

ВЗРЫВОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

В. А. Рыжанский, М. А. Сырунин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, ryzhan2@yandex.ru, root@gdd.vniief.ru

Приведен обзор экспериментальных данных о поведении стальных цилиндрических оболочек, заполненных водой или воздухом и многократно нагруженных взрывом изнутри, вплоть до разрушения. Получены полуэмпирические формулы, позволяющие относительно просто и достаточно достоверно оценивать основные параметры импульсного деформирования оболочки в пределах их экспериментального разброса.

Ключевые слова: взрывозащитная камера, стальная цилиндрическая оболочка, заполнение водой, заполнение воздухом, многократное взрывное нагружение, импульсное деформирование, взрывное разрушение, оценка взрывостойкости.

Для локализации взрывных процессов в замкнутом объеме широко применяются цилиндрические взрывозащитные контейнеры или камеры (ВЗК). Важным показателем эффективности ВЗК является взрывостойкость ее оболочки. Оперативная оценка параметров взрывостойкости с помощью достаточно простых формул представляется полезной как при проектировании, так и при эксплуатации ВЗК. Известны такие формулы для титановой и композитной оболочек [1, 2], однако чаще для ВЗК применяются стали. Краткий обзор опубликованных результатов внутреннего взрывного нагружения стальных оболочек и получение формул для оперативной оценки параметров их взрывостойкости — цель данной работы.

Из работ по изучению взрывостойкости стальных оболочек авторам интересны [3–9], где исследовались оболочки, деформируемые взрывами в области развитой пластичности, вплоть до разрушения.

Рассматривается стальная цилиндрический сосуд с тонкой оболочкой и плоскими торцевыми элементами (рис. 1), заполненный водой или воздухом при нормальных условиях. Размеры оболочки: наружный и внутренний радиусы R_0 и R_i , толщина h_0 и длина $L \geq 4R_0$. При относительной толщине оболочки $h_0/R_0 = \theta$ имеем

$$R_i = (1 - \theta)R_0. \quad (1)$$

Исследовались оболочки из следующих сталей: углеродистые Ст. 20 и Ст. 35, низколегированная 17ГС [5, 6, 9] и нержавеющие 304, 410, 212, 1020, 6061-T6 [3, 9], 12X18H10T [7–9]. Механические характеристики сталей и

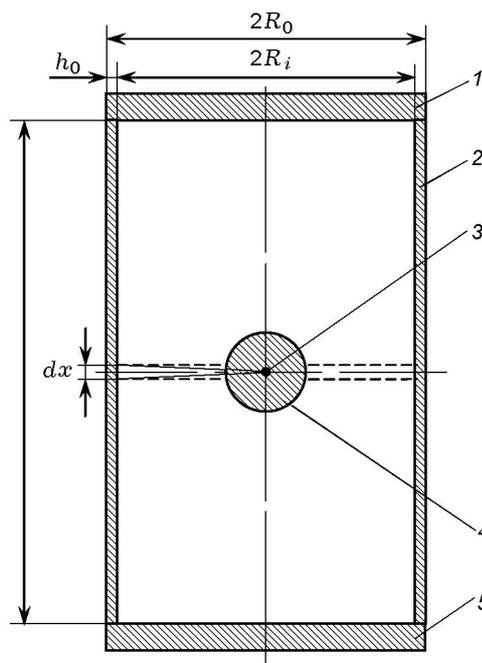


Рис. 1. Схема постановки опытов по взрывному нагружению ВЗК:

1 — крышка, 2 — оболочка, 3 — капсюль-детонатор, 4 — заряд ВВ, 5 — дно

особенности изготовления оболочек приведены в [3–9] и далее по тексту.

В центре сосуда располагали сферический заряд конденсированного бризантного взрывчатого вещества (ВВ), детонацию которого инициировали в центре. При этом обычно применяли ВВ из сплавов тротила с гексогеном ТГ 50/50 (плотность $\rho_{HE} = 1650 \text{ кг/м}^3$, теплота взрыва $Q = 4.78 \text{ МДж/кг}$) или ТГ 40/60 (1720 кг/м^3 и 4.93 МДж/кг) и проводили ре-

гистрацию радиального перемещения наружной поверхности оболочки в среднем поперечном сечении $r(t)$ (t — время от начала перемещения), а также окружной $\varepsilon(t)$ и продольной составляющих ее относительной деформации (параметры $r(t)$ и $\varepsilon(t)$ связаны соотношением $\varepsilon(t) = r(t)/R_0$). В этих целях использовали скоростную фотохронографию (в щелевом режиме) [10] и тензометрирование с помощью кольцевых [11] и зигзагообразных проволочных датчиков специальной конструкции. После каждого опыта по заранее нанесенным меткам измеряли остаточные деформации оболочки (подробнее методики измерения и регистрации описаны в [9]). Если при первом взрывном нагружении оболочка не разрушалась, ее нагружали снова в той же постановке — и так до разрушения, признаком которого было появление хотя бы одной сквозной трещины.

Основные данные опытов приведены в [4–9]. Пусть

$$R_{\text{НЕ}} = \sqrt[3]{3m/(4\pi\rho_{\text{НЕ}})} \quad (2)$$

— радиус ТНТ-эквивалента штатного (т. е. использованного в опыте) заряда ВВ, ТНТ-эквивалент принят для удобства сравнения результатов, полученных при использовании ВВ, отличающихся составом и мощностью; m — его масса, полученная путем пересчета по формулам [7, 9]:

в случае заполнения оболочки водой

$$m \approx m_x Q_x / Q, \quad (3)$$

в случае заполнения воздухом

$$m \approx m_x \sqrt{Q_x / Q}, \quad (4)$$

где m_x и Q_x — масса и теплота взрыва ВВ, сравниваемого с ТНТ ($\rho_{\text{НЕ}} = 1620 \text{ кг/м}^3$, $Q \approx 4.232 \text{ МДж/кг}$). Примем, что

$$\xi_w = m/M_w \quad (5)$$

— безразмерный параметр взрывной нагрузки оболочки, заполненной водой, а

$$\xi_a = m/M_a \quad (6)$$

— оболочки, заполненной воздухом. Здесь M_w или M_a — масса деформируемой части оболочки с водой или воздухом (см. ниже).

В результате взрыва сосуд принимает бочкообразную форму с расширением в средней

части оболочки (максимум — в среднем поперечном сечении) на длине $\approx 4R_0$ (при заполнении водой) или $\approx 2R_0$ (воздухом), а торцы выпучиваются наружу, несколько сужая примыкающие к ним края оболочки. Причины такого деформирования оболочки обусловлены компактностью и центральным расположением ВВ, а также свойствами заполняющей среды (вода или воздух) [3, 6, 8, 9], поэтому в (5) и (6)

$$M_w = 8\pi\rho R_0^2 h_0 (1 - \theta/2) \approx 8\pi\rho R_0^3 \theta, \quad (7)$$

$$M_a = 4\pi\rho R_0^2 h_0 (1 - \theta/2) \approx 4\pi\rho R_0^3 \theta, \quad (8)$$

где $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ — плотность стали.

Независимо от заполняющей среды, напряженно-деформированное состояние средней части оболочки близко к одноосной деформации с сильной доминантой окружной деформации. Вдоль образующей вблизи среднего поперечного сечения оболочка несколько сжимается [7–9]. В наиболее нагруженном среднем поперечном сечении окружная деформация превышает продольную (по модулю) примерно на порядок [7–9]. Поэтому разрушение оболочки происходит путем образования продольных трещин: одной, но локализованной в узкой средней зоне оболочки (слабое разрушение), либо одной или нескольких, но на всю длину оболочки (сильное разрушение при избытке ВВ).

Важным показателем взрывостойкости является пластичность оболочки, характеризующая ее способность диссипировать энергию взрыва. Предельной считается окружная деформация в момент разрушения оболочки (ε_r), которую можно считать фундаментальной характеристикой, так как она определяет динамическую пластичность оболочки и не зависит от количества последовательных нагружений [5–7, 9]. Поэтому взрывостойкость оболочки целесообразно характеризовать параметром ξ и соответствующим максимальным (пиковым) значением деформации ε_{max} (при $t = t_{\text{max}}$), не приводящей к разрушению (т. е. $\varepsilon_{\text{max}} < \varepsilon_r$). Несущая способность оболочки ограничивается сверху значениями разрушающей массы ТНТ ξ_r и соответственно разрушающей деформации ε_r (предельный случай — разрушение на пике деформации, при $\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{max}}$). Поэтому считается, что при $\xi < \xi_r$ и $\varepsilon < \varepsilon_r$ оболочка не разрушается, а при $\xi \geq \xi_r$ и $\varepsilon = \varepsilon_r$ — разрушается.

В [4, 9] приведены результаты четырех серий опытов с заполненными воздухом трубами из углеродистых сталей Ст. 20 ($R_0 \approx$

Таблица 1

Параметры сосудов из сталей Ст. 20 и 17ГС и характеристики их разрушения (по данным [4–6, 9])

θ , %	R_0 , м	Заполняющая среда	ξ_r , %	ε_r , %
4.7	0.052	Воздух	$4.3 < \xi_{a,r} \leq 13.1$	$19 < \varepsilon_r \leq 39$
$4.2 \div 4.7$	0.213		$3.2 < \xi_{a,r} \leq 13.4$	$10 < \varepsilon_r \leq 14$
4.7	0.052	Вода	$0.69 < \xi_{w,r} \leq 0.96$	34
	0.213	Воздух	$0.37 < \xi_{w,r} < 0.47$	$13 < \varepsilon_r \leq 15$
$3.2 < \xi_{a,r} \leq 4.5$			$10 < \varepsilon_r \leq 13$	
2.5	0.1525	Вода	$\xi_{w,r} < 0.4$	$\varepsilon_r \leq 18$
		Воздух	$3.0 < \xi_{a,r} < 4.5$	$6.0 < \varepsilon_r < 12.5$
	0.610	Вода	$0.20 < \xi_{w,r} < 0.24$	$7 < \varepsilon_r < 12$

0.052 ÷ 0.214 м, $\theta \approx 0.042 \div 0.047$, статический предел текучести материала оболочки $\sigma_{0.2} = 220$ МПа, относительное удлинение материала $\delta_5 = 25$ %) и Ст. 35 ($R_0 \approx 0.0354$ м, $\theta \approx 0.046 \div 0.047$, $\sigma_{0.2} = 300$ МПа, $\delta_5 = 20$ %), причем соблюдалось геометрическое подобие труб ($\theta \approx \text{const}$) и подобие сборок «заряд ВВ — труба» ($R_{HE}/R_0 \approx \text{const}$). Установлено:

— значение начальной (максимальной) радиальной скорости оболочки v_0 , естественно, прямо зависело от ξ , но в каждой серии опытов (в пределах экспериментального разброса) не зависело от базового размера оболочки (R_0);

— в опытах 1-й серии при одинаковых значениях ξ оболочки меньшего размера не разрушались, а большего — разрушались. При этом с уменьшением размера оболочки явно возрастала роль внутренних усилий: расширение малых оболочек тормозилось до остановки при меньших деформациях, чем в случае больших оболочек, которые расширялись до существенно больших деформаций и затем разрушались;

— в опытах 3-й серии с геометрически подобными сборками малые оболочки обладали большей динамической пластичностью перед разрушением, чем большие.

В [5, 6, 9] приведены результаты опытов с заполненными воздухом или водой оболочками из углеродистой стали Ст. 20 ($R_0 = 0.052$ и 0.213 м, $\theta = 0.047$) и низколегированной 17ГС ($R_0 = 0.1525$ и 0.61 м, $\theta \approx 0.025$, $\sigma_{0.2} = 340$ МПа, $\delta_5 = 28$ %). Было установлено, что при одно- и двукратном нагружении независимо от заполняющей среды разрушающие деформации сосудов близки. Но, как указывалось выше, заполняющая среда существенно влияла на реакцию сосудов. Так, у сосуда с водой

при прочих равных условиях значение v_0 достигалось примерно в два раза быстрее, чем для сосуда с воздухом. Замена воды воздухом при однократном нагружении и прочих равных условиях приводила к повышению массы разрушающих зарядов ВВ в 5–6 раз при одинаковых скоростях v_0 , а разрушающая деформация ε_r несколько снижалась. Оценки величин ξ_r и ε_r для данных сталей приведены в табл. 1 и позволяют констатировать:

— взрывостойкость оболочки с воздухом в 5–6 раз выше, чем оболочки с водой, при прочих равных условиях;

— для сосудов с водой увеличение размера оболочки в ≈ 4 раза привело к снижению $\xi_{w,r}$ и ε_r в среднем в ≈ 1.5 и ≈ 2.4 раза;

— в случае заполнения воздухом увеличение размера оболочек в ≈ 4 раза при заданном $\xi_{a,r}$ привело к снижению значения ε_r в среднем в ≈ 2.4 раза.

Таким образом, в исследованиях [4–6, 9] обнаружено сильное влияние масштабного фактора на взрывостойкость сосудов из низколегированной и углеродистых сталей. Оно заключалось в существенном снижении взрывостойкости данных объектов с увеличением их базового размера, что представляет собой сильный масштабный эффект. В настоящее время считается, что природа этого явления — энергетическая, так как согласно современной механике разрушения образование трещины, разделяющей объект, происходит за счет упругой энергии, накопленной в нем в процессе деформации [9, 12] (иных научно обоснованных причин этого явления в настоящее время не существует). Поскольку указанные материалы широко используются в практике создания ВЗК,

то, во-первых, опасность масштабного фактора для их прочности представляется вполне очевидной и, во-вторых, необходим учет его влияния при переносе на проектируемую ВЗК запасов прочности, определенных на малых моделях.

В [7–9] приведены результаты опытов с геометрически подобными оболочками из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, заполненными водой ($R_0 = 0.038, 0.1525, 0.61$ и 1.22 м, $\theta \approx 0.0246 \div 0.0263$, $\sigma_{0.2} \approx 300 \div 331$ МПа, $\delta_5 \approx 47 \div 64$ %) и воздухом (одна оболочка с $R_0 = 1.22$ м, $\theta \approx 0.0246$, $\sigma_{0.2} \approx 314$ МПа, $\delta_5 \approx 47$ %). При этом оболочки с водой были доведены до разрушения, а оболочка с воздухом — нет. Установлено, что при слабом разрушении (с учетом разброса данных):

— наличие сварных швов, при прочих равных условиях, существенно не влияет на ε_r , т. е. практически не ухудшает пластичность оболочек, но обуславливает локализацию трещин. Так, обычно трещина проходила по шву со сточенным валиком или возле шва с валиком. Валик шва, как показано в [7, 9], резко повышает локальную жесткость оболочки, поэтому ее окружная деформация не строго осесимметрична: в окрестности шва (шириной $\approx h_0$ с обеих сторон) деформация в 2–3 раза меньше, чем вдали от него. Следовательно, в целом влияние технологии изготовления на предельную деформацию монолитной и сварной оболочек несущественно;

— риски и иные локальные макродефекты не только служат очагами разрушения, но и снижают разрушающую деформацию ε_r , которая, тем не менее, даже при глубине дефекта до $\approx 0.2h_0$ остается довольно значительной: $\varepsilon_r \geq 14$ %. Отметим, что, например, для оболочек из углеродистых или низколегированных сталей такая деформация опасна даже в отсутствие дефектов. Таким образом, сохранение значительной пластичности при наличии макродефектов — важное положительное качество данной стали, повышающее надежность конструкций;

— при 1, 2, 3 и 44-кратном взрывном нагружении оболочек, в отсутствие макродефектов, их значения ε_r близки. Это подтверждает вывод [5, 6] об инвариантности ε_r относительно количества взрывов при 2-кратном нагружении оболочек из углеродистой и низколегированной сталей и, очевидно, существенно расширяет пределы этой инвариантности.

Указанные особенности выгодно отличают нержавеющую сталь от титановых сплавов [1] и обычных углеродистых и низколегированных сталей [4–6].

Для оценки величин ξ_r и ε_r оболочек из стали 12Х18Н10Т необходимо использовать данные опытов с бездефектными оболочками, бывшими на грани разрушения или разрушенными слабо. При этом, в отличие от ε_r , не зависящей от числа нагружений, величину ξ_r следует оценивать только по данным однократного нагружения. Таких опытов в [7–9] недостаточно, поэтому требуется зависимость $\xi(\varepsilon_{\max})$, с помощью которой, положив в пределе ε_{\max} равным разрушающей деформации ε_r , достигнутой после многократного нагружения, можно было бы оценить эквивалентную величину ξ_r , при которой эта деформация ε_r достигалась бы за одно нагружение. Такой зависимостью является полученная ниже формула (25) для $\xi_w(\varepsilon_{\max}, \theta, \sigma_{0.2})$, определяющая взрывостойкость оболочки с водой.

Оценки значений ε_r и ξ_r , прямые и расчетные, полученные с помощью (25), приведены в табл. 2. Видно, что при геометрически подобном увеличении размеров (в исследованных пределах) пластичность и несущая способность оболочек из нержавеющей стали существенно возрастают. Несомненно, это сильный масштабный эффект, но характер его проявления противоположен таковому у объектов из обычных сталей [4–6] (см. табл. 1), где увеличение радиуса оболочек, наоборот, приводило к снижению их прочности и пластичности (в чем, собственно, и состоит опасность влияния масштабного фактора). Согласно [7, 9] возможная причина данной аномалии связана с вышеупомянутыми благоприятными пластическими свойствами нержавеющей стали и чувствительностью ее к предыстории нагружения, в том числе способностью к динамическому упрочнению деформационной и фазовой природы [13–15].

Таким образом, в исследованном ряду геометрически подобных цилиндрических оболочек из стали 12Х18Н10Т, нагруженных взрывом, можно не опасаться их «охрупчивания» с увеличением размеров и обусловленного этим непредвиденного разрушения крупномасштабных оболочек (ведь, как следует из вышеизложенного, при использовании углеродистых и низколегированных сталей для изготовления крупномасштабных объектов «охрупчивание»

Таблица 2

Параметры оболочек из стали 12X18H10T и характеристики их разрушения (по данным [7–9])

k_m	R_0 , м	θ , %	$\xi_{w,r}$, %	ε_r , %	$\dot{\varepsilon}_0$, 10^3 с^{-1}
1	0.038	2.63	$0.46 < \xi_{w,r} \leq (0.57)$	$23.7 < \varepsilon_r \leq 23.9$	$2.947 \leq \dot{\varepsilon}_0 \leq (3.472)$
4	0.1525	2.62	$(0.63) < \xi_{w,r} \leq (0.70)$	$28.7 < \varepsilon_r \leq 30.7$	$(0.926) \leq \dot{\varepsilon}_0 \leq (0.993)$
16	0.610	2.62	$(1.00) < \xi_{w,r} \leq (1.04)$	$43.7 < \varepsilon_r \leq 45.9$	$(0.315) \leq \dot{\varepsilon}_0 \leq (0.323)$
32	1.220	2.46	$(0.86) \div 0.89$	$38.1 \div 39.1$	$(0.146) \leq \dot{\varepsilon}_0 \leq 0.149$

Примечания. 1. k_m — коэффициент моделирования. 2. $\dot{\varepsilon}_0 = v_0/R_0$ — максимальная скорость деформации оболочки. 3. В скобках даны значения $\dot{\varepsilon}_0$ и $\xi_{w,r}$, оцененные с помощью формул (18) и (25) (см. ниже) по результатам многократного нагружения оболочек с водой.

последних неизбежно и чревато разрушением). Это практически важный вывод, так как на основании его была оценена взрывостойкость изготовленного из стали 12X18H10T корпуса энергетического реактора на быстрых нейтронах БН-800 [7, 16].

Первая попытка определить взаимосвязь взрывной нагрузки и деформации оболочки была предпринята, по-видимому, Дж. Проктором в работе [3], которую можно считать классической. Исследовалась взрывостойкость заполненных водой оболочек радиусом $R_i = 0.0635 \div 0.254$ м при $\theta = 0.025 \div 0.10$ (прочие данные см. в [3]). Рассматривалось поведение кольца единичной ширины, выделенного в среднем поперечном сечении оболочки. На основе закона сохранения энергии считалось, что, сдерживая импульс взрыва, кольцо испытывает действие наибольших деформаций и напряжений. Предполагалось также, что под действием взрыва кольцо мгновенно приобретает начальную радиальную скорость v_0 . В дальнейшем по аналогии с опытами по взрывному расширению колец [17] было принято, что при $0 \leq t \leq t_{\max}$ радиальное смещение оболочки $r(t)$ параболически возрастает до максимума, следовательно, радиальная скорость линейно уменьшается от v_0 до нуля. В [7–9], с одной стороны, подтверждается, что в опытах с водой время достижения значения v_0 действительно весьма мало по сравнению со временем достижения ε_{\max} , а с другой стороны, установлено, что радиальное смещение оболочки, заполненной водой, происходит с пульсациями. Однако их амплитуды все же можно считать допустимо малыми при отклонении от средней гладкой кривой $r(t)$, похожей на параболу. Поскольку деформация оболочки обусловлена действием взрывного давления, использовался интегральный фак-

тор — действие на кольцо импульса взрыва. Этот прием Проктора, будучи вполне корректным, ниже используется и нами. В результате были получены полуэмпирические зависимости $\dot{\varepsilon}_0(m)$ и $m(\varepsilon_{\max})$ для «гладких» оболочек:

$$\dot{\varepsilon}_0 = \frac{20\,200m^{2/3}}{(1.47 + 0.0373R_i/h_0)\rho R_i(R_0^2 - R_i^2)}, \quad (9)$$

$$m = \left[\sigma_t \varepsilon_{\max} \rho^{0.85} (4.79 + 0.165R_i/h_0)(R_0^2 - R_i^2)^{1.85} / 10^5 (1.47 + 0.0373R_i/h_0)^{0.15} R_i^{0.15} \right]^{0.811}, \quad (10)$$

где σ_t — функция напряжения, определяемая по формуле

$$\sigma_t = \sigma_{0.2} + \varepsilon[\sigma_b(1 + \delta_5) - \sigma_{0.2}]/\delta_5, \quad (11)$$

σ_b — статический предел прочности материала оболочки. Здесь размерности параметров следующие: m — фунт, R и h — фут, ρ — фунт/фут³, σ — psi (фунт-сила/дюйм²), δ_5 и ε — безразмерные. Погрешности оценок при использовании формулы (10) для исследованных оболочек не превышали 10 % и обычно составляли 5 %. Формулы, определяющие $\dot{\varepsilon}_0(\xi_w)$ и $\varepsilon_{\max}(\xi_w)$, в [3] формально отсутствуют, но они легко могут быть получены из (9) и (10) с учетом (5) и (7).

Оболочки «негладкие», т. е. осложненные наличием сварных швов, патрубков и иных концентраторов напряжений, выдерживали деформацию, в среднем не превышающую $\delta_5/3$.

Отдавая должное работе [3], отметим, что она, несомненно, выиграла бы, если бы в ней были приведены экспериментальные данные о взрывной деформации и разрушении оболочек,

использованные при получении (10), такие как v_0 или $\dot{\epsilon}_0$, ϵ_{\max} и ϵ_r в зависимости от m . Эти характеристики весьма важны для изучения масштабных эффектов при разрушении геометрически подобных оболочек (на геометрическое подобие многих оболочек указывают данные [3]). Кроме того, представляется некорректным (с позиций современной механики разрушения) использование в зависимости (10) характеристик σ_b и δ_5 , содержащихся в σ_t (11). По существу, эти характеристики условны и, как теперь известно, зависят от масштаба образца или объекта, т. е. подвержены сильному влиянию масштабного фактора. Наконец, взрывостойкость оболочек с воздухом в [3] не исследовалась.

В отличие от работы [3], мы, во-первых, используем физико-механические свойства металлов, из которых изготовлены оболочки, исследованные в [4–8, 13–15]. Во-вторых, с учетом того, что напряженно-деформированное состояние оболочки близко к одноосной деформации, в среднем поперечном сечении нами выделено элементарное кольцо шириной dx (см. рис. 1). Наконец, принято, что при скоростном деформировании материал оболочки ведет себя как несжимаемое жестковязкопластическое тело с пределом текучести, зависящим от $\dot{\epsilon}$ (т. е. в конечном счете от ξ , R_i и h_0). Возможность использования такой модели для стальных колец, импульсно нагруженных изнутри, показана в [13, 14].

Пренебрегая упругой деформацией кольца и полагая (в первом приближении) сталь жесткопластическим телом с пределом текучести, зависящим от $\dot{\epsilon}_0$ [13, 14], допустим, что в системе «ВВ — вода — кольцо» удельный (по поверхности) ударный импульс взрыва \mathbf{I} , кинетическая энергия кольца dE_k , энергия взрыва dE_{HE} и работа деформации кольца dU связаны зависимостями

$$dU \sim dE_k \sim dE_{\text{HE}}, \quad \mathbf{I} dS \sim v_0 dM, \quad (12)$$

где согласно [18] при подводном взрыве

$$\mathbf{I} \sim m^{2/3}/R_i, \quad (13)$$

dS и dM — внутренняя поверхность и масса кольца (при $h_0 \ll R_0$):

$$dS \approx 2\pi R_0 dx, \quad dM \approx 2\pi \rho R_0^2 \theta dx. \quad (14)$$

Из (12) с учетом (1), (13), (14) и механических характеристик, приведенных выше, после

математической обработки данных [5–8] об однократном или первом нагружении оболочек с водой следует, что

$$v_0(m, R_0, \theta) \approx 0.364 \frac{m^{2/3}}{R_0^2 \theta}, \quad (15)$$

или с учетом (5) и (7) —

$$v_0(\xi_w, \theta) \approx 1.23 \cdot 10^3 \frac{\xi_w^{2/3}}{\theta^{1/3}}, \quad (16)$$

где размерности параметров таковы: v_0 — м/с, m — кг, R_0 — м, θ и ξ — безразмерные. Погрешности оценок v_0 не превышают 25 %.

Из (15) вытекает существенно упрощенный аналог формулы Проктора (9):

$$\dot{\epsilon}_0(m, R_0, \theta) [c^{-1}] = \frac{v_0}{R_0} \approx 0.364 \frac{m^{2/3}}{R_0^3 \theta}, \quad (17)$$

а из (16)

$$\dot{\epsilon}_0(\xi_w, R_0, \theta) [c^{-1}] \approx 1.23 \cdot 10^3 \frac{\xi_w^{2/3}}{R_0 \theta^{1/3}}. \quad (18)$$

Полагая далее, что кольцо нагружается взрывом части ВВ (dE_{HE}), заключенной в теле вращения сектора с центральным углом dx/R_0 (см. рис. 1), с учетом (2), (5) и (7) имеем

$$dE_{\text{HE}} = \frac{2\pi Q \rho_{\text{HE}} R_{\text{HE}}^3 dx}{3R_0} = \frac{Q m dx}{2R_0} \approx 4Q\pi\rho R_0^2 \theta dx. \quad (19)$$

При этом работа деформации кольца составляет

$$dU \approx 2\pi R_0^2 \theta dx \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma(e) de, \quad (20)$$

где σ — истинное окружное напряжение, $e = \ln(1 + \epsilon)$ — истинная (натуральная) окружная деформация (e и ϵ близки при $\epsilon \leq 0.3$), поэтому $\epsilon_{\max} = \ln(1 + \epsilon_{\max})$. По данным [13, 14] уравнение деформирования данной стали имеет вид

$$\sigma(e, \dot{e}) = \sigma_s + \eta \dot{e}_0 + \int_e k(e) de, \quad (21)$$

где $\sigma_s = \sigma_{0.2} + \sigma_\eta$ — динамический предел текучести, $\sigma_\eta = 250$ МПа, $\eta = 0.057$ МПа·с — динамическая вязкость, \dot{e}_0 — начальная скорость

истинной деформации, $k(e) = K \exp(-a\sqrt{e})$ — фактор упрочнения стали при пульсирующем расширении оболочки, $K = 1400$ МПа — модуль упрочнения, $a = 1.25$ (это следует из [14]) и

$$\int_0^e k(e)de = \frac{2K}{a^2} [1 - (1 + a\sqrt{e}) \exp(-a\sqrt{e})] \quad (22)$$

(решение получено при естественном условии равенства интеграла нулю на нижнем пределе). В дальнейшем для определения взаимосвязи «взрывная нагрузка — деформация оболочки» в виде $\varepsilon_{\max}(\xi_w, \theta, \sigma_{0.2})$ или $\varepsilon_{\max}(m, R_0, \theta, \sigma_{0.2})$ используем (12) с учетом (5), (7) и (18)–(22). Как показано в [7, 9], использование $\sigma(e, \dot{e})$ в виде (21) приводит к весьма сложной зависимости $\varepsilon_{\max}(\xi_w)$, поэтому, приведя (21) к виду $\sigma(e, \dot{e}) = \sigma_{0.2} \left[1 + \frac{\sigma_\eta}{\sigma_{0.2}} + \frac{\eta \dot{e}_0}{\sigma_{0.2}} + \frac{1}{\sigma_{0.2}} \int_0^e k(e)de \right]$,

для упрощения примем в первом приближении $\sigma(e, \dot{e}) = \sigma_{0.2}$. Это представляется допустимым, так как при реальной эксплуатации оболочки:

— для исследованных сталей $\sigma_\eta/\sigma_{0.2} \approx 0.2 \div 1.2$ и $\frac{1}{\sigma_{0.2}} \int_0^e k(e)de \approx 0.06 \div 1.12$, т. е. их минимальные значения незначительны по сравнению с первым слагаемым — единицей, а максимальные — близки к ней, что при выводе формул можно учесть эмпирически;
— обычно $\varepsilon_{\max} < \varepsilon_r$ и $\dot{e}_0 \sim 10 \div 10^2 \text{ с}^{-1}$, следовательно, $\eta \dot{e}_0/\sigma_{0.2} \approx 0.003 \div 0.03$, поэтому вклад этого слагаемого незначителен.

Тем не менее, при выводе полуэмпирических формул влияние слагаемых в квадратных скобках фактически все-таки учитывается. Например, для оболочки с водой схема получения формулы $\varepsilon_{\max}(\xi_w, \theta, \sigma_{0.2})$ такова.

Поскольку с учетом принятого допущения работа деформации кольца $dU \approx 2\pi R_0^2 \theta dx \sigma_{0.2} \varepsilon_{\max}$ происходит за счет его кинетической энергии $0.5 v_0^2 dM$, то с учетом (14) и (16) $\varepsilon_{\max} = \Phi \sigma_{0.2}^{-1} \theta^{-2/3} \xi_w^{4/3}$, где Φ — корректирующая функция, определяемая эмпирически. После математической обработки экспериментальных данных опытов с водой, приведенных в [5–8, 9] и относящихся к однократному или первому нагружению оболочек без разрушения, оказалось, что $\Phi = \Phi(\theta, \xi) \sim \theta \xi_w^{-1/3} \exp(-27.8\theta)$, и в итоге

$$\varepsilon_{\max}(\xi_w, \theta, \sigma_{0.2}) \approx 9.7 \cdot 10^6 \frac{\theta^{1/3} \xi_w}{\sigma_{0.2} \exp(27.8\theta)} \quad (23)$$

или с учетом (5) и (7)

$$\varepsilon_{\max}(m, R_0, \theta, \sigma_{0.2}) \approx 49.4 \frac{m}{\sigma_{0.2} R_0^3 \theta^{2/3} \exp(27.8\theta)}, \quad (24)$$

где размерности параметров, кроме уже известных, таковы: ε — безразмерное, $\sigma_{0.2}$ — МПа, а погрешности результатов в подавляющем числе находятся в пределах $\approx 0.1 \div 22\%$ и лишь изредка достигают $\approx 28 \div 49\%$. Из (23) следует

$$\xi_w(\varepsilon_{\max}, \theta, \sigma_{0.2}) \approx 10^{-7} \theta^{-1/3} \varepsilon_{\max} \sigma_{0.2} \exp(27.8\theta). \quad (25)$$

Соответствие экспериментальных и расчетных значений $v_0(\xi_w)$ и $\varepsilon_{\max}(\xi_w)$, полученных по формулам (16) и (23) (при $\theta, \sigma_{0.2} = \text{const}$), представляется удовлетворительным (рис. 2, 3).

Из (24) вытекает существенно упрощенный аналог формулы Проктора (10):

$$m(\varepsilon_{\max}, R_0, \theta, \sigma_{0.2}) \approx 0.02 \sigma_{0.2} R_0^3 \theta^{2/3} \varepsilon_{\max} \exp(27.8\theta). \quad (26)$$

Формулы для оболочек с воздухом получаются аналогично, но для ударного импульса в воздушной среде используется формула [19]:

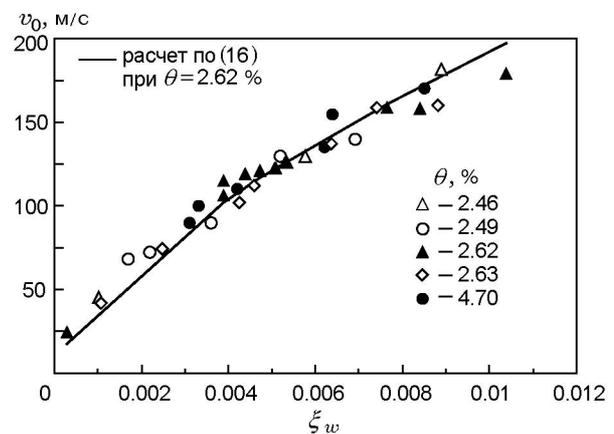


Рис. 2. Зависимость $v_0(\xi_w, \theta)$ для оболочек с водой (по данным [5–9])

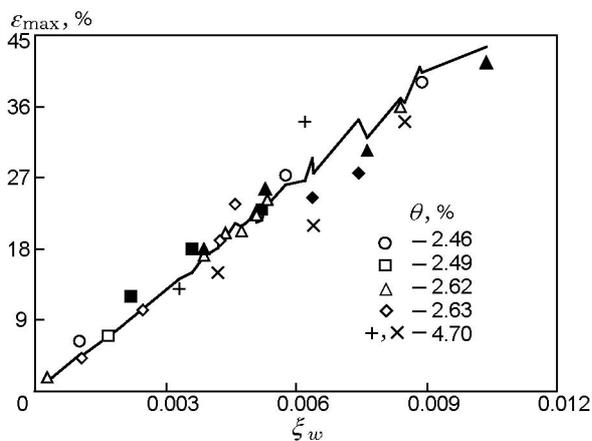


Рис. 3. Зависимость $\varepsilon_{\max}(\xi_w, \theta, \sigma_{0.2})$ для оболочек с водой (по данным [5–9]): темные точки и знак \times — разрушение; линия — расчет по формуле (23)

$$I \sim \frac{mD}{R_i^2} \sqrt{1 + \frac{\rho_a R_i^3}{\rho_{HE} R_{HE}^3}}, \quad (27)$$

где D — скорость детонации ВВ, ρ_a — плотность воздуха ($\approx 1.3 \text{ кг/м}^3$). Если вместо D использовать теплоту взрыва $Q \sim D^2$ [19] и полученные с учетом (1), (2), (6) и (8) выражения $m/R_i^2 \sim R_0 \xi_a \theta / (1 - \theta)^2$, $\rho_a R_i^3 / \rho_{HE} R_{HE}^3 = \rho_a (1 - \theta)^3 / 3\rho \theta \xi_a \approx 5.6 \cdot 10^{-5} (1 - \theta)^3 / \theta \xi_a$, то с учетом (12), (14) и (27) после математической обработки данных [4–9] (первое или однократное нагружение оболочек с воздухом) формула для v_0 может быть представлена в виде

$$v_0(Q, \theta, \xi_a) \approx \frac{900}{1 - \theta} \sqrt{Q \xi_a \left[\xi_a + \frac{\rho_a (1 - \theta)^3}{3\rho \theta} \right]}. \quad (28)$$

Поскольку $1/(1 - \theta) \approx 1$ ($\approx 1.03 \div 1.08$) и $\rho_a (1 - \theta)^3 / 3\rho \theta \sim 10^{-3} \ll 1$ при всех опытных значениях θ , зависимость (28) можно аппроксимировать прямой вида

$$v_0(Q, \xi_a) \approx 950 \xi_a \sqrt{Q}, \quad (29)$$

откуда

$$\dot{\varepsilon}_a(Q, R_0, \xi_a) \approx 950 \xi_a \sqrt{Q} / R_0, \quad (30)$$

где размерность Q — МДж/кг. Точность аппроксимации экспериментальных значений v_0 формулами (28) или (29) представляется удовлетворительной (рис. 4, погрешность $\approx 1 \div 45\%$ при средней $\approx 16\%$).

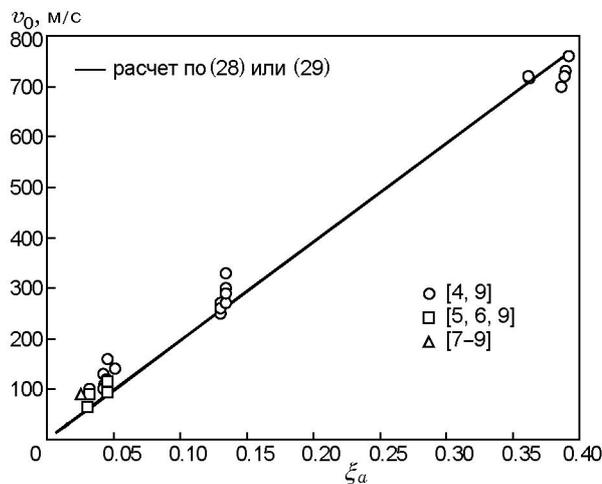


Рис. 4. Зависимость $v_0(\xi_a, \theta)$ для оболочек с воздухом (по данным [4–9])

Что же касается деформации, то из (12), (14), (19), (20) и (29), полагая в (21), как и ранее, $\sigma(e, \dot{e}) = \sigma_{0.2}$, и по данным [4–9] (первое или однократное нагружение оболочек с воздухом, без разрушения или оно слабое) тем же путем, что для оболочки с водой, получаем для оболочки с воздухом

$$\varepsilon_{\max}(Q, \sigma_{0.2}, \xi_a) \approx 7.8 \cdot 10^4 Q \xi_a^{1.4} / \sigma_{0.2} \quad (31)$$

или с учетом (6) и (8)

$$\varepsilon_{\max}(m, Q, R_0, \theta, \sigma_{0.2}) \approx 8 \cdot 10^{-3} \frac{Q}{\sigma_{0.2}} \left(\frac{m}{R_0^3 \theta} \right)^{1.4}, \quad (32)$$

откуда

$$m(Q, R_0, \theta, \sigma_{0.2}, \varepsilon_{\max}) \approx 31.5 R_0^3 \theta (\sigma_{0.2} \varepsilon_{\max} / Q)^{0.7}. \quad (33)$$

Соответствие опытных и расчетных значений $\varepsilon_{\max}(\xi_a)$, полученных по формуле (31) с учетом (6) и (8), показано на рис. 5 и представляется удовлетворительным (погрешность $\approx 1.8 \div 36\%$ при средней $\approx 18\%$).

В итоге исследования можно сделать следующие выводы.

- Формулы, полученные авторами, позволяют удовлетворительно оценивать параметры деформирования стальной цилиндрической оболочки, заполненной водой ((15)–(18) и (23)–(26)) или воздухом ((29)–(33)) и нагруженной

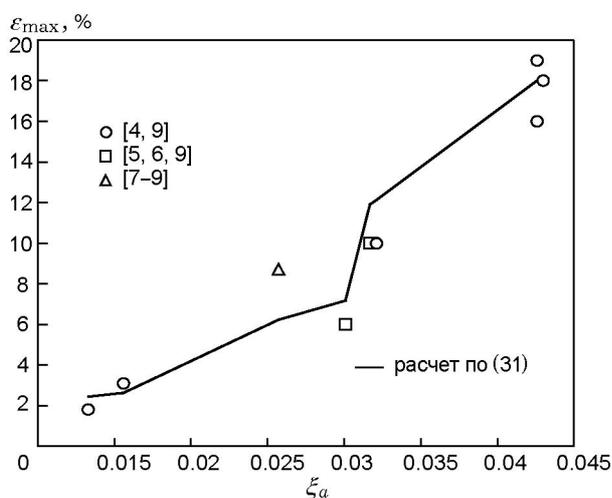


Рис. 5. Зависимость $\varepsilon_{\max}(Q, \sigma_{0.2}, \xi_a)$ для оболочек с воздухом (без разрушения)

взрывом любого бризантного конденсированного ВВ (типа ТНТ), компактно расположенного в ее центре. При этом формулы для оболочки с водой менее громоздки, чем их аналоги (9) и (10) из работы [3], а формулы для оболочки с воздухом аналогов не имеют.

- Указанные формулы позволяют решать как прямую задачу, т. е. оценивать параметры деформирования оболочки в зависимости от заданной массы ВВ, так и обратную, т. е. оценивать массу ВВ, необходимую для получения заданных параметров деформирования. Результаты являются оценками наиболее вероятных (как бы номинальных) значений параметров в пределах их экспериментального разброса, который обычно не превышает $\approx 20\%$ от номинала.

- Формулы не позволяют прогнозировать разрушение оболочки, так как получены без учета критериев ее разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русак В. Н., Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Заикин С. Н. Взрывостойкость сварных цилиндрических титановых оболочек // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 148–156.
2. Рыжанский В. А., Русак В. Н., Иванов А. Г. Оценка взрывостойкости цилиндрических композитных оболочек // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 1. — С. 115–121.
3. Proctor J. F. Containment of explosions in water-filled right-circular cylinders // *Experim. Mech.* — 1970. — V. 10, N 11. — P. 458–466.
4. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Цыпкин В. И., Кочкин Л. И., Васильев Л. В., Клещевников О. А. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении стальных труб // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 4. — С. 603–607.
5. 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.
6. Цыпкин В. И., Иванов А. Г., Минеев В. Н., Шитов А. Т. Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении // Атом. энергия. — 1976. — Т. 41, вып. 5. — С. 303–308.
7. 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.
8. Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Ковалев Н. П., Симонов Г. П., Чернышев Ю. Д., Минеев В. Н., Жуков В. В. Реакция стального цилиндрического контейнера на внутреннее взрывное нагружение, в зависимости от степени наполнения водой // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 4. — С. 115–130.
9. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / под ред. проф. А. Г. Иванова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
10. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. — М.: Наука, 1975.
11. Шитов А. Т., Минеев В. Н., Клещевников О. А., Цыпкин В. И., Рыжанский В. А. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 2. — С. 304–307.
12. Иванов А. Г. Динамическое разрушение и масштабные эффекты // ПМТФ. — 1994. — № 3. — С. 116–131.
13. Иванов А. Г., Кашаев Ю. Г., Коршунов А. И., Рыжанский В. А. и др. Влияние предыстории нагружения на механические свойства стали при одноосном растяжении // ПМТФ. — 1982. — № 6. — С. 97–103.
14. Иванов А. Г., Коршунов А. И., Подурец А. М., Рыжанский В. А. и др. Упрочнение стали в результате динамического одноосного растяжения // ПМТФ. — 1987. — № 6. — С. 133–140.
15. Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Иванов А. Г. Влияние предварительной деформации и технологического фактора на отклонную прочность стали 12X18H10T // Проблемы прочности. — 1988. — № 7. — С. 66–68.

-
16. **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.
 17. **Hoggatt C. R., Recht R. F.** Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring // Experim. Mech. — 1969. — V. 9, N 10. — P. 441–448.
 18. **Коул Р.** Подводные взрывы: пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
 19. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. — Изд. 2-е. — М.: Наука, 1975.

*Поступила в редакцию 11/III 2009 г.,
в окончательном варианте — 31/V 2010 г.*
