eta = 564$ МПа — динамический предел текучести, $\sigma_{0,2} = 314$ МПа (см. табл. 1), $\sigma_\eta = 250$ МПа — составляющая, обусловленная динамической вязкостью $\eta \approx 0,06$ МПа · с, $\dot{\varepsilon}_0(x) = v_0(x)/R_0$ — начальная скорость деформации. Из табл. 2 следует, что $v_0(x) < v_0(0)$, поэтому и $\dot{\varepsilon}_0(x) < \dot{\varepsilon}_0(0)$. При этом $\dot{\varepsilon}_0(0) = v_0(0)/R_0 = 91/1,22 \approx 75$ с⁻¹, $\eta \dot{\varepsilon}_0(0) \approx 0,06 \cdot 75 \approx 4,5$ МПа. Очевидно, что при таких скоростях

$\sigma_s \gg \eta \dot{\varepsilon}_0(0)$ и тем более $\sigma_s \gg \eta \dot{\varepsilon}_0(x)$. Следовательно, членом $\eta \dot{\varepsilon}_0(x)$ в (13) можно пренебречь. Таким образом, формула (11) принимает вид

$$dW(x) \approx \sigma_s \varepsilon_{\text{п}}(x) h_0 dS. \quad (14)$$

Из закона сохранения энергии с учетом формул (4), (5), (12), (14) следует

$$\frac{dW(x)}{dW(0)} = \frac{dU(x)}{dU(0)} \rightarrow \frac{\varepsilon_{\text{п}}(x)}{\varepsilon_{\text{п}}(0)} \approx \left[\frac{i_n(x)}{i_0} \right]^2. \quad (15)$$

Отсюда с учетом (4)–(8) получаем искомую формулу распределения $\varepsilon_{\text{п}}(x)$:

$$\varepsilon_{\text{п}}(x) \approx \varepsilon_{\text{п}}(0) \left\{ 1 + \frac{\rho_a R_0^3}{\rho_{\text{ВВ}} R_{\text{ВВ}}^3} \left[1 + \left(\frac{x}{R_0} \right)^2 \right]^{3/2} \right\} / \left\{ \left(1 + \frac{\rho_a R_0^3}{\rho_{\text{ВВ}} R_{\text{ВВ}}^3} \right) \left[1 + \left(\frac{x}{R_0} \right)^2 \right]^4 \right\}. \quad (16)$$

Значения $\varepsilon_{\text{п}}(x)$, рассчитанные по формуле (16), хорошо согласуются с экспериментальными почти на всей длине оболочки, исключая края, стянутые к оси при выпучивании торцов (см. рис. 2). Это доказывает, что в опыте с контейнером, заполненным воздухом:

- эффективность импульсного нагружения оболочки в некотором ее поперечном сечении определяется не только удаленностью последнего от центра взрыва, но и сильной зависимостью нормальной компоненты ударного импульса от угла его действия на оболочку при косом ударе, которая обусловлена высокой сжимаемостью заполняющей среды и ее относительно малой массой ($\approx 1\%$ от массы контейнера);
- именно в резком ослаблении импульсного воздействия газовой среды на оболочку при косом ударе заключается причина локализации пластической деформации, главным образом, в сравнительно узкой средней зоне (на длине $\approx 2R_0$).

Оценим энергоемкость оболочки при пластической деформации:

$$W \approx 2\pi R_0 h_0 \iint_{x,\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon dx. \quad (17)$$

При $x = 0$ согласно вышеизложенному $\sigma(\varepsilon) = \text{const} \approx 570$ МПа. Примем это значение для всей оболочки, пренебрегая влиянием $\dot{\varepsilon}_0(x)$. Численное интегрирование (методом трапеций) экспериментальной кривой

$\varepsilon_n(x)$, приведенной на рис. 2, с учетом (17) в интервале $-L/2 \leq x \leq +L/2$ дает $W \approx 16,1$ МДж. При этом энергия взрыва $Qm = 4,232 \cdot 112,51 \approx 476,1$ МДж. Таким образом, отбор энергии взрыва оболочкой составил всего $\approx 3,4\%$, в том числе $\approx 2,3\%$ (или $\approx 68\%$ от W) пришлось на среднюю зону оболочки в пределах $-R_0/2 \leq x \leq +R_0/2$. Еще меньше энергии взрыва было затрачено на деформирование дна и крышки ($\approx 0,25\%$).

Из-за столь малого отбора энергии взрыва контейнером газы в нем содержат почти всю энергию взрыва ($\approx 96\%$) и в силу высокой сжимаемости обладают значительной метательной способностью (в случае разрушения контейнера). Поэтому в опыте после отрыва крышки сжатые газы, расширяясь, эффективно воздействовали на нее в течение некоторого времени, сообщая ей часть своей энергии, и таким образом разогнали ее до значительной скорости.

Итак, при взрыве в контейнере с воздухом:

- основным фактором его импульсного нагружения являются ПД, обладающие всей энергией взрыва;
- оболочка подвергается практически однократному ударному воздействию и ее деформация локализуется в сравнительно узкой средней зоне (на длине $\approx 2R_0$), что обусловлено высокой сжимаемостью заполняющей среды и ее крайне малой массой ($\approx 1\%$ от массы контейнера);
- в силу вышеупомянутой причины отбор энергии взрыва оболочкой весьма низок ($\approx 3\%$) и большей частью ($\approx 2\%$) происходит в средней зоне оболочки;
- низкий отбор энергии взрыва оболочкой и высокая сжимаемость заполняющей среды обуславливают сильный двумерный эффект взрыва (переход УВ и газовых потоков за ее фронтом от сферической симметрии к цилиндрической) с наиболее мощным действием вдоль оси на торцы и с эффективной метательной способностью.

Контейнеры № 2 и 3 (заполненные водой).
Для определенности остановимся на контейнере № 3. На рис. 7,а приведена исходная расчетная сетка в 1/4 продольного сечения системы «ВВ — вода — контейнер». Конечное состояние расчетной сетки системы приведено на рис. 7,б.

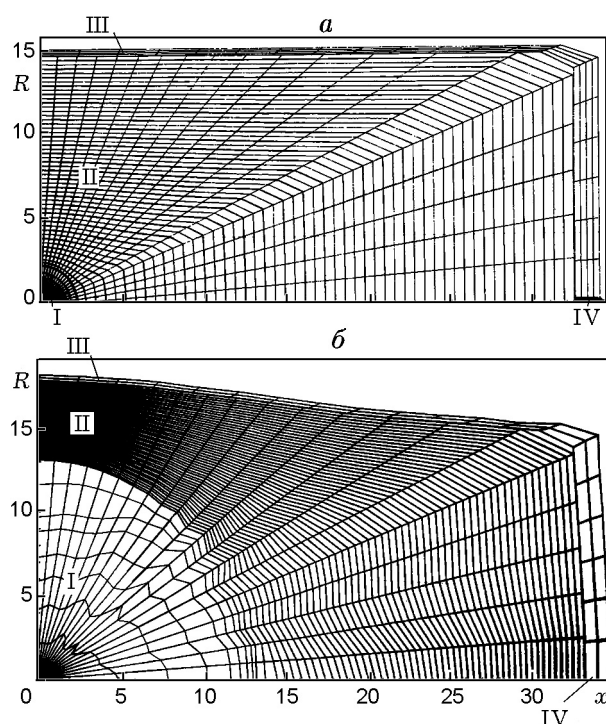


Рис. 7. Расчетная сетка системы «ПД — вода — контейнер № 3» в момент окончания детонации ВВ (а) и через 815 мкс (б):

I — ПД, II — вода, III — оболочка, IV — крышка; радиальные линии на рисунке б, оставшиеся прямыми, свидетельствуют, что характер нагружения контейнера был близок к секторному

Детонация превращает ВВ во взвешенный в воде высокотемпературный газовый пузырь из пересжатых ПД. Волна детонации, выйдя к воде, генерирует в ней мощную сферическую УВ, в которой сжатие воды первоначально достигает 60%, а давление ≈ 10 ГПа. Начальная скорость УВ достигает ≈ 6 км/с, массовая скорость воды за ее фронтом ≈ 2 км/с. При этом к центру пузыря коллапсирует волна разрежения и пузырь динамично расширяется, импульсивно «расталкивая» окружающую воду и возбуждая в ней волну давления, бегущую вслед за первичной УВ. В дальнейшем расширение пузыря происходит в слабо пульсирующем режиме, вследствие циркуляции в нем волн давления, и, замедляясь, продолжается в течение всего периода нагружения контейнера, оказывая значительное квазистатическое давление на воду и через нее на стенки контейнера. К моменту подхода первичной УВ к оболочке пузырь передает в воду до 80% энергии взрыва, в том числе до 40% кинетической, и становится,

так сказать, «холодным» (относительно первоначального состояния).

Расширяясь со средней скоростью ≈ 2 км/с и увлекая за собой воду со средней скоростью $\approx 10^2$ м/с, первичная УВ быстро слабеет в силу необратимых потерь энергии и на подходе к оболочке амплитуда давления уже не превышает 360 МПа. При таких давлениях сжимаемость воды ничтожна, что в замкнутом объеме повышает эффективность передачи контейнеру энергии взрыва. Поэтому оболочка испытывает жесткий удар, существенно усиленный напором динамично расширяющегося пузыря. При этом за время $\approx 2h_0/c_0$ (c_0 — скорость звука), т. е. значительно быстрее, чем при заполнении воздухом, ей сообщается максимальная радиальная скорость v_0 , сначала в ближайшем к центру взрыва среднем поперечном сечении. Здесь интенсивность потока ударного импульса (в акустическом приближении) [8, с. 577]

$$i_0 \sim \frac{m^{2/3}}{R_0}. \quad (18)$$

После удара по оболочке к ее оси коллапсирует отраженная УВ, резко тормозящая встречный сравнительно низкоскоростной поток воды, увлеченной ранее первичной УВ. В результате оболочка опережает близлежащие слои воды и давление на границе «вода — оболочка» резко уменьшается и даже меняет знак. Это приводит к кавитации в воде и отрыву от нее оболочки⁴, которая продолжает расширяться по инерции, замедляясь под действием внутренних усилий. Так реализуется первая пульсация расширения оболочки (см. рис. 5, пунктирная линия). При этом в силу ничтожной сжимаемости воды увеличение объема при расширении контейнера приводит к резкому ослаблению волн давления в ней.

Тем временем первичная УВ в результате взаимодействия с оболочкой делится на две волны, симметрично расходящиеся к торцам. При этом отраженная УВ огибает пузырь и формирует на его полюсах вторичные волны давления. Они движутся вдоль оси вслед за первичными УВ, которые уже приближаются к торцам оболочки. В этих же направлениях вдоль оболочки, нагружая ее (наряду с напо-

ром пузыря), движутся волны давления, образованные при косом ударе первичной УВ. Отражаясь от торцов, первичные УВ оказывают давление до ≈ 300 МПа (существенно большее, чем на примыкающие участки оболочки) и вызывают их выпучивание, а при недостаточной прочности — и отрыв (как у контейнера № 2).

В результате интерференции УВ, отраженных от торцов, с ослабленными встречными волнами давления на оси образуются вторичные УВ, устремленные к пузырю. Одновременно в средней части контейнера кавитационные полости в воде коллапсируют, генерируя новые волны давления. Усиленные напором пузыря, они взаимодействуют со вторичными УВ и повторно нагружают оболочку (вторая пульсация ее расширения). Затем в результате взаимодействия вторичных УВ и волн давления возбуждаются новые волны давления, снова нагружающие (наряду с напором пузыря) стенки контейнера (третья пульсация) и т. д. Вследствие резкого ослабления волновых процессов и демпфирующего влияния воды, пульсации оболочки относительно быстро затухают (быстрее, чем в опыте с воздухом).

Из-за малой сжимаемости воды ее перетекание при косых ударах по оболочке крайне незначительно, что подтверждается отсутствием искривления радиальных линий расчетной сетки на рис. 7,б (ср. с рис. 6,в). Это обстоятельство, а также то, что основными факторами нагрузки являются первичная УВ и расширяющийся пузырь ПД, логически приводят к идее «секторного» нагружения контейнера из центра: его стенки нагружаются импульсами воды, заключенной в объемах разных, обращенных к ним, тел вращения (вокруг оси контейнера) секторов с вершинами в центре взрыва (см. рис. 1): к оболочке относится сектор I, к крышке — II, к дну — III⁵. Отметим, что наряду с осевой симметрией эти секторы симметричны и относительно среднего поперечного сечения.

Рассмотрим на основе секторной схемы нагружения характер распределения пластической деформации оболочки вдоль ее образующей. Поскольку, как и в предыдущем случае, состояние оболочки близко к плоской деформации с сильной окружной доминантой, выделим

⁴Это характерно при взрывном нагружении тонкой стальной преграды в воде (см., например, [7, с. 560–561]).

⁵Разумеется, это упрощенная схема, так как на самом деле волновые процессы в разных секторах, естественно, взаимосвязаны. Но, по-видимому, связь эта достаточно слаба.

в ней элементарное кольцо шириной dx . Формулы, определяющие его параметры и энергоёмкость, аналогичны формулам (9)–(12). Учитывая малые сжимаемость и перетекание воды, предположим, что закон Паскаля остается справедливым и для происходящих процессов. Поэтому в отличие от (5) в опыте с воздухом на границе «вода — оболочка»

$$i_n(x) = i_\varphi(x) \sim \frac{m^{2/3}}{R_\varphi}, \quad (19)$$

где R_φ по-прежнему определяется по формуле (7). Иными словами, эффективность потока импульса не зависит от угла его действия и определяется только удаленностью сечения оболочки от центра взрыва.

Зависимость $\sigma(\varepsilon)$ в (11) также будет отличаться от (13). Это обусловлено пульсирующим характером деформации оболочки: в результате каждой пульсации она несколько упрочняется, поэтому (за пределами упругости)

$$\sigma(\varepsilon) \approx \sigma_s + \eta \dot{\varepsilon}_0(x) + \int_0^{\varepsilon_{\text{п}}(x)} k(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где $k(\varepsilon) = k_0 \exp(-a\sqrt{\varepsilon})$ — фактор упрочнения, $k_0 = 1400$ МПа, $a = 1,2$ [15]. Здесь, как и ранее, по сравнению с σ_s ($= 564$ МПа) членом $\eta \dot{\varepsilon}_0(x)$ можно пренебречь. В самом деле, $\dot{\varepsilon}_0(x) < \dot{\varepsilon}_0(0)$, а $\eta \dot{\varepsilon}_0(0) = \eta v_0(0)/R_0 \approx 0,06 \cdot 106/0,1525 \approx 42$ МПа, что составляет $\approx 7\%$ от σ_s . Итак, пренебрегая упругой деформацией и влиянием $\dot{\varepsilon}_0(x)$, примем в первом приближении

$$\sigma(\varepsilon) \approx \sigma_s + \int_0^{\varepsilon_{\text{п}}(x)} k(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (20)$$

Интегрируя (11), с учетом (9) и (20) получаем

$$dW(x) \approx 2\pi R_0 h_0 \mathcal{E}(x) dx, \quad (21)$$

где

$$\mathcal{E}(x) = \left(\sigma_s + \frac{2k_0}{a^2} \right) \varepsilon_{\text{п}}(x) - \frac{12k_0}{a^4} \left\{ 1 - \left[1 + a\sqrt{\varepsilon_{\text{п}}(x)} + \frac{a^2}{3} \varepsilon_{\text{п}}(x) \right] \exp[-a\sqrt{\varepsilon_{\text{п}}(x)}] \right\}. \quad (22)$$

Из закона сохранения энергии с учетом (12), (18), (19) и (21) следует

$$\frac{dW(x)}{dW(0)} = \frac{dU(x)}{dU(0)} \rightarrow \frac{\mathcal{E}(x)}{\mathcal{E}(0)} \approx \approx \left[\frac{i_n(x)}{i_0} \right]^2 = \left[1 + \left(\frac{x}{R_0} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (23)$$

откуда получаем уравнение, определяющее в неявном виде функцию $\varepsilon_{\text{п}}(x)$:

$$\mathcal{E}(x) \approx \mathcal{E}(0) \left[1 + \left(\frac{x}{R_0} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (24)$$

где $\mathcal{E}(0)$ — значение $\mathcal{E}(x)$ при $x = 0$.

Зависимость $\varepsilon_{\text{п}}(x)$, полученная при численном решении (24), хорошо согласуется с данными опытов в верхней части контейнера № 2 (см. рис. 2) и почти на всей длине оболочки контейнера № 3 (см. рис. 3)⁶, исключая края, стянутые к оси при выпучивании торцов. Это доказывает, что:

- секторная схема внутреннего взрывного нагружения контейнера с водой близка к реальности;
- эффективность импульсного нагружения оболочки в некотором ее сечении определяется только удаленностью последнего от центра взрыва и практически не зависит от угла действия импульса при косом ударе; это явление есть следствие малой сжимаемости среды, передающей действие взрыва на элементы контейнера, и обуславливает менее сильную, чем при заполнении воздухом, зависимость $\varepsilon_{\text{п}}(x)$.

Оценим энергоёмкость оболочки W при пластической деформации. Численное интегрирование экспериментальной зависимости $\varepsilon_{\text{п}}(x)$, приведенной на рис. 3, с учетом (17) и (20) в интервале $-L/2 \leq x \leq +L/2$ дает $W \approx 0,1233$ МДж. При $Qm = 4,232 \cdot 0,071 \approx 0,3$ МДж отбор энергии взрыва оболочкой составил $\approx 41\%$ (это практически вся кинетическая энергия воды), в том числе $\approx 34\%$ (или $\approx 83\%$ от W) пришлось на среднюю зону оболочки в пределах $-R_0 \leq x \leq +R_0$. Таким образом, очевидно, что при заполнении контейнера

⁶Причина асимметрии контейнера № 2 и симметрии контейнера № 3 относительно среднего сечения после взрыва объяснена выше.

водой ресурс оболочки используется более полно, чем при заполнении воздухом.

Из-за ничтожной сжимаемости и практически полной затраты кинетической энергии на деформацию контейнера вода обладает относительно низкой (по сравнению с газами) метательной способностью в случае разрушения контейнера (ср. вышеупомянутые данные об оторванных взрывах крышках контейнеров № 1 и 2).

Таким образом, при взрыве в контейнере с водой:

- основными факторами импульсного нагружения его стенок являются УВ в малосжимаемой воде, поглощающей до 80 % энергии взрыва, и волны давления в воде, генерированные динамично расширяющимся пузырем ПД;
- характер нагружения контейнера близок к секторному: оболочка и торцы нагружаются импульсами воды, заключенной в объемах разных, обращенных к ним, тел вращения (вокруг оси контейнера) секторов с вершинами в центре взрыва;
- оболочка подвергается многократному постепенно слабеющему ударному воздействию и деформируется по всей длине в пульсирующем режиме;
- отбор энергии взрыва контейнером ($\approx 40\%$) на порядок выше, чем при заполнении воздухом ($\approx 3\%$), из-за низкой сжимаемости и обусловленной этим существенно большей эффективности воды как передающего звена в системе «ПД — вода — контейнер».

Контейнер № 4 (заполненный водой на 3/4 объема). Динамику и последовательность расширения оболочки контейнера в разных поперечных сечениях можно проследить по зависимостям $\varepsilon(t)$ на рис. 5. Здесь расчетная зависимость (штриховая линия) удовлетворительно согласуется с экспериментальной (кривая 4). Поэтому можно полагать, что результаты расчета достаточно адекватно отражают характер, последовательность и взаимосвязь реальных процессов, которые иллюстрирует серия состояний расчетных сеток системы «ВВ — вода — контейнер» на рис. 8, 9.

После детонации ВВ расширение оболочки началось, естественно, в ближайшем к центру

взрыва среднем поперечном сечении. Деформация здесь была наибольшей. Эпюры $\varepsilon_{\text{п}}(x)$ у данного и контрольного контейнеров (см. рис. 3) резко различаются в надводной части и весьма близки в подводной, где оба контейнера деформированы практически одинаково. В этой части контейнера № 4 значения $\varepsilon_{\text{п}}(x)$, рассчитанные по формуле (24), также хорошо согласуются с экспериментальными. По мере удаления от среднего сечения к крышке это согласие постепенно ухудшается: значения, полученные в опытах, занимают промежуточное положение между расчетными для случаев заполнения воздухом и водой. В надводной области деформация контейнера совершенно иная: на уровне воды и несколько выше деформация отсутствует (это показал и датчик 1), а возле крышки резко возрастает до некоторого максимума.

По нашему мнению, деформация подводной части контейнера служит прямым экспериментальным подтверждением справедливости вышеизложенной концепции секторного нагружения контейнера с водой. Но в отличие от контрольного случая, где секторы симметричны относительно среднего поперечного сечения (см. рис. 1, контейнер № 3), у контейнера № 4 они асимметричны, так как секторы I и II ограничены более низким уровнем воды. Иными словами, в данном случае секторному нагружению подвергается только подводная часть контейнера. При этом часть оболочки нагружается по вышеописанной схеме: импульсом воды, заключенной в объеме тела вращения сектора I, а дно — импульсом воды, находящейся в объеме конуса III. В конусе II при отражении УВ от границы «вода — воздух» и далее по мере расширения и всплытия пузыря ПД вздымается динамичный куполообразный столб воды («гидромолот»), устремленный к крышке со средней скоростью ≈ 200 м/с (см. рис. 8, б).

Вначале «гидромолот» бьет в центр крышки (см. рис. 9, а), а при дальнейшем подъеме воды в процессе ее торможения и радиального растекания на крышке область удара распространяется на всю крышку. О силе удара «гидромолотом» можно судить по прогибу крышки, который вполне соизмерим с таковым у контрольного контейнера (см. табл. 3). Очевидно, в данном случае решающее значение имеют высокая (по сравнению с воздухом) плотность жидкости и ее несжимаемость, опре-

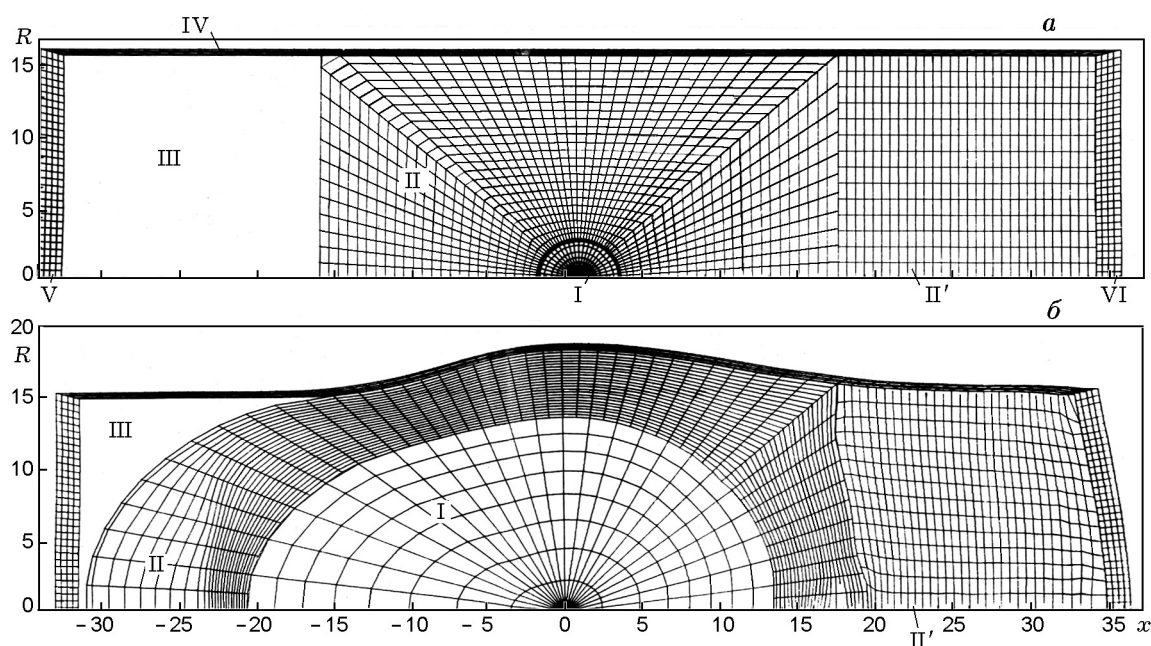


Рис. 8. Расчетная сетка системы «ПД — вода — контейнер № 4» в момент окончания детонации ВВ (*а*) и через 800 мкс (*б*):

I — ПД, II и II' — вода, III — вакуум, IV — оболочка, V — крышка, VI — дно; *б* — происходит расширение оболочки и прогиб дна; «гидроломат» приблизился к крышке

деляющие массу «гидроломата» и (наряду со скоростью) импульс и эффективность (жесткость) удара. В действительности, как известно, при выходе УВ на свободную поверхность воды происходит диспергирование последней. Поэтому наружный слой «гидроломата» дробится и насыщается воздухом (в расчете этот эффект отсутствует, так как водная среда считается сплошной и нет воздуха). Априори ясно, что диспергированный слой воды должен смягчать импульсное воздействие «гидроломата» на контейнер. Однако определение значимости этого фактора требует специального исследования.

В это время надводная часть оболочки практически не нагружается, так как контактирует со скользящими по ней тангенциальными потоками воды. Радиальные и тангенциальные потоки «встречаются» в зоне сопряжения крышки с оболочкой. В результате их взаимодействия здесь образуется область повышенного импульсного давления (до $\approx 10^2$ МПа), и происходит удар по краю оболочки, вызывающий ее локальное выпучивание (см. рис. 9, *б*). В дальнейшем вода отражается от стенок, в образовавшийся просвет выбрасываются ПД из всплывшего пузыря и гидродинамические про-

цессы в контейнере затухают.

Важно отметить, что в данном случае заряд ВВ был полностью погружен в воду. Случаи другого расположения ВВ и соответствующая реакция контейнера нами не исследовались.

Итак, поведение стального цилиндрического контейнера после детонации в его центре сферического заряда конденсированного ВВ существенно зависит от степени заполнения его водой. При этом основное значение имеют сжимаемость заполняющей среды и соотношение ее массы с массой деформируемых стенок контейнера. В частности:

- При заполнении контейнера воздухом основным фактором его нагружения являются ПД. Воздух и ПД — сильносжимаемая газовая среда, содержащая практически всю энергию взрыва и обладающая значительной метательной способностью (в случае разрушения контейнера). Оболочка контейнера испытывает локальное расширение в относительно узкой средней части, причем отбор энергии контейнером незначителен вследствие сильной сжимаемости среды и ее сравнительно малой массы. Эти свойства, наряду с

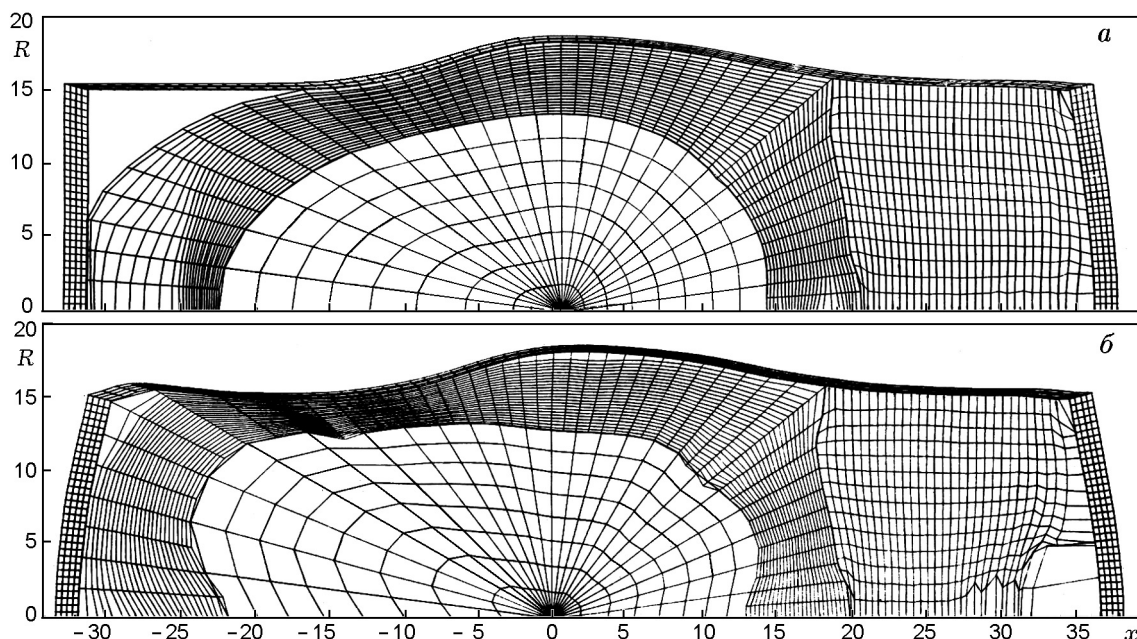


Рис. 9. Расчетная сетка системы «ПД — вода — контейнер № 4» через 900 (*a*) и 1700 мкс (*b*) после окончания детонации ВВ:

a — «гидромолот» надвигается на крышку и растекается по ней, происходит дальнейший рост деформации оболочки (в средней зоне) и дна; *b* — окончание эффективного воздействия взрыва на контейнер, от удара «гидромолотом» выпучилась крышка, в результате радиального удара по краю оболочки произошло ее локальное выпучивание

массивностью и жесткостью оболочки контейнера, обуславливают сильный двумерный эффект — трансформацию радиального разлета ПД в радиально-осевые течения с мощным кумулятивным воздействием на торцы контейнера.

- При заполнении контейнера водой основными факторами его нагружения являются УВ и вторичные волны давления в воде (мало- или несжимаемой среде), а также динамично расширяющийся пузырь ПД. Пузырь взвешен в воде и воздействует на контейнер волнами давления через воду, поглощающую практически всю энергию взрыва. Ее кинетическая часть расходуется на деформацию контейнера. Несжимаемость и значительная масса воды обуславливают секторный характер нагружения и существенно больший, чем при заполнении воздухом, отбор энергии взрыва контейнером (до 40%). Оболочка контейнера деформируется по всей длине, максимально — в средней зоне, в результате контейнер принимает бочкообразную форму.

- При частичном заполнении контейнера водой происходит его неравномерное нагружение. Если заряд ВВ погружен в воду, подводная часть контейнера подвергается секторному УВ-нагружению, как и в предыдущем случае, со всеми вытекающими последствиями. В надводной части крышка и сопряженный с ней край оболочки испытывают ударное нагружение «гидромолотом». В результате контейнер принимает кувшинообразную форму.

Авторы глубоко признательны Л. Д. Рябеvu и Ф. М. Митенкову — организаторам и руководителям работ по вышеупомянутой программе. Во многом благодаря им программа была реализована, ибо потребовала значительных усилий крупных коллективов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proctor J. F. Containment of explosions in water-filled right-circular cylinders // Exp. Mech. 1970. V. 10, N 11. P. 458–466.
2. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Цыпкин В. И. и др. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении сталь-

- ных труб // Физика горения и взрыва. 1974. № 4. С. 603–607.
3. **Цыпкин В. И., Клещевников О. А., Шитов А. Т. и др.** Масштабный эффект при взрывном разрушении сосудов, заполненных водой // Атом. энергия. 1975. Т. 38, вып. 4. С. 251–252.
 4. **Цыпкин В. И., Иванов А. Г., Минеев В. Н. и др.** Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении // Атом. энергия. 1976. Т. 41, вып. 5. С. 303–308.
 5. **Русак В. Н., Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Заикин С. Н.** Взрывостойкость сварных титановых оболочек // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 148–156.
 6. **Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Жуков В. В., Минеев В. Н.** Взрывостойкость цилиндрической части корпуса быстрого реактора // Атом. энергия. 1995. Т. 79, вып. 3. С. 178–188.
 7. **Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Жуков В. В.** Методика оценки взрывостойкости и несущей способности корпуса быстрого реактора при запроектной аварии // Атом. энергия. 1994. Т. 76, вып. 2. С. 87–93.
 8. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. М.: Наука, 1975.
 9. **Дубовик А. С.** Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1975. С. 63–68.
 10. **Шитов А. Т., Минеев В. Н., Клещевников О. А. и др.** Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 2, № 2. С. 304–307.
 11. **Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С.** Изэнтропы расширения продуктов детонации конденсированных ВВ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 127–132.
 12. **Кузнецов Н. М.** Газодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.

13. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. С. 543.
14. **Иванов А. Г., Кашаев Ю. Г., Коршунов А. И. и др.** Влияние предыстории нагружения на механические свойства стали при одноосном растяжении // ПМТФ. 1982. № 6. С. 98–103.
15. **Иванов А. Г., Коршунов А. И., Подурец А. М. и др.** Упрочнение стали в результате динамического одноосного растяжения // ПМТФ. 1987. № 6. С. 133–140.
16. **Анучина Н. Н., Бабенко К. И., Годунов С. К. и др.** Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики / Под ред. К. И. Бабенко. М.: Наука, 1979. С. 175–200.
17. **Баталова М. В., Бахрах С. М., Винокуров О. А. и др.** Комплекс «Сигма» для расчета задач двумерной газодинамики // Тр. Всесоюз. семинара по численным методам механики. Новосибирск, 1969. С. 283–288.
18. **Бахрах С. М., Певницкий А. В., Соловьев В. П., Симонов Г. П.** Динамика тонкостенных камер, окруженных жидкостью, при импульсном нагружении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1984. Вып. 1(15). С. 37–40.

*Поступила в редакцию 11/V 1999 г.,
в окончательном варианте — 11/I 2000 г.*
