

УДК 539.319 + 534.134

ВЗРЫВНЫЕ КАМЕРЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ

Ю. П. Мещеряков*, А. А. Штерцер*,**, Б. С. Злобин*

* Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

** Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: director@sibexplo.com, asterzer@mail.ru, zlobin.boris@mail.ru

Исследованы металлические экраны различной толщины, изготовленные из сталей различных марок и применяемые для защиты оболочек взрывных камер от повреждений осколками и снижения нагрузок на элементы конструкции. Путем численного моделирования получены зависимости эквивалентных напряжений в защитных экранах и оболочках взрывных камер и конечного размера зазора между экраном и оболочкой от толщины стенок, марки стали и начального размера зазора. Приведены примеры конструкций взрывных камер с защитными экранами.

Ключевые слова: взрывная камера, металлический экран, численное моделирование, эквивалентные напряжения.

DOI: 10.15372/PMTF20190423

Введение. Первые металлические взрывные камеры (ВК) были созданы во второй половине XX в. [1, 2]. Подробные сведения об особенностях проектирования ВК, их эксплуатации и областях применения приведены, например, в работах [3, 4]. В настоящее время разработан ряд конструкций этих устройств для использования как в научных исследованиях, так и при промышленной обработке материалов взрывом. Например, камера ДВК-0.2, рассчитанная на подрыв заряда взрывчатого вещества (ВВ) массой до 200 г в тротиловом эквиваленте, применяется при исследовании быстропотекающих процессов с помощью синхротронного излучения [4], установка КВ-5, рассчитанная на подрыв заряда ВВ массой до 5 кг, спроектирована для изготовления сваркой взрывом биметаллических заготовок подшипников скольжения крупногабаритных дизельных двигателей [5], а камеры горизонтального типа КВГ-8, рассчитанные на подрыв заряда ВВ массой до 8 кг, начиная с 70-х гг. XX в. используются в технологии упрочнения взрывом сердечников крестовин железнодорожных стрелочных переводов [6].

В последнее время ВК применяются при утилизации изделий, содержащих ВВ, и в тех случаях, когда при взрыве зарядов ВВ могут разлетаться фрагменты изделий или экспериментальных сборок. Разработан ряд конструкций ВК с экранами для защиты корпуса от высокоскоростных осколков. Тензометрические измерения показывают, что наличие экранов оказывает существенное влияние на напряженное состояние корпуса ВК [7]. Это обуславливает необходимость выявления всех возможных режимов работы экранов, установления диапазонов толщины экранов и конечного размера зазора между экраном и



Рис. 1. Закрытая (а) и открытая (б) установка KB-5

оболочкой (корпусом) камеры, а также определения влияния экранов на ресурс оболочки при различных режимах работы.

В данной работе проведены численные исследования зависимостей конечного размера зазора и эквивалентных напряжений в защитных экранах и оболочках ВК от толщины стенок экрана и оболочки, марки стали и начального размера зазора между экраном и оболочкой.

1. Конструкции ВК с экранами. Обычно ВК состоит из цилиндрической и двух сферических или эллиптических частей, но иногда корпус небольших камер, рассчитанных на подрыв заряда ВВ массой до 200 г, имеет сферическую форму и состоит из двух полусфер. При взрыве заряда ВВ внутри замкнутой оболочки, представляющей собой корпус ВК, она совершает сложные колебания, сопровождающиеся не только ее расширением и сжатием, но и изменением формы. При этом наиболее нагруженным, как правило, является купол ВК, а максимальные напряжения, определяющие срок ее эксплуатации, наблюдаются в его центре [8–10].

Как отмечено выше, экран предназначен для защиты оболочки (корпуса) ВК от осколков, но его наличие приводит также к изменению напряженно-деформированного состояния оболочки при взрывном нагружении. На рис. 1 показана установка KB-5, внешний диаметр цилиндрической части корпуса которой равен 2320 мм, высота — 2200 мм. Толщина стенки корпуса составляет 60 мм, толщина несъемного экрана, защищающего корпус, — 45 мм. Камера рассчитана на подрыв заряда ВВ массой до 5 кг в тротиловом эквиваленте. Масса установки равна 40 т.

На рис. 2 приведены схемы корпуса установки KB-5 и крепления защитного экрана. В данной конструкции в соответствии с приведенной ниже классификацией экран является толстым и на него действует часть импульсной нагрузки, что обуславливает уменьшение напряжений в корпусе камеры.

На рис. 3 представлена схема установки KB-0.05, рассчитанной на подрыв заряда ВВ массой 50 г. Внешний диаметр цилиндрической части корпуса равен 724 мм, толщина стенки — 12 мм. В отличие от KB-5 экраны устанавливаются для защиты и цилиндрической части оболочки, и эллиптических днищ. Кроме того, применяется способ крепления

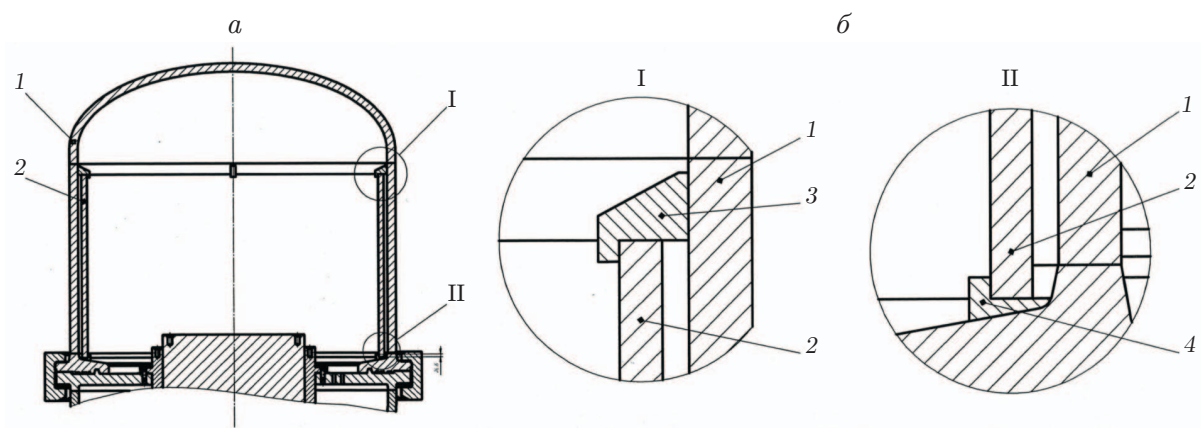


Рис. 2. Схема установки КВ-5 с толстым экраном:

a — сечение взрывной камеры, *б* — схемы крепления экрана (I — верхнее крепление, II — нижнее крепление); 1 — оболочка камеры, 2 — экран, 3, 4 — элементы верхнего и нижнего креплений

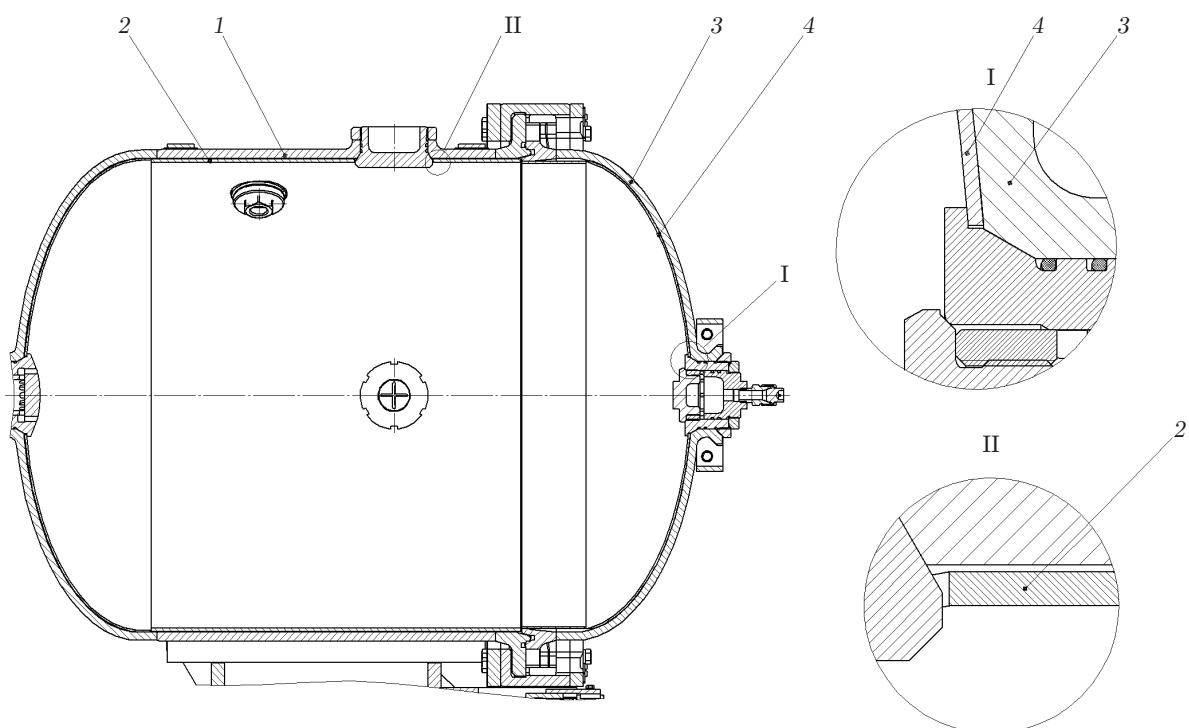


Рис. 3. Схема установки КВ-0.05 со съёмными экранами:

I — крепление эллиптической части оболочки, II — крепление цилиндрической части оболочки; 1 — цилиндрическая часть оболочки, 2 — защитный экран на цилиндрической части оболочки, 3 — эллиптическое днище, 4 — защитный экран на эллиптической части оболочки

экранов, который при необходимости допускает их замену. Цилиндрическую часть корпуса защищает экран толщиной 6 мм, эллиптические днища защищены экранами толщиной 3 мм. В защитном экране цилиндрической части оболочки камеры имеются отверстия, предназначенные для крепления клапанов, электровводов или окон для оптической регистрации взрывных процессов. Расположение и размеры этих отверстий совпадают с положением и размерами отверстий в оболочке.

Узел крепления указанных элементов выполнен таким образом, чтобы препятствовать сдвигу и вращению экрана относительно оболочки камеры (крепление II на рис. 3). Экран, предназначенный для защиты эллиптической части оболочки, закреплен в центральной части днища с помощью выпускного клапана (крепление I на рис. 3).

Наличие экранов усложняет расчеты, проводимые для определения напряженно-деформированного состояния, кроме того, существенно затруднено использование аналитических подходов, подобных предложенным в работе [3]. Даже в случае сферической оболочки с расположенным в центре зарядом ВВ могут возникать сложные колебания и, как показывают численные расчеты [11], возможен резонанс, когда напряжения на 50 % превышают значение, вычисленное по формулам в [3]. В отличие от ВК со сферической оболочкой распределение напряжений в ВК с составным корпусом весьма неоднородно. Например, в [9] путем тензометрических измерений показано, что деформации в полюсах полусферических днищ могут в три раза превышать деформации в середине цилиндрической части корпуса ВК. В работе [9] концентрация напряжений в полюсах вследствие наличия изгибных колебаний называется эффектом бича. Возбуждение изгибных колебаний возможно даже в сферических оболочках, если в них имеются конструктивные элементы (патрубки, крышки, сварные швы и т. д.). Измерения показывают, что в различных областях таких оболочек деформации могут различаться в $2,6 \div 2,8$ раза [10].

При исследовании влияния экрана на распределение напряжений в корпусе ВК в качестве модельной конструкции использовалась описанная выше установка КВ-5.

2. Численное моделирование. Численные расчеты выполнялись с помощью метода конечных элементов, модифицированного для решения уравнений линейной упругости [12], которые описывают нестационарное напряженно-деформированное состояние, обладающее осевой симметрией. Достижение предела упругости определялось условием текучести Мизеса. В расчетах варьировались толщина стенок экранов, марка стали и начальный размер зазора между экраном и корпусом камеры. Включение в алгоритм расчета искусственной диссипации энергии путем умножения вектора скорости на коэффициент $\omega < 1$ позволяло получить стационарное решение, необходимое для расчета конечного размера зазора. В расчетах, проводившихся для заряда ВВ массой 5 кг в тротиловом эквиваленте, принималось $\omega = 0,99$. Исследованы ВК с тонким и толстым экранами (рис. 4). Толстым экраном будем называть цилиндрическую оболочку, которая, как и оболочка ВК, под действием импульсной нагрузки испытывает только упругие деформации. Соответственно, тонким экраном (независимо от толщины) будем называть цилиндрическую оболочку, которая под действием импульсной нагрузки испытывает упругопластические деформации. При импульсном нагружении тонкий экран испытывает соударения со стенкой камеры, толстый деформируется, не задевая стенку.

Константы упругости задавались величинами, принятыми для сталей. Для оболочки ВК предел текучести равен $Y = 245$ МПа, что соответствует марке стали Ст. 20. Предел текучести стали, из которой изготовлен экран, варьировался в диапазоне $180 \div 245$ МПа. Толщина оболочки (корпуса) камеры составляла 60 мм, внутренний радиус — 1,1 м, высота — 3 м. Толщина экрана варьировалась в диапазоне $10 \div 55$ мм, высота экрана равна 0,75 м. Начальный размер зазора между экраном и оболочкой ВК задавался равным 10 мм. Расчет проводился с учетом осевой симметрии оболочки.

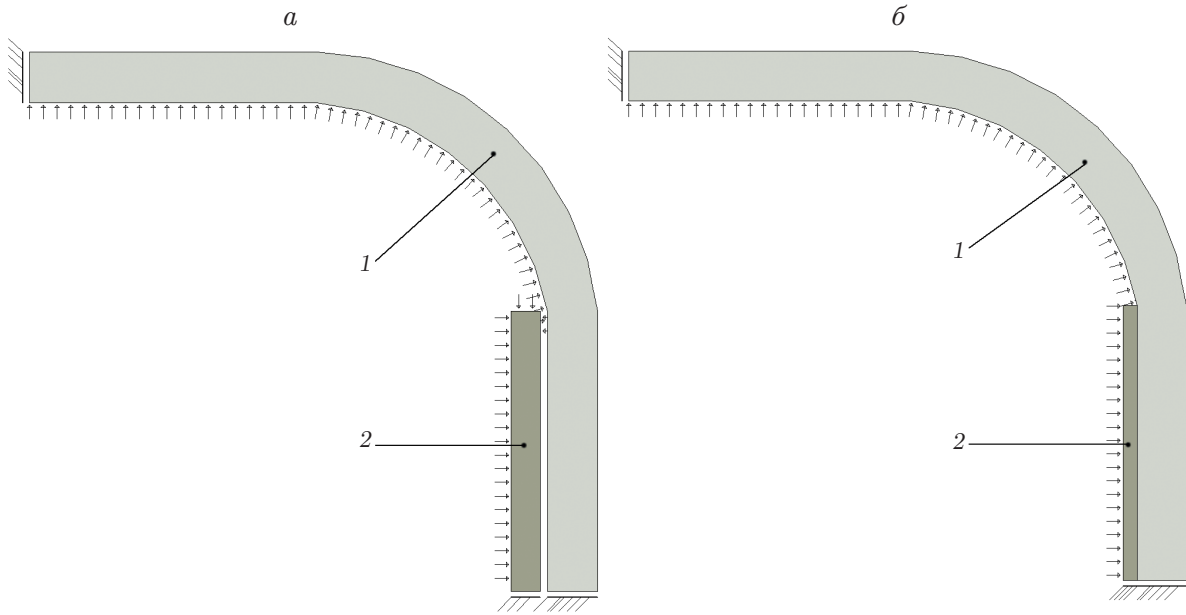


Рис. 4. Оболочки взрывной камеры с толстым (а) и тонким (б) экранами:
1 — оболочка; 2 — экран

В рамках теории линейной упругости нестационарное напряженно-деформированное состояние, обладающее осевой симметрией, описывается системой уравнений [13]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, & \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \sigma_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right), & \sigma_{rr} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, & \sigma_{\theta\theta} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{u}{r}, \end{aligned}$$

где ρ — плотность; σ_{zz} , σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rz} — компоненты тензора напряжений; u , w — компоненты вектора смещения $\mathbf{D}$; постоянные Ламе λ , μ связаны с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν соотношениями

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Достижение предела упругости определялось условием текучести Мизеса [14]:

$$K = 2J - 2Y^2/3, \quad 2J = S_{rr}^2 + S_{zz}^2 + S_{\theta\theta}^2 + 2\sigma_{rz}^2.$$

Здесь S_{rr} , S_{zz} , $S_{\theta\theta}$ — компоненты девиатора тензора напряжений. Достижение предела упругости соответствует значению $K = 0$. Упрочнение не учитывалось. Появление пластических деформаций определялось по знаку величины K . При $K > 0$ согласно [14] напряжения S_{rr} , S_{zz} , $S_{\theta\theta}$, σ_{rz} умножались на отношение $\sqrt{2/3}Y/\sqrt{2J}$. При упругих деформациях, которым соответствует значение $K < 0$, компоненты девиатора напряжений не нормировались.

3. Обсуждение результатов. На рис. 5–7 приведены результаты численных расчетов. На рис. 5 представлена зависимость величины $h_0 - h$ от толщины экрана H при $h_0 = 10$ мм (h_0 — начальный размер зазора между экраном и стенкой корпуса камеры;

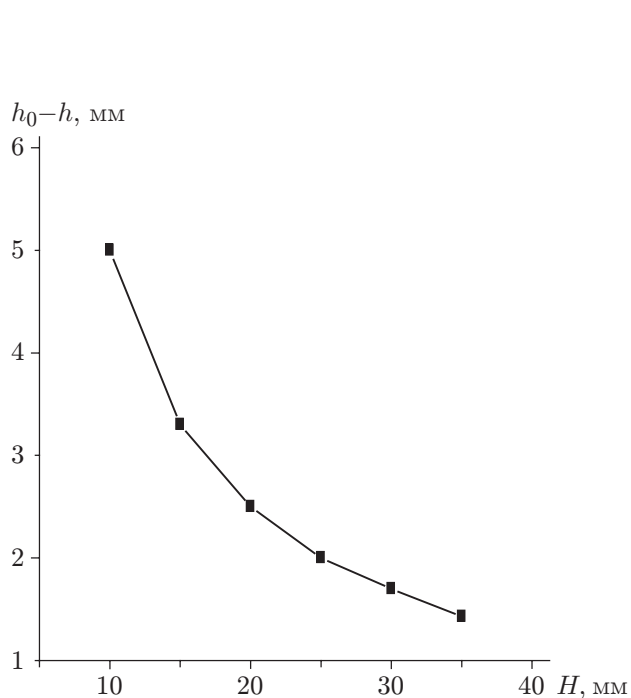


Рис. 5

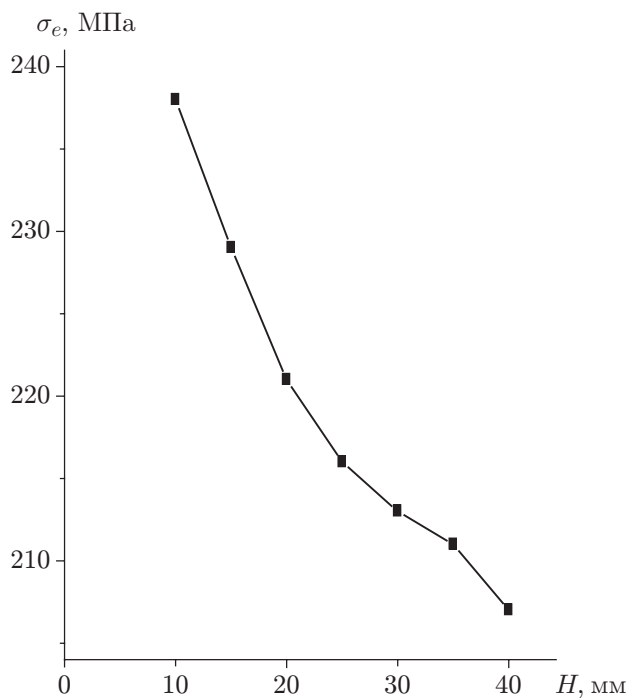


Рис. 6

Рис. 5. Зависимость изменения размера зазора от толщины экрана при начальном размере зазора $h_0 = 10$ мм

Рис. 6. Зависимость максимальных значений эквивалентных напряжений в полюсе ВК от толщины экрана

h — конечный размер зазора после подрыва заряда ВВ). Механические параметры материала оболочки и экрана принимались одинаковыми и соответствовали стали марки Ст. 20 с пределом текучести $Y = 245$ МПа. На рис. 5 максимальная толщина экрана, при которой возникают упругопластические деформации, равна 35 мм. При большей толщине цилиндрический экран испытывает только упругие деформации.

На рис. 6 приведена расчетная зависимость максимальных значений эквивалентных напряжений в полюсе оболочки ВК σ_e от толщины экрана. При толщине экрана 40 мм максимальное эквивалентное напряжение в центре купола КВ-5 равно 207 МПа, при этом экран испытывает только упругие деформации. Амплитуда колебаний экрана не превышает 1,5 мм, поэтому соударения экрана с оболочкой ВК не происходит. Использование толстого экрана позволяет уменьшить напряжения в оболочке ВК на 15 % по сравнению с тонкими пластически деформируемыми экранами, а начальный размер зазора для толстых экранов должен составлять не менее 2 мм, чтобы исключить возможность соударений экрана с корпусом ВК.

При интерпретации данных было введено понятие эквивалентной толщины экрана, которая определялась численно. Два экрана различной толщины, изготовленные из сталей с различными величинами предела текучести, считаются эквивалентными, если их переход в пластическое состояние происходит при одной и той же импульсной нагрузке. На рис. 7 представлена зависимость величины $h_0 - h$ от эквивалентной толщины экрана H_e при начальном размере зазора $h_0 = 10$ мм. В расчетах значение предела текучести материала экрана варьировалось в диапазоне $175 \div 225$ МПа.

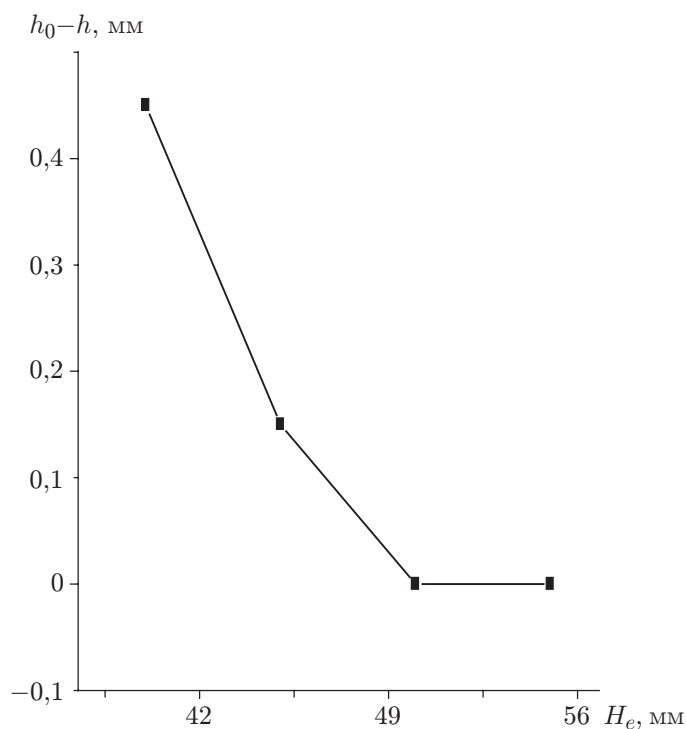


Рис. 7. Зависимость изменения размера зазора от эквивалентной толщины экрана

На основе результатов проведенного численного моделирования процессов деформации экрана и оболочки ВК можно провести классификацию режимов взаимодействия экранов с оболочкой ВК.

1. Бесконтактный режим деформирования, реализующийся в случае достаточно толстого экрана. В этом режиме экран деформируется упруго при достаточно большом (не менее 2 мм для КВ-5) начальном размере зазора между экраном и оболочкой (корпусом) ВК.

2. Режим многократных соударений экрана с корпусом ВК, который реализуется в том случае, если экран толстый, но зазор мал или если экран тонкий и изготовлен из стали той же марки, что и корпус камеры.

3. Контактный режим, реализующийся в случае, если экран тонкий и выполнен из более пластичного материала, чем материал корпуса. В этом режиме экран “прилипает” к корпусу и при последующих взрывных нагрузках деформируется вместе с ним.

Практический интерес представляют только режимы 1, 3, а режим 2, как правило, неприемлем, поскольку при его использовании могут значительно (на 15 %) увеличиваться напряжения в оболочке ВК.

Заключение. Рассмотрены конструкции взрывных камер с экранами для защиты корпуса от воздействия высокоскоростных фрагментов экспериментальных сборок или изделий, содержащих взрывчатое вещество. Путем численного моделирования проведен анализ деформирования экрана и оболочки при взрыве и выявлены три возможных режима взаимодействия экранов с оболочкой ВК:

- 1) бесконтактный режим;
- 2) режим многократных соударений экрана с корпусом ВК;
- 3) контактный режим.

Разработанный подход может быть использован при проектировании взрывных камер для защиты корпуса от воздействия высокоскоростных осколков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Baker W. E.** The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading // J. Appl. Mech. 1960. V. 27. P. 139–144.
2. **Демчук А. Ф.** Один метод расчета взрывных камер // ПМТФ. 1968. № 5. С. 47–50.
3. **Демчук А. Ф.** Металлические взрывные камеры / А. Ф. Демчук, В. П. Исаков. Красноярск: Издат. дом Краснояр. гос. ун-та, 2006.
4. **Shtertser A., Stoyanovskii O., Zlobin B., et al.** Designing and manufacturing of explosion chambers for scientific research and explosive working of materials // Arch. Metallurgy Materials. 2014. V. 59, iss. 4. P. 1619–1624. DOI: 10.2478/amm-2014-0275.
5. **Shtertser A., Zlobin B., Stoyanovskii O.** Metal explosion chambers and their application // Appl. Mech. Materials. 2015. V. 788. P. 306–312. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.306.
6. **Deribas A. A., Shtertser A. A., Zubkov E. E.** Explosive hardening and its application in production of railroad switch frogs // Adv. Materials Technol. 2018. N 3. P. 13–16. DOI: 10.17277/amt.2018.03.pp.013-016.
7. **Пикаревский А. А., Стояновский О. И.** Влияние экранирования части корпуса технологической взрывной камеры на его напряженное состояние // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 2. С. 196–202.
8. **Stoyanovskii O. I., Zlobin B. S., Shtertser A. A., Meshcheryakov Yu. P.** Metal explosion chambers: designing, manufacturing, application // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 894. 012091.
9. **Корнев В. М., Адищев В. В., Митрофанов А. Н., Грехов В. А.** Экспериментальное исследование и анализ колебаний оболочки взрывной камеры // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 155–157.
10. **Абакумов А. И., Егунов В. В., Иванов А. Г. и др.** Расчетно-экспериментальное исследование деформации оболочек взрывных камер // ПМТФ. 1984. № 3. С. 127–130.
11. **Ждан С. А.** Расчет динамической нагрузки, действующей на стенку взрывной камеры // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 2. С. 142–146.
12. **Мещеряков Ю. П.** Численное моделирование процесса резки облученных тепловыделяющих сборок // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 134–140.
13. **Тимошенко С. П.** Курс теории упругости. Киев: Наук. думка, 1972.
14. **Wilkins M. L.** Calculation of elastic-plastic flow // Methods in computational physics. V. 3. Fundamental methods in hydrodynamics. N. Y.; L.: Acad. Press, 1964.

*Поступила в редакцию 13/XI 2018 г.,
после доработки — 21/I 2019 г.
Принята к публикации 25/II 2019 г.*