

## ОЦЕНКА ВЗРЫВОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК

В. А. Рыжанский, В. Н. Русак, А. Г. Иванов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Рассмотрены результаты внутреннего взрывного нагружения цилиндрических стеклопластиковых и металлопластиковых оболочек. В результате анализа экспериментальных данных разработан способ априорной оценки взрывостойкости оболочек. Приведены полуэмпирические формулы, рекомендуемые к использованию при проектировании взрывозащитных камер с несущими оболочками из указанных композитных материалов.

При разработке взрывозащитных камер (ВЗК) важное значение имеет выбор конструктивных материалов для несущих оболочек. При этом наряду с обычными металлами (сталь, титановые сплавы и др.) рекомендуется применять и ориентированные волокнистые композиты [1]. К ним относятся стеклопластики, в частности стеклоэпоксид. Оболочки из него готовят путем мокрой намотки на формообразующие оправки стеклоткани или стекловолокон, пропитанных отверждаемым эпоксидным связующим (матрицей).

Результаты проводимых во ВНИИ экспериментальной физики многолетних исследований взрывостойкости труб из стеклоэпоксидной структуры [2–8] показали существенное превосходство этого материала по ряду основных свойств, имеющих значение для взрывостойкости: отсутствие масштабных эффектов энергетической природы [9]; большая, чем у вышеупомянутых металлов, удельная прочность; нечувствительность к влиянию мелких дефектов; некатастрофический характер разрушения. Деформируется стеклоэпоксид упруго вплоть до разрушения, наступающего при деформациях, когда металлы находятся в пластическом состоянии.

Вместе с тем стеклоэпоксид не свободен от недостатков: сравнительно низкая термостойкость матрицы, малая циклическая прочность [10] и динамическая неустойчивость импульсно нагруженных тонкостенных конструкций типа оболочек (вследствие больших упругих деформаций). Все это снижает надежность конструкций и сужает возможность самостоятельного применения стеклоэпоксидов для защиты от взрыва.

Однако установлено [6], что подкрепле-

ние несущей стеклоэпоксидной оболочки достаточно тонким металлическим слоем устраняет указанные недостатки, кроме малой циклической прочности. Поэтому ВЗК данного типа целесообразно использовать при однократном нагружении. Металлический слой является вспомогательным: он задает форму оболочки при ее изготовлении, частично изолирует слой стеклоэпоксидов от термоперегрузок, блокирует его динамическую неустойчивость (путем отбора его упругой энергии) и забирает часть энергии взрыва на свою пластическую деформацию. В конечном счете все это повышает надежность конструкции. Такая двухслойная оболочка по сравнению с чисто металлической существенно более энергоемка при меньшей массе, что важно для транспортабельности ВЗК. Перспективность композита стеклоэпоксид + металл подтверждена результатами эксплуатации транспортабельной ВЗК [11] с металлопластиковой оболочкой, способной надежно локализовать взрыв до 200 кг тротила.

Результаты взрывных испытаний цилиндрических оболочек как несущих элементов ВЗК позволяют разработать способ априорной оценки их взрывостойкости. По опыту авторов, на начальной стадии проектирования ВЗК такие оценки весьма полезны.

Рассматривается нагружение цилиндрической оболочки (рис. 1), однослойной (стеклопластик) или двухслойной (металлопластик), взрывом расположенного в ее центре компактного (сферического) заряда взрывчатого вещества (ВВ) из сплава тротила с гексогеном (теплота взрыва  $Q = 4,78$  МДж/кг). Стеклопластиковый слой характеризуется плотностью  $\rho_{ст}$  и модулем Юнга  $E_{ст}$ . Металлический слой изготовлен из стали 20 (плотность

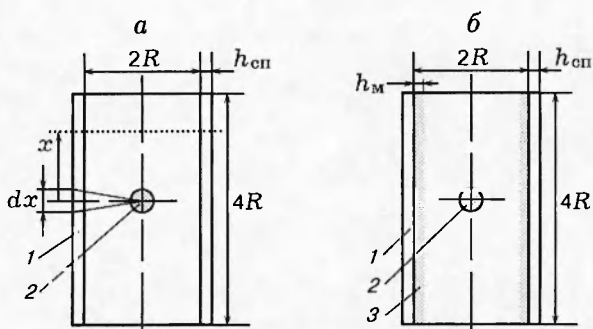


Рис. 1. Экспериментальные устройства и схемы опытов:

*a* — однослойная оболочка, *b* — двухслойная; 1 — стеклопластиковая оболочка или слой стеклопластика, 2 — заряд ВВ, 3 — слой металла

$\rho_m = 7800 \text{ кг/м}^3$ , предел текучести  $\sigma_{0,2} = 250 \text{ МПа}$ ) или титанового сплава ПТ-3В ( $\rho_m = 4450 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_{0,2} = 675 \text{ МПа}$ ). Исходные данные и результаты опытов при однократном нагружении оболочек приведены в табл. 1, 2, где

$$\xi_{сп} = m/M_{с1}, \quad (1)$$

$m$  — масса ВВ,

$$M_{с1} \approx 8\pi\rho_{сп}R^2h_{сп} \quad (2)$$

— масса стеклопластиковой оболочки или слоя ( $h_{сп}/R \ll 1$ );  $R$  — радиус оболочки;  $h$  — толщина стенки оболочки;  $\bar{\epsilon}_0 = V_0/R$  — максимальная скорость окружной деформации оболочки (относительная погрешность определения не превышает 10%),  $V_0$  — максимальная скорость ее расширения;  $\epsilon_{max}$  — максимальная окружная деформация (относительная погрешность определения не превышает 10%). Данные, приведенные в таблицах, получены на оболочках без разрушения или в самом его начале, когда возникали незначительные разрывы стеклонитей на наружной поверхности слоя. Взрывостойкость оболочки характеризуют, в основном, параметры  $\xi_{сп}$  и  $\epsilon_{max}$ .

В общих чертах (подробнее см. [1–8]), цилиндрическая оболочка реагирует на взрыв следующим образом. Получив при взрыве короткий мощный импульс, она расширяется по инерции, замедляясь под действием внутренних усилий, до остановки или разрушения (при избытке ВВ). После остановки расширение оболочки переходит в затухающие радиальные колебания. Сравнивая данные табл. 1, 2, нетрудно заметить, что стеклопластиковая оболочка начинает разрушаться при  $\epsilon_{max} \approx 1,4 \div 2,5 \%$ ,

хотя для стеклоэпоксида эти деформации не предельны. Согласно [1, 3–5, 7, 8] причина этого в том, что разрушение происходит не в первом полупериоде колебаний, а в результате потери устойчивости при сжатии. При этом нарушается осевая симметрия деформации и развиваются ее изгибные формы, пагубные для прочности. У металлопластиковой оболочки влияние этих факторов блокируется металлическим слоем. Поэтому разрушение стеклопластикового слоя наступает при предельных для него деформациях (при  $\epsilon_{max} \approx 3 \div 4 \%$  и более), как правило, в первом полупериоде колебаний.

У оболочек обоих типов в начале разрушения (практически без потери взрывостойкости) происходит разрыв стеклонитей на наружной поверхности слоя. При сильном разрушении (разумеется, с потерей взрывостойкости) область разрыва стеклонитей распространяется на всю толщину слоя с разрыхлением или разрушением матрицы. В зависимости от тяжести разрушения образуются одна или несколько сквозных трещин. Однако вплоть до разрушения стеклопластик деформируется упруго.

Абсолютный максимум расширения оболочки реализуется в ближайшем к центру взрыва среднем поперечном сечении, где ударный импульс действует по нормали к оболочке. В сечениях, удаленных от среднего, оболочка испытывает косой удар, и ее расширение резко уменьшается по закону распределения вдоль образующей потока удельного ударного импульса взрыва в проекции на нормаль к оболочке  $\bar{i}_n(\bar{x})$  [4]:

$$\bar{i}_n(x) = \frac{i_n(\bar{x})}{i_n(0)} = \frac{1}{(1+x^2)^2} \sqrt{\frac{1+B(1+\bar{x}^2)^{3/2}}{1+B}}, \quad (3)$$

где  $\bar{x} = x/R$ ,  $x$  — координата сечения относительно среднего сечения (см. рис. 1);  $B = \rho_a R^3 / \rho_0 r_0^3$ ;  $\rho_a$  и  $\rho_0$  — плотности воздуха и ВВ;  $r_0$  — радиус заряда ВВ. В процессе расширения оболочка забирает часть энергии взрыва, практически только на окружную деформацию, так как меридиональные деформации в 2–6 раз меньше окружных. Иными словами, динамическая реакция оболочки характеризуется как бы независимыми радиальными колебаниями ее кольцевых элементов с одинаковой частотой, но с разными амплитудами [4, 5]. Таким образом, состояние оболочки можно считать близким к плоской деформации с сильной

Таблица 1

Исходные данные и результаты опытов со стеклопластиковыми оболочками

Источник	R, м	h <sub>сп</sub> , м	ρ <sub>сп</sub> , кг/м <sup>3</sup>	E <sub>сп</sub> , МПа	ξ <sub>сп</sub> , %	ε <sub>0</sub> , 1/с	ε <sub>max</sub> , %			Начало разрушения
							опыт	расчет	относительная погрешность, %	
[3]	0,1	0,016	1900	23 500	0,432	155	0,7	0,7	0	Нет
	0,1	0,016	1900	23 500	0,811	241	1,0	1,3	30,0	»
	0,1	0,016	1900	23 500	0,811	302	1,2	1,3	8,3	»
	0,1	0,016	1900	23 500	1,427	448	2,1	2,3	9,5	»
	0,1	0,016	1900	23 500	1,754	560	2,5	2,8	12,0	Есть
	0,1	0,016	1900	23 500	2,186	604	2,8	3,5	25,0	»
	0,1	0,016	1900	23 500	2,657	733	3,8	4,3	13,2	»
	0,1	0,016	1900	23 500	3,194	948	3,9	5,1	30,8	»
[4]	0,1	0,016	1900	23 500	0,811	—	1,0	1,3	30,0	Нет
	0,1	0,016	1900	23 500	0,811	—	1,1	1,3	18,2	»
	0,1	0,016	1900	23 500	1,427	—	2,0	2,3	15,0	»
	0,1	0,016	1900	23 500	1,754	—	2,5	2,8	12,0	Есть
	0,1	0,016	1900	23 500	2,657	—	3,7	4,3	16,2	»
	0,1	0,016	1900	23 500	3,194	—	3,9	5,1	30,8	»
	0,1	0,005	1900	23 500	0,419	—	1,0	0,8	20,0	Нет
	0,1	0,005	1900	23 500	0,628	—	1,7	1,2	29,4	Есть
	0,1	0,005	1900	23 500	1,047	—	2,5	1,8	28,0	»
	0,1	0,005	1900	23 500	1,215	—	2,5	2,1	16,0	»
0,1	0,005	1900	23 500	1,550	—	3,3	2,6	21,2	»	
[5]	0,075	0,0045	1865	25 000	0,464	239	1,0	0,8	20,0	Нет
	0,075	0,0045	1573	25 000	0,670	402	1,3	1,1	15,4	»
	0,075	0,0045	1544	25 000	0,865	478	1,6	1,4	12,5	Есть
	0,075	0,0045	1806	25 000	1,010	528	2,0	1,7	15,0	»
	0,7	0,042	1828	25 000	0,556	—	1,0	1,0	0	Нет
	0,7	0,042	1824	25 000	0,834	—	1,4	1,4	0	Есть
[7]	0,1	0,0025	1761	43 250	0,452	244	0,7	0,7	0	Нет
	0,1	0,0025	1762	43 250	0,750	439	1,3	1,1	15,4	»
	0,1	0,0025	1883	43 250	0,845	459	1,4	1,2	14,3	Есть
	0,1	0,005	1874	43 250	1,083	410	1,3	1,4	7,7	Нет
	0,1	0,005	1833	43 250	1,276	438	1,6	1,6	0	Есть
	0,1	0,005	1830	43 250	1,426	476	1,8	1,8	0	»
	0,1	0,01	1880	43 250	0,326	155	0,4	0,4	0	Нет
	0,1	0,01	1945	43 250	1,626	591	1,7	2,0	17,6	Есть
	0,1	0,01	1843	43 250	1,779	600	1,8	2,1	16,7	»
	0,1	0,015	1955	43 250	0,453	191	0,5	0,6	20,0	Нет
	0,1	0,015	1895	43 250	1,503	391	1,5	1,8	20,0	»
	0,1	0,015	1942	43 250	1,690	443	1,7	2,0	17,6	Есть
	0,1	0,02	1932	43 250	0,381	142	0,4	0,5	25,0	Нет
	0,1	0,02	1923	43 250	1,751	525	1,8	2,1	16,7	Есть
0,1	0,02	1910	43 250	2,124	675	1,9	2,5	31,6	»	
[8]	0,155	0,017	1960	33 800	0,666	118	0,8	1,0	25,0	Нет
	0,155	0,017	1960	33 800	2,137	420	3,0	2,9	3,3	»
	0,155	0,016	1950	37 100	0,711	171	1,0	1,0	0	Нет
	0,155	0,016	1950	37 100	1,773	272	2,0	2,3	15,0	»
	0,155	0,015	1880	37 900	0,787	165	1,0	1,0	0	Нет
	0,155	0,016	1880	37 900	1,569	306	1,9	2,0	5,3	Есть

Таблица 2

## Исходные данные и результаты опытов с металлопластиковыми оболочками

Источник (металл)	R, м	h <sub>м</sub> , м	h <sub>сп</sub> , м	ρ <sub>сп</sub> , кг/м <sup>3</sup>	E <sub>сп</sub> , МПа	ξ <sub>сп</sub> , %	ε <sub>0</sub> , 1/с	ε <sub>тах</sub> , %			Начало разру- шения	
								опыт	рас- чет	погреш- ность*		
[6] (сталь 20)	0,10	0,001	0,016	1849,986	23 500	0,837	290	1,0	1,3	30,0	Нет	
	0,10	0,001	0,016	1858,7	23 500	1,434	416	2,0	2,3	15,0	»	
	0,10	0,001	0,016	1860,4	23 500	1,778	852	2,9	2,8	3,4	Есть	
	0,10	0,002	0,016	1841,6	23 500	0,837	237	1,1	1,1	0	Нет	
	0,10	0,002	0,016	1837	23 500	1,435	439	1,6	1,9	18,8	»	
	0,10	0,002	0,016	1874,5	23 500	2,653	760	3,2	3,8	18,8	Есть	
	0,10	0,0044	0,016	1859,6	23 500	0,802	190	0,6	0,6	0	Нет	
	0,10	0,0044	0,016	1871,7	23 500	1,448	343	1,3	1,4	7,7	»	
	0,10	0,0044	0,016	1925,9	23 500	2,621	482	2,4	2,9	20,8	»	
	0,10	0,0044	0,016	1758,1	23 500	4,173	761	3,8	4,5	18,4	Есть	
	0,10	0,001	0,007	2053,2	23 500	1,716	350	1,9	2,5	31,6	Нет	
	0,10	0,001	0,007	2046	23 500	2,834	560	3,0	4,2	40,0	»	
	Публи- куется впервые (сталь 20)	0,15	0,002	0,0085	2047	40 000	1,374	265	1,6	1,3	18,8	Нет
		0,15	0,002	0,009	1925	40 000	2,832	389	2,4	2,7	12,5	»
0,15		0,002	0,009	1945	40 000	2,786	414	2,8	2,8	0	»	
0,15		0,002	0,009	1933	40 000	3,020	510	3,2	2,9	9,4	»	
0,15		0,002	0,0089	2019	40 000	3,020	617	3,6	3,1	13,9	»	
0,15		0,002	0,0085	2047	40 000	3,107	505	3,5	3,2	8,6	»	
0,15		0,002	0,0089	1940	40 000	3,411	555	3,9	3,5	10,3	Есть	
0,25		0,003	0,0133	2000	40 000	2,439	—	2,6	2,4	7,7	Нет	
0,25		0,003	0,0142	2000	40 000	2,928	—	3,5	3,0	14,3	Есть	
0,25		0,003	0,0167	2000	40 000	2,217	—	2,6	2,4	7,7	Нет	
0,25		0,003	0,0171	2000	40 000	2,191	—	2,4	2,4	0	»	
Публи- куется впервые (титановый сплав ПТ-3В)	0,15	0,002	0,0079	2023	40 000	1,498	373	1,2	1,2	0	Нет	
	0,15	0,002	0,0079	2027	40 000	2,308	398	2,1	2,1	0	»	
	0,15	0,002	0,0079	2023	40 000	3,259	519	3,2	3,2	0	»	
	0,15	0,002	0,0082	2028	40 000	1,107	246	0,7	0,4	42,9	»	
	0,15	0,004	0,0085	2050	40 000	1,386	290	0,9	0,6	33,3	»	
	0,15	0,004	0,0085	2021	40 000	2,550	410	1,8	1,6	11,1	»	
	0,15	0,004	0,0085	2021	40 000	3,404	492	2,8	2,4	14,3	»	
	0,15	0,004	0,0085	2050	40 000	4,460	548	3,6	3,4	5,6	»	
	0,15	0,004	0,0085	2021	40 400	3,188	—	—	3,2	—	»	

Примечание. \* Относительная погрешность приведена в %.

окружной доминантой. Пользуясь этим обстоятельством, выделим в среднем поперечном сечении оболочки кольцевой элемент шириной  $dx$  (см. рис. 1). Площадь внутренней поверхности стеклопластикового слоя элемента —

$$dS = 2\pi R dx, \quad (4)$$

его масса —

$$dM_{\text{ст}} \approx \rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}} dS, \quad (5)$$

так как  $h_{\text{ст}}/R \ll 1$ . Масса металлопластикового элемента —

$$dM_{\text{мп}} \approx \rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}} \left(1 + \frac{\rho_{\text{м}} h_{\text{м}}}{\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) dS. \quad (6)$$

Поток удельного ударного импульса взрыва [12], действующего на элемент, —

$$i \sim \frac{m}{R^2} \sqrt{Q \left(1 + \frac{\rho_{\text{а}} R^3}{\rho_0 r_0^3}\right)}. \quad (7)$$

поэтому с учетом (1), (2), (4)–(7) кинетическая энергия стеклопластикового элемента равна

$$dU_{\text{ст}} \sim \frac{(i dS)^2}{2dM_{\text{ст}}} \sim \xi_{\text{ст}} \left(\xi_{\text{ст}} + \frac{\rho_{\text{а}} R}{6\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) Q \rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}} dS, \quad (8)$$

а металлопластикового —

$$dU_{\text{мп}} \sim \xi_{\text{ст}} \left(\xi_{\text{ст}} + \frac{\rho_{\text{а}} R}{6\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) \frac{Q \rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}{1 + \rho_{\text{м}} h_{\text{м}}/\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}} dS. \quad (9)$$

Работа внутренних усилий при расширении стеклопластикового элемента —

$$dW_{\text{ст}} = 0,5 E_{\text{ст}} \varepsilon_{\text{max}}^2 h_{\text{ст}} dS. \quad (10)$$

Что касается металлопластикового элемента, то при деформации более 0,3 % металлический слой переходит в пластическое состояние. Поскольку расширение элемента происходит при скорости деформации, спадающей от максимума до нуля, согласно [13] при малой пластической деформации окружное напряжение в стальном слое будет порядка динамического предела текучести:  $\sigma_s \approx 2\sigma_{0,2}$ . Предположим, что это справедливо и для титанового слоя. Поэтому работу деформации металлического слоя примем  $\approx 2\sigma_{0,2} \varepsilon_{\text{max}} h_{\text{м}} dS$ . Следовательно, с учетом стеклопластикового слоя работа деформации металлопластикового элемента составляет

$$dW_{\text{мп}} \sim 0,5 E_{\text{ст}} h_{\text{ст}} \varepsilon_{\text{max}} \left(\varepsilon_{\text{max}} + \frac{4\sigma_{0,2} h_{\text{м}}}{E_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) dS. \quad (11)$$

По закону сохранения энергии  $dW = dU$ , и с учетом (8), (10) при  $\rho_{\text{а}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$  и значениях  $\xi$ ,  $\varepsilon$ , выраженных в процентах, для стеклопластиковой оболочки получаем

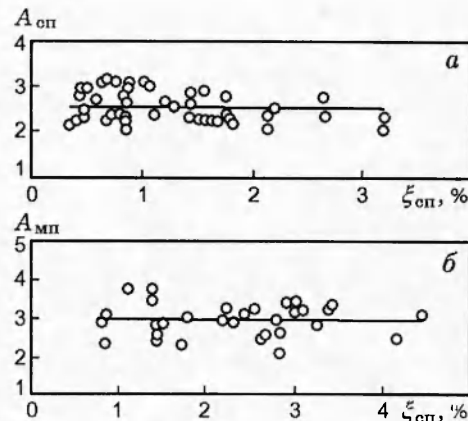


Рис. 2. Значения констант  $A_{\text{ст}}$  (а) и  $A_{\text{мп}}$  (б), вычисленные по экспериментальным данным: линией показано среднее значение константы

$$\frac{E_{\text{ст}} \varepsilon_{\text{max}}^2}{Q \rho_{\text{ст}} \xi_{\text{ст}} \left(\xi_{\text{ст}} + \frac{21,5R}{\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right)} \approx \text{const} = A_{\text{ст}}^2, \quad (12)$$

а для металлопластиковой с учетом (9) и (11) —

$$E_{\text{ст}} \left(1 + \frac{\rho_{\text{м}} h_{\text{м}}}{\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) \left(\varepsilon_{\text{max}} + \frac{400\sigma_{0,2} h_{\text{м}}}{E_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) \varepsilon_{\text{max}} / \left[Q \rho_{\text{ст}} \xi_{\text{ст}} \left(\xi_{\text{ст}} + \frac{21,5R}{\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right)\right] \approx \text{const} = A_{\text{мп}}^2. \quad (13)$$

Вычисления по исходным данным из табл. 1, 2 показывают, что константы (12) и (13) в пределах их разброса близки к средним величинам  $A_{\text{ст}} = 2,55$  и  $A_{\text{мп}} = 3$  (рис. 2). Таким образом, искомые полуэмпирические зависимости  $\varepsilon_{\text{max}}(\xi_{\text{ст}})$ , вытекающие из (12) или (13), для стеклопластиковой оболочки принимают вид

$$\varepsilon_{\text{max}} \approx A_{\text{ст}} \sqrt{\frac{Q \rho_{\text{ст}}}{E_{\text{ст}}} \left(\xi_{\text{ст}} + \frac{21,5R}{\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) \xi_{\text{ст}}}, \quad (14)$$

а для металлопластиковой —

$$\varepsilon_{\text{max}} \approx -\frac{200\sigma_{0,2} h_{\text{м}}}{E_{\text{ст}} h_{\text{ст}}} + \left(\left(\frac{200\sigma_{0,2} h_{\text{м}}}{E_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right)^2 + \frac{A_{\text{мп}}^2 Q \rho_{\text{ст}}}{E_{\text{ст}} (1 + \rho_{\text{м}} h_{\text{м}}/\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}})} \left(\xi_{\text{ст}} + \frac{21,5R}{\rho_{\text{ст}} h_{\text{ст}}}\right) \xi_{\text{ст}}\right)^{1/2}, \quad (15)$$

где размерности параметров те же, что в табл. 1, 2 и в тексте. Расчетные значения  $\varepsilon_{\text{max}}$  приведены в таблицах и, судя по погрешностям их определения, вполне удовлетворительно соответствуют эксперименту.

При испытаниях оболочки или в процессе ее эксплуатации может возникнуть необходимость решения обратной задачи: оценить массу ВВ, требуемую для достижения заданной деформации. В этом случае из формулы (12) получают зависимость  $\xi_{сп}(\varepsilon_{\max})$  для стеклопластиковой оболочки:

$$\xi_{сп} \approx -\frac{10,75R}{\rho_{сп}h_{сп}} + \sqrt{\left(\frac{10,75R}{\rho_{сп}h_{сп}}\right)^2 + \frac{E_{сп}}{A_{сп}^2 Q \rho_{сп}} \varepsilon_{\max}^2}, \quad (16)$$

а из формулы (13) — для металлопластиковой:

$$\xi_{сп} \approx -\frac{10,75R}{\rho_{сп}h_{сп}} + \left( \left(\frac{10,75R}{\rho_{сп}h_{сп}}\right)^2 + \frac{E_{сп}(1 + \rho_{м}h_{м}/\rho_{сп}h_{сп})}{A_{мп}^2 Q \rho_{сп}} \times \left( \varepsilon_{\max} + \frac{400\sigma_{0,2}h_{м}}{E_{сп}h_{сп}} \right) \varepsilon_{\max} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Затем находят искомую массу ВВ по формуле, вытекающей из (1):

$$m = \xi_{сп} M_{сп}. \quad (18)$$

Формулы (14)–(17) определяют параметры  $\varepsilon_{\max}$  и  $\xi_{сп}$  при однократном нагружении оболочек. При этом было бы полезно оценить взрывостойкость оболочки, т. е. установить насколько близки вычисленные  $\varepsilon_{\max}$  и  $\xi_{сп}$  к разрушающим. Однако, используя (14)–(17), нельзя прогнозировать разрушение, так как при получении формул (14)–(17) не учитывались критерии разрушения. В качестве такового можно рекомендовать, например, зависимость разрушающей деформации стеклопластика от скорости деформации, приведенную в [14]. С этой целью следует определить взаимосвязь  $\varepsilon_{\max}$  и  $\dot{\varepsilon}_0$ , которой мы пока не располагаем. Но такая возможность имеется.

Представим, что, в отличие от (8) и (9),  $dU \sim V_0^2 dM = (\dot{\varepsilon}_0 R)^2 dM$ . Тогда баланс  $dU$  и  $dW$  при использовании (5), (6), (10), (11) и экспериментальных данных из табл. 1, 2 приводит к полуэмпирическим зависимостям  $\dot{\varepsilon}_0(\varepsilon_{\max})$  для стеклопластиковых —

$$\dot{\varepsilon}_0 \approx 6,2 \frac{\varepsilon_{\max}}{R} \sqrt{\frac{E_{сп}}{\rho_{сп}}} \quad (19)$$

и металлопластиковых оболочек:

$$\dot{\varepsilon}_0 \approx \frac{6,7}{R} \sqrt{\frac{E_{сп}(\varepsilon_{\max} + 400\sigma_{0,2}h_{м}/E_{сп}h_{сп})\varepsilon_{\max}}{\rho_{сп}(1 + \rho_{м}h_{м}/\rho_{сп}h_{сп})}} \quad (20)$$

(методика получения этих зависимостей та же, что и зависимостей  $\varepsilon_{\max}(\xi_{сп})$ ). Подставив в (19) или (20) значения  $\varepsilon_{\max}$ , вычисленные по формулам (14) или (15), получаем значения  $\dot{\varepsilon}_0$  (относительная погрешность их определения не превышает 30%), при которых найденные значения  $\varepsilon_{\max}$  могут быть достигнуты. Наложив результат на вышеупомянутую зависимость [14], можно оценить несущую способность не только стеклопластиковой оболочки, но и металлопластиковой (при исследованных соотношениях  $h_{м}/h_{сп}$ ), поскольку для них зависимости  $\dot{\varepsilon}_0(\varepsilon_{\max})$  (в пределах экспериментального разброса) представляются достаточно близкими. Последнее можно объяснить относительно малой энергоемкостью металлического слоя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Динамическая прочность оболочек из ориентированных волокнистых композитов при взрывном нагружении (обзор) // ПМТФ. 1993. № 1. С. 126–133.
2. Рыжанский В. А., Минеев В. Н., Иванов А. Г. и др. Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров. 1978. № 2. С. 283–289.
3. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Шитов А. Т., Иванов А. Г. Деформация и разрушение цилиндрических оболочек из стеклоэпоксида при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1981. № 2. С. 249–255.
4. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1983. № 1. С. 90–94.
5. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушения разномасштабных цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1986. № 4. С. 658–664.
6. Цыпки В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушения двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1987. № 5. С. 833–838.
7. Федоренко А. Г., Иванов А. Г., Сырунин М. А. Динамическая прочность оболочек

- из стеклопластика // Механика композит. материалов. 1989. № 3. С. 425–430.
8. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Шитов А. Т. Прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика различной структуры при нагружении взрывом // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 108–115.
  9. Иванов А. Г. Динамическое разрушение и масштабные эффекты // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 3. С. 116–131.
  10. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г. Динамическая прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика при многократном взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 101–107.
  11. Ivanov A. G., et al. Transportable localising container for explosive cargoes // Symp. on Accident Resistant Containers and Transportation Safety. Albuquerque, NM, October 26–November 2, 1993.
  12. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Чельшев, Б. И. Шихтер. 2-е изд. М.: Наука, 1975. С. 403–404.
  13. Иванов А. Г., Кашаев Ю. Г., Коршунов А. И. и др. Влияние предыстории нагружения на механические свойства стали при одноосном нагружении // ПМТФ. 1982. № 6. С. 98–102.
  14. Асеев А. В., Горшков Н. Н., Демешкин А. Г. и др. Экспериментальное исследование деформативности стекло- и органопластика в зависимости от скорости деформирования // Механика композит. материалов. 1992. № 2. С. 188–195.

*Поступила в редакцию 22/VIII 1997 г.,  
в окончательном варианте — 3/III 1998 г.*