

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МАССЫ ОБОЛОЧЕК ВЗРЫВНЫХ КАМЕР

© 2011 Ю.В. Скорняков, Ю.П. Мещеряков

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 05.11.2011

Изучен вопрос оптимизации массы оболочки взрывной камеры. В работе рассматривались два расчетных случая – идеальная сферическая и цилиндрическая оболочки с постоянными толщинами стенок. Получены аналитические зависимости, позволяющие связать параметры заряда взрывчатого вещества (ВВ) с необходимыми прочностными свойствами материала оболочки и её геометрическими размерами. При некоторых допущениях определены максимальные и минимальные теоретически возможные значения массы оболочки для указанных случаев. Впервые получена аналитическая зависимость радиуса оболочки от радиуса заряда ВВ, которая позволяет на начальных этапах проектирования производить оценку необходимой по условию прочности геометрии камеры и определить её оптимальную массу.

Ключевые слова: взрывные камеры, сферическая оболочка, цилиндрическая оболочка, оптимальная масса

Металлические взрывные камеры являются уникальным оборудованием, позволяющим локализовать энергию взрывчатого вещества в замкнутом пространстве и использовать её в различных целях, в том числе технологических. Их использование позволяет нейтрализовать практически все виды воздействия взрыва на человека и окружающую среду – ударную волну, сейсмическое воздействие, разлет осколков и продуктов детонации ВВ. Оптимизация массы и габаритов оболочек необходима для создания более эргономичных взрывных камер и расширения области их применения, что является важной актуальной задачей в настоящее время. В специализированной литературе имеются публикации по вопросам оптимизации оболочек, но в них, как правило, применяется анализ на основе метода конечных элементов и громоздких численных расчетов и потребность в создании простых и эффективных методик оценочного расчета оболочек взрывных камер на начальных этапах проектирования остается. Некоторые рекомендации по данному вопросу приведены в работе [1], но они также нуждаются в уточнении и дополнении. В данной работе выведены простые аналитические зависимости, с помощью которых можно решать задачи оптимизации массы и размеров оболочек взрывных камер непосредственно в процессе проектирования.

Постановка задачи. Рассмотрим два расчетных случая – сферическая и цилиндрическая оболочки, внутри которых расположен заряд

взрывчатого вещества. Схемы случаев и необходимые параметры приведены на рис. 1 и 2. Сферическая оболочка (рис. 1) имеет радиус R_C и толщину δ_C , в её центре расположен сферический заряд взрывчатого вещества произвольной массы M_C , которое имеет удельную теплоту взрыва Q_0 . Цилиндрическая обечайка бесконечной длины (рис. 2) имеет радиус $R_{Ц}$, толщину $\delta_{Ц}$ и высоту H , на её оси симметрии расположен заряд ВВ произвольной массы $M_{Ц}$ (выражается через $r_{0Ц}$ и H) который имеет удельную теплоту взрыва Q_0 . В расчетах будем считать $H=1$ м, т.е. будем рассматривать погонные величины.

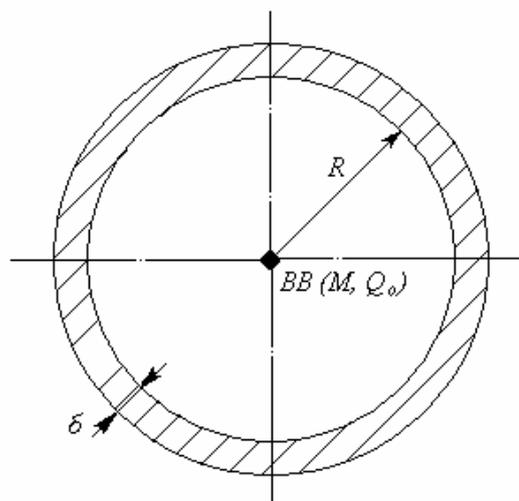


Рис. 1. Параметры сферической оболочки

Для обоих случаев определим оптимальную с точки зрения экономии массы толщину стенки оболочки при условии обеспечения заданной прочности по допускаемым напряжениям.

*Скорняков Юрий Викторович, аспирант. E-mail: scornia-
kov@mail.ru*

*Мещеряков Юрий Павлович, кандидат физико-
математических наук, ведущий научный сотрудник
группы численного моделирования. E-mail: ura@kti-
git.nsc.ru*

Будем считать, что в сферической оболочке реализуется двухосное напряженное состояние, напряжение σ_r примем равным нулю (оно действует вдоль радиуса). В цилиндрической оболочке напряженное состояние одноосное – напряжение σ_r и σ_z примем равными нулю. В ходе расчета величины в формулах для сферической оболочки будут содержать индексы «с», а для цилиндрической – «ц».

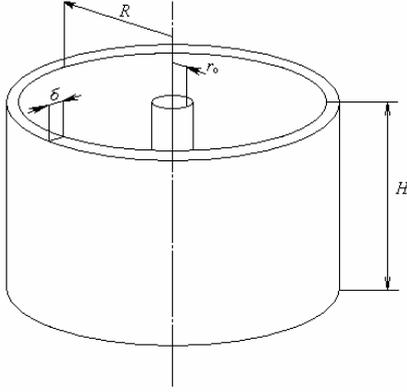


Рис. 2. Параметры цилиндрической оболочки

Аналитическое решение. Итак, согласно [1] имеем:

$$\sigma_{\varphi c} = \sigma_{\theta c} = \frac{2}{3\sqrt{1-\mu}} \cdot \frac{\rho_0 (r_{0c})^3 E \sqrt{Q_0}}{\rho \delta_c (R_c)^2 a_0}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi ц} = \frac{\rho_0 (r_{0ц})^2 \sqrt{2Q_0} E}{\rho \delta_{ц} \cdot R_{ц} a_0}$$

Здесь: ρ_0 и r_0 – соответственно плотность и радиус заряда ВВ. E – модуль упругости. ρ – плотность материала оболочки. a_0 – скорость звука в материале оболочки. Формулы (1) справедливы для тонкостенных оболочек ($R \geq 10\delta$). Масса заряда ВВ

$$M_c = \frac{4}{3} \pi \rho_0 (r_{0c})^3, \quad (2)$$

$$M_{ц} = \pi \rho_0 (r_{0ц})^3 H$$

H – высота цилиндрической оболочки (а также, соответственно, и высота заряда). Будем считать $H=1$ м, т.е. далее во всех формулах для цилиндра $M_{ц}$ будет являться величиной погонной массы заряда (размерность кг/м) и выражаться формулой $M_{ц} = \pi \rho_0 (r_{0ц})^2$. С учетом (2), формулы (1) примут вид

$$\sigma_{\varphi c} = \sigma_{\theta c} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\mu}} \cdot \frac{M_c E \sqrt{Q_0}}{\rho \delta_c (R_c)^2 a_0},$$

(3)

$$\sigma_{\varphi ц} = \frac{M_{ц} E \sqrt{2Q_0}}{\pi \rho \delta_{ц} \cdot R_{ц} a_0}$$

Эквивалентные напряжения

$$\sigma_{\text{экс}c} = \sqrt{(\sigma_{\varphi c})^2 + (\sigma_{\theta c})^2} - \sigma_{\varphi c} \sigma_{\theta c} = \sigma_{\varphi c}$$

$$\sigma_{\text{экс}ц} = \sigma_{\varphi ц}$$

Для обеспечения прочности оболочки, эквивалентные напряжения не должны превышать допустимых значений $\sigma_{\text{экс}} \leq [\sigma]$. За допустимые значения примем предел упругости при циклическом нагружении ($N > 10^6$ циклов). В результате получим следующие зависимости

$$[\sigma] = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\mu}} \cdot \frac{M_c E \sqrt{Q_0}}{\rho \delta_c (R_c)^2 a_0}, \quad (4)$$

$$[\sigma] = \frac{M_{ц} E \sqrt{2Q_0}}{\pi \rho \delta_{ц} \cdot R_{ц} a_0}$$

Введем некоторые коэффициенты $K1$ (сферическая оболочка) и $K2$ (цилиндрическая оболочка)

$$K1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\mu}} \cdot \frac{M_c E \sqrt{Q_0}}{\rho a_0 [\sigma]},$$

$$K2 = \frac{M_{ц} E \sqrt{2Q_0}}{\pi \rho \cdot a_0 [\sigma]},$$

которые определяют физические свойства материала оболочки, а также свойства и параметры заряда ВВ. Формулы (4) примут следующий вид

$$\delta_c = \frac{K1}{(R_c)^2}, \quad (5)$$

$$\delta_{ц} = \frac{K2}{R_{ц}}$$

Формулы (5) определяют необходимую толщину стенки, обеспечивающую заданную прочность в зависимости от радиуса оболочки. Выразим массу сферической и цилиндрической оболочки через известные размеры

$$m_c = \frac{4}{3} \pi \rho [(R_c + \delta_c)^3 - (R_c)^3], \quad (6)$$

$$m_{ц} = \pi \rho \cdot H [(R_{ц} + \delta_{ц})^2 - (R_{ц})^2]$$

Высоту H также примем равной единице. Тогда $m_{ц}$ – погонная масса цилиндрической обечайки с

размерностью кг/м, $m_{ц} = \pi\rho \cdot [(R_{ц} + \delta_{ц})^2 - R_{ц}^2]$. Подставив в формулу (6) зависимость (5), получим

$$m_c = \frac{4}{3} \pi\rho \left[\left(R_c + \frac{K1}{(R_c)^2} \right)^3 - (R_c)^3 \right],$$

$$m_{ц} = \pi\rho \cdot \left[\left(R_{ц} + \frac{K2}{R_{ц}} \right)^2 - (R_{ц})^2 \right].$$

(7)

Формулы (7) определяют необходимые для обеспечения заданной прочности массы оболочек при заданных радиусах и массах зарядов. Аналогичную зависимость вида $m = m(\delta)$ можно получить, выразив из (5) $R=R(\delta)$ и подставив в (6). Получим следующие выражения

$$m_c = \frac{4}{3} \pi\rho \left[\left(\sqrt{\frac{K1}{\delta_c}} + \delta_c \right)^3 - \left(\sqrt{\frac{K1}{\delta_c}} \right)^3 \right],$$

$$m_{ц} = \pi\rho \cdot \left[\left(\frac{K2}{\delta_{ц}} + \delta_{ц} \right)^2 - \left(\frac{K2}{\delta_{ц}} \right)^2 \right].$$

(8)

Формулы (8) определяют необходимые для обеспечения заданной прочности массы оболочек при заданных толщинах и массах зарядов.

Таблица 1. Механические и физические характеристики материалов оболочки камеры

Название	Символ	Величина
коэффициент Пуассона	μ	0,3
плотность	ρ	7800 кг/м ³
скорость звука в металле оболочки	a_0	5000 м/с
модуль упругости	E	$2,1 \cdot 10^{11}$ Па

Анализ и выводы. Определим диапазон значений коэффициентов $K1$ и $K2$.

$$K1 = f(\mu, \rho, a_0, [\sigma], E, M, Q_0),$$

$$K2 = f(\mu, \rho, a_0, [\sigma], E, M, Q_0).$$

Взрывные камеры изготавливаются из хорошо свариваемых, малоуглеродистых конструкционных сталей, а также нержавеющей сталей.

Величины, приведенные в таблице 1, меняются незначительно и могут считаться константами для всех марок сталей, используемых в производстве ВК. Принимая во внимание, что энергия высвобождающаяся при взрыве зарядов различных ВВ, определяется их тротильным эквивалентом, в дальнейшем без ограничения общности можно считать удельную теплоту взрывчатого материала постоянной величиной равной $Q_0=4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг, что соответствует

взрывчатому веществу тротилу. С учетом вышесказанного, получим

$$K1 = 2,099 \cdot 10^6 \cdot \frac{M}{[\sigma]}$$

$$K2 = 4,967 \cdot 10^6 \cdot \frac{M}{[\sigma]}$$

(9)

Анализ формул (9) показывает, что зависимости $K1(M)$ и $K2(M)$ при постоянном значении $[\sigma]$ линейны. Зависимости $K1([\sigma])$ и $K2([\sigma])$ при постоянном M – обратно пропорциональны.

Рассмотрим более детально зависимости $m(M)$ и $m([\sigma])$. Примем величину допускаемых напряжений постоянной и равной $[\sigma]=235$ МПа (соответствует стали 09Г2С широко применяемой в производстве ВК). Теперь для различных значений массы заряда M определим коэффициенты $K1$ и $K2$ (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициентов $K1$ и $K2$ для различных по массе M зарядов ВВ

M , Масса заряда ВВ, кг	$K1$	$K2$
0,1	0,0007	0,0021
0,25	0,0019	0,0053
0,5	0,0037	0,0106
1	0,0075	0,0211
2	0,0150	0,0423

Подставив полученные значения в выражение (7), получим следующие графические зависимости для сферической оболочек (рис. 3). Графики функций $m(R)$ для цилиндрической оболочки будут подобными изображенным на рис. 3. и в данной работе не приводятся.

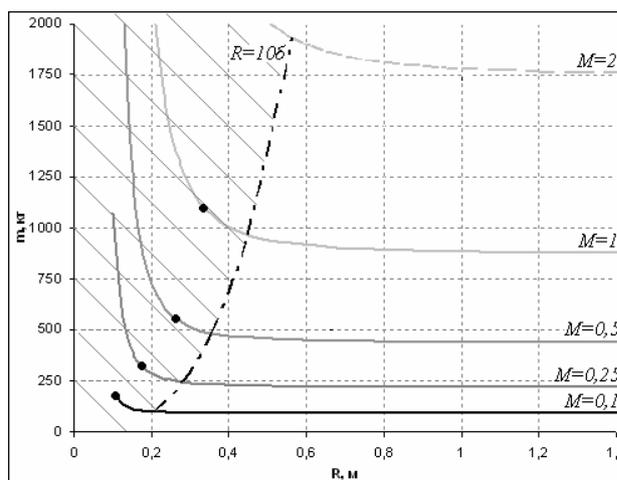


Рис. 3. Зависимость массы m сферической оболочки от радиуса R при разных значениях массы M (в кг) заряда ВВ

Выводы (они правомерны и для сферической и для цилиндрической оболочек):

1. Для заданной массы заряда, геометрии оболочки и свойств материалов, из которых она сделана, существует минимально возможная по условию прочности масса отличная от нуля. Она достигается при $R \rightarrow \infty$ ($\delta \rightarrow 0$)

$$\begin{aligned} m_{\min C} &= \lim_{R \rightarrow \infty} m_C(R) = 4\pi\rho \cdot K1 \\ m_{\min \Pi} &= \lim_{R \rightarrow \infty} m_{\Pi}(R) = 2\pi\rho \cdot K2 \end{aligned} \quad (10)$$

2. Линия $R=10\delta$ соответствует границе применимости формулы (1). В заштрихованной области оболочку следует считать толстостенной и вводить соответствующие поправки в расчетные формулы. Кроме того, в оболочке с геометрическими параметрами, лежащими вне области допустимых значений, возможно появление локальных пластических напряжений.

3. В обратном случае при $R \rightarrow 0$ и $\delta \rightarrow \infty$ масса будет возрастать. Теоретическим пределом, ограничивающим сверху величину массы оболочки, будет случай $R=r_0$. Т.е. заряд охватывается снаружи оболочкой, без зазора

$$m_{\max} = m(r_0)$$

4. Очевидно, что при увеличении массы M заряда ВВ возрастает масса оболочки m . Как видно по рисунку, это отражается в смещении графика функции $m(R)$ вверх и вправо при возрастании M .

5. При увеличении значения допустимого напряжения, график функции $m(R)$ смещается вниз и влево. Подробнее об этом будет сказано в дальнейшем.

6. В [1] приведена оценка для массы оболочки в зависимости от массы заряда ВВ, из которой было определено, что на 1 кг массы заряда должно приходиться 1000 кг металла оболочки. Это утверждение может быть уточнено. Во-первых, изменение размера оболочки приводит к изменению величины отношения m/M , что видно из графиков (рис. 3). Во-вторых, как уже отмечалось ранее, для каждого коэффициента $K1$ и $K2$ существует определенная минимальная масса m_{\min} . Отношение m_{\min}/M есть величина постоянная и её можно использовать для первичной оценки массы оболочки проектируемой камеры. Но для фиксированной величины радиуса R_1 отношение $m(R_1)/M$ будет меняться при изменении M .

7. Черным точкам на графиках функции соответствуют значения $\frac{d}{dR}m(R)=1$. В них скорость изменения массы совпадает со скоростью изменения размера оболочки. Левее, варьирование размера оболочки приводит к более резкому изменению её массы. Правее же, наоборот – масса меняется медленней, чем размер оболочки. Фактически этим точкам соответствует величина теоретического оптимума. Так как теоретически оптимальные соотношения не лежат в области

применимости исходных расчетных формул, следует считать, что оптимальными являются точки $R=10\delta$, как наиболее близкие к теоретическим.

Для получения более удобных критериев оптимальности оболочек, выразим отношения масс оболочек к их минимальным возможным значениям в зависимости от соотношения R к r_0 . С этой целью построим графики зависимости $m(R)$ в следующей системе координат. По оси абсцисс отложим величины, кратные r_0 (т.е. R будет выражен через радиус заряда ВВ – r_0). Значениям на оси ординат будут соответствовать величины относительной массы вида

$$\begin{aligned} m_{\text{отн}C}(r_{0C}) &= \frac{m_C(r_{0C})}{m_{\min C}(r_{0C})}, \\ m_{\text{отн}\Pi}(r_{0\Pi}) &= \frac{m_{\Pi}(r_{0\Pi})}{m_{\min \Pi}(r_{0\Pi})}. \end{aligned}$$

Здесь r_0 – радиус заряда ВВ, определяемый по формулам

$$\begin{aligned} r_{0C} &= \sqrt[3]{\frac{3M_C}{4\pi\rho_0}}, \\ r_{0\Pi} &= \sqrt{\frac{M_{\Pi}}{\pi\rho_0}}. \end{aligned}$$

Тогда графики, изображенные на рис. 3, примут следующий вид – рис. 4, линия 2. Соответствующие графики функций для цилиндрической оболочки показаны на рис. 5.

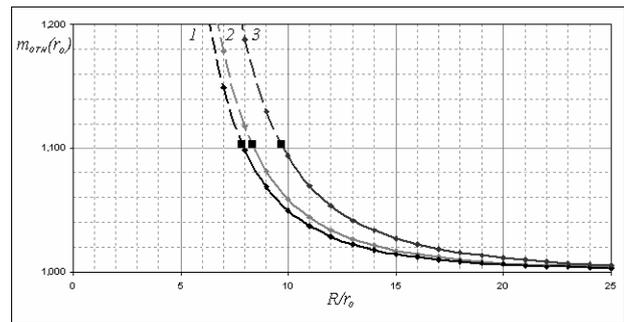


Рис. 4. Зависимость относительной массы сферической оболочки от её относительного радиуса:

1 – $[\sigma]=279$ МПа, 2 – $[\sigma]=235$ МПа, 3 – $[\sigma]=150$ МПа

Выводы:

1. Для указанных расчетных случаев ($M=0,1-2$ кг, $[\sigma]=235$ МПа), все пять графиков функций $m(R)$ (рис. 3.) одинаковы в этих осях координат и соответствуют кривой 2 (рис. 4). Можно полагать, что получена универсальная графическая функция, связывающая массу оболочки с её размерами, которую можно применять для любых значений

массы заряда ВВ. Это утверждение также справедливо для цилиндрической оболочки (рис. 5).

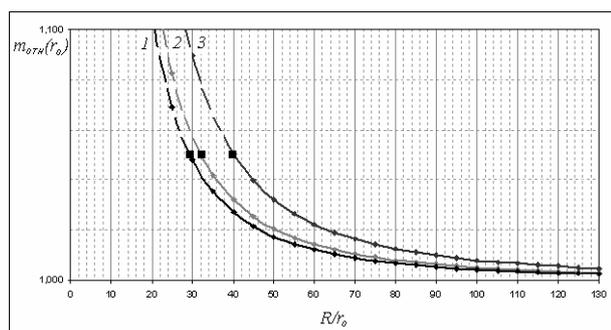


Рис. 5. Зависимость относительной массы цилиндрической оболочки от её относительного радиуса:

1 – $[\sigma]=279$ МПа, 2 – $[\sigma]=235$ МПа, 3 – $[\sigma]=150$ МПа

2. Квадратными маркерами на графиках обозначены границы применимости формул (1), выше их (графики показаны штриховыми линиями) оболочки нужно считать толстостенными и вносить соответствующие поправки в расчет.

3. Случаю теоретического оптимума соответствует величина равная примерно 1,1 для сферы. Это означает, что самая компактная оболочка (размером 8-10 r_0) будет тяжелее самой легкой теоретически возможной (с массой m_{min}) лишь примерно на 10%. Это справедливо для любой массы заряда ВВ. В случае цилиндрической оболочки теоретический оптимум составит примерно 1,05 и максимальная разница при указанных условиях составит примерно 5%.

4. При увеличении значения допустимого напряжения общая масса оболочки уменьшается.

По графикам также видно, что использование более высококачественных марок сталей позволяет получать более оптимальные оболочки с массой, более близкой к минимальной (при заданном радиусе оболочки). Это позволяет получить двойной выигрыш при использовании качественных сталей.

5. Для величин $R > 15r_0$ масса сферической оболочки меняется незначительно (не более чем на 1% при дальнейшем увеличении размеров). Следовательно, при проектировании сферических оболочек ВК целесообразно придерживаться величин 8-10 $r_0 < R < 15r_0$, так как этим значениям соответствуют более компактные и оптимальные по массе сферические оболочки. В случае цилиндрических оболочек для величин $R > 60-70r_0$ масса оболочки меняется незначительно (не более чем на 1% при дальнейшем увеличении размеров).

Следовательно, при проектировании цилиндрических оболочек ВК целесообразно придерживаться величин 30-40 $r_0 < R < 60-70r_0$, так как этим значениям соответствуют более компактные и оптимальные по массе цилиндрические оболочки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Думчук, А.Ф. Металлические взрывные камеры: монография / А.Ф. Демчук, В.П. Исаков. – Красноярск: РИО КрасГУ, 2006. 297 с.
2. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1970. 544 с.
3. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1979. 744 с.

DEFINITION OF MASS OPTIMIZATION OF BLASTING CHAMBER SHELLS

© 2011 Yu.V. Skornyakov, Yu.P. Meshcheryakov

Design and Technological Branch of Institute of Hydrodynamics
named after M.A. Lavrentyev SB RAS, Novosibirsk

Has arrived in edition 05.11.2011

The question of mass optimization of blasting chamber shell is studied. Two settlement cases – ideal spherical and cylindrical shells with constant thickness of walls were in-process observed. The analytical dependences are gained, allowing to connect explosive charge (EC) parameters with necessary of strength properties of shell material and its geometrical sizes. At some assumptions the maximum and minimum theoretically possible mass values of a shell for the specified cases are defined. For the first time analytical dependence of shell radius on EC radius which allows to make an estimation of chamber geometry concerning strength conditions at the designing initial stages and to define its optimum mass is gained.

Key words: *blasting chambers, spherical shell, cylindrical shell, optimum mass*

Yuriy Skornyakov, Post-graduate Student. E-mail: scorniyakov@mail.ru
Yuriy Meshcheryakov, Candidate of Physics and Mathematics, Leading
Research Fellow at the Numeric Modeling Group. E-mail: ura@kti-git.nsc.ru