

УДК 624.074.4:678.067

## **Взрывозащитные камеры для исследований гидродинамических процессов и взрывных технологий**

**М. А. Сырунин, В. А. Огородников**

*Одним из путей защиты окружающей среды от воздействия взрыва является его локализация в замкнутом объеме взрывозащитной камеры или контейнера. Во взрывозащитной камере проводятся: исследования свойств веществ при высоких давлениях и температурах, испытания взрывчатых веществ и боеприпасов, эвакуация и уничтожение террористических устройств, безопасная перевозка и хранение объектов, содержащих взрывчатые вещества, они также применяются во взрывных технологиях, например, при сварке взрывом, и ряде других областей техники, связанных со взрывными процессами.*

*В рамках научного направления, созданного в РФЯЦ-ВНИИЭФ, разработаны и реализованы взрывозащитные камеры различных типов, с рабочими объемами от  $\sim 10^{-3}$  до  $\sim 10$  м<sup>3</sup>, способные герметично локализовать продукты взрыва зарядов от единиц грамм до десятков килограмм тротилового эквивалента.*

*Представлены научно-технические подходы к проектированию конструкций взрывозащитных камер, основанные на экспериментальных методах и численном моделировании, приведены примеры разработанных камер, используемых для исследования ряда гидродинамических процессов.*

При проведении физических исследований гидродинамических процессов и разработке ряда интенсивных технологий в качестве нагружающих устройств, создающих высокие давления и температуры, широко применяются взрывчатые вещества (ВВ). Образующиеся при детонации ВВ ударная волна, газообразные продукты взрыва, а также высокоскоростные осколки от инертных элементов нагружающего устройства, распространяясь с высокой скоростью, воздействуют на окружающую среду как поражающие факторы взрыва. Одним из путей защиты окружающей среды от их воздействия является локализация взрыва в замкнутом объеме взрывозащитной камеры (ВЗК) или контейнера. ВЗК предназначены для исследования свойств материалов при высоких давлениях и температурах, испытания ВВ и боеприпасов, эвакуация и уничтожение террористических устройств, безопасная перевозка и хранение объектов, содержащих ВВ. Камеры также применяются во взрывных технологиях, например, при сварке взрывом, и ряде областей техники, где используется энергия взрыва. Объект, содержащий ВВ, помещается в такую ВЗК, и образующиеся продукты взрыва (газы, осколки, аэрозоли) локализуются в ее объеме. При этом ВЗК, выполняя свою защитную функцию, должна обеспечить регистрацию параметров динамических процессов исследуемого объекта с помощью различных измерительных преобразователей, а следовательно, иметь соответствующие герметичные входы (выходы) для передачи электрических

сигналов, пучков протонного, нейтронного, рентгеновского или оптического излучения. Особенно актуально использование ВЗК при обращении со взрывоопасными объектами, содержащими радиоактивные или токсичные вещества.

Общая конструктивная схема ВЗК показана на рис. 1. Она включает следующие основные элементы: силовой герметичный корпус 1 с днищами 2, загрузочную горловину 3, закрываемую крышкой 4, защиту: корпуса 5, днищ 6, крышки 7 и опоры 8. Взрывоопасный объект 9, по возможности, должен располагаться в геометрическом центре ВЗК, чтобы при его взрыве реализовалось осесимметричное нагружение конструкции. Несущая способность (взрывостойкость) ВЗК, т. е. способность локализовать в своем объеме энерговыделение и продукты взрыва заряда ВВ в единицах ТЭ, обеспечивается прочностью и герметичностью оболочки корпуса, днищ, крышек, вводов (окон) и других элементов. Взрывостойкость ВЗК определяется: материалом, формой и размерами ВЗК; формой (размерами) и массой заряда ВВ, нахождением точки инициирования детонации в заряде ВВ, окружением заряда ВВ (наличием корпуса, металлических вкладышей и т. п.) и его расположением в ВЗК. В зависимости от назначения и несущей способности ВЗК имеют различные габаритно-весовые характеристики.

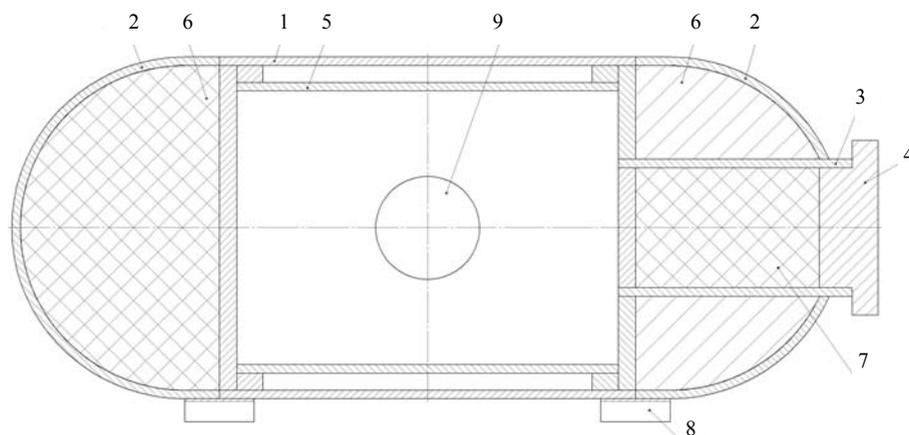


Рис 1. Общая схема ВЗК: 1 – силовой корпус; 2 – днище; 3 – загрузочная горловина; 4 – крышка; 5 – защита корпуса; 6 – защита днищ; 7 – защита крышки; 8 – опоры; 9 – взрывоопасный объект (заряд ВВ)

Некоторые типы конструкций ВЗК с рабочими объемами от  $10^{-3}$  до  $10^1$  м<sup>3</sup>, способные герметично локализовать продукты взрыва зарядов от единиц грамм до десятков килограмм ТЭ, показаны на рис. 2 [1–13], где  $L$  – длина ВЗК,  $\varnothing_n$  – наружный диаметр,  $\varnothing_o$  – диаметр загрузочного отверстия,  $M_k$  – масса ВЗК,  $m_{ВВ}$  – максимальная масса заряда ВВ, взрыв которого локализует ВЗК, пересчитанная на ТЭ.

По назначению ВЗК можно разделить на стационарные (неперемещаемые в процессе эксплуатации) и транспортабельные, однократного и многократного использования для удержания продуктов безосколочного и осколочного взрыва. По форме замкнутой силовой оболочки ВЗК делятся на цилиндрические с плоскими и округлыми (полусферическими, эллипсоидальными, коническими) днищами и сферические, а по используемой силовой схеме – на одноконтурные и двухконтурные (с внутренним силовым корпусом, воспринимающим импульсную составляющую нагрузки взрыва, и внешним силовым корпусом, воспринимающим избыточное квазистатическое давление газообразных продуктов взрыва). При цилиндрической форме силового корпуса ВЗК могут отличаться по способу защиты днищ от продольной составляющей импульсной нагрузки взрыва. Защиты днищ бывают демпферные (с плоскими деформируемыми или массивными недеформируемыми диафрагмами и демпферами из пенопласта, керамзита, пакета металличе-

ской сетки, труб, оребренных элементов) и дроссельные (в виде дисков с одним или несколькими отверстиями, каналами переменного сечения) [1–3, 7–12]. По применяемым материалам основного силового элемента – оболочки корпуса – ВЗК делятся на однослойные стальные и многослойные: стальные, сталь-бетонные, сталь-композитные, железобетонные [1–3, 7–9]. При разработке силового корпуса следует использовать конструкционные материалы, обладающие повышенной удельной прочностью, энергоемкостью под нагрузкой, термо- и коррозионной стойкостью и обеспечивающие минимально возможную чувствительность конструкции к влиянию масштабного фактора и дефектов. Создано несколько конструкций ВЗК с силовым корпусом из легированных сталей, таких как: сталь 20, 09Г2С, трубная сталь класса прочности не ниже К60, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т (см. рис. 2). Наиболее перспективными материалами также являются



Рис. 2. ВЗК различного назначения: а – малогабаритная для проведения оптических и рентгенографических измерений:  $\varnothing_n = 0,42$  м,  $L = 1,0$  м,  $\varnothing_o = 0,1$  м,  $M_k = 70$  кг,  $m_{\text{ВВ}} = 0,015$  кг ТЭ; б – для радиографии:  $\varnothing_n = 0,82$  м,  $L = 1,1$  м,  $\varnothing_o = 0,23$  м,  $M_k = 980$  кг,  $m_{\text{ВВ}} = 2,5$  кг ТЭ; в – сферическая:  $\varnothing_n = 0,88$  м,  $L = 0,95$  м,  $\varnothing_o = 0,22$  м,  $M_k = 470$  кг,  $m_{\text{ВВ}} = 5,4$  кг ТЭ; г – для аварийных боеприпасов:  $\varnothing_n = 0,99$  м,  $L = 3,31$  м,  $\varnothing_o = 0,43$  м,  $M_k = 2000$  кг,  $m_{\text{ВВ}} = 11,2$  кг ТЭ, масса инертной упаковки боеприпаса – 40 кг; д – «Колба»:  $\varnothing_n = 2,66$  м,  $L = 9,2$  м,  $\varnothing_o = 0,55$  м,  $M_k = 25$  т,  $m_{\text{ВВ}} = 200$  кг ТЭ; е – для радиографии:  $\varnothing_n = 1,42$  м,  $L = 6,2$  м,  $\varnothing_o = 0,65$  м,  $M_k = 25$  т,  $m_{\text{ВВ}} = 40$  кг ТЭ; ж – для аварийных боеприпасов:  $\varnothing_n = 1,79$  м,  $L = 6,5$  м,  $\varnothing_o = 1,0$  м,  $M_k = 25$  т,  $m_{\text{ВВ}} = 60$  кг ТЭ; з – из стали 12Х18Н10Т:  $\varnothing_n = 2,44$  м,  $L = 5,6$  м,  $\varnothing_o = 0,5$  м,  $M_k = 20$  т,  $m_{\text{ВВ}} = 100$  кг ТЭ

титановые, алюминиевые сплавы и композитные материалы [1]. При необходимости усиления защиты силовой оболочки от воздействия осколков и струй перед оболочкой устанавливается дополнительный (противоосколочный) слой, в качестве которого могут применяться: слои стальной сетки, набор металлических колец, один или несколько слоев листовой стали, алюминиевого сплава, бетона, керамзитобетона, керамики, песка, и т. п. [1–13].

Конструкция каждой ВЗК разрабатывается для решения конкретных типовых технических задач в соответствии с требованиями более жесткими, чем требования для обычных сосудов высокого давления. Основными требованиями являются: полное демпфирование ударно-волнового импульса давления и продуктов взрыва; сохранение целостности конструкции и заданной степени герметичности при действии импульсных и квазистатических нагрузок, осколков и иных факторов взрыва; предотвращение опасного воздействия взрыва на окружающую среду. К обязательным требованиям также относятся – удобство и безопасность эксплуатации ВЗК, включающее такие виды работ, как: помещение в ВЗК и извлечение из нее (при необходимости) взрывоопасного объекта, погрузка, транспортировка и разгрузка ВЗК, проведение в ней взрывов, газообразные продукты которых создают в полости ВЗК избыточное давление, стравливание газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ , и др.) из ВЗК, содержащих в виде примесей и аэрозолей вредные, токсичные или радиоактивные вещества, вентиляция и очистка полости ВЗК, дефектоскопия, замена выработавших ресурс элементов и некоторые другие виды работ.

Необходимо также отметить, что применяемые в силовом контуре ВЗК материалы, находящиеся в наиболее нагруженных зонах, например, в сечении, наиболее близко расположенном к источнику взрывной нагрузки, работают при высокоинтенсивной динамической и неравномерно распределенной нагрузке на пределе допускаемых прочностных характеристик. При этом если ВЗК является устройством однократного применения, то после изготовления она не может быть предварительно испытана избыточным давлением газа, близким или превышающим рабочее давление, как это делается с сосудами высокого давления. Это связано с тем, что материал силовой оболочки при таких испытаниях получит опасные повреждения и пластические деформации, не позволяющие восстановить геометрию и механические свойства после снятия нагрузки. В последующем при рабочей нагрузке это может стать причиной разрушения ВЗК.

Основным несущим элементом ВЗК является ее силовой контур. Материал силового контура определяет уровни допустимых напряжений и деформаций в конструкции при взрывном нагружении, характер ее реакции и разрушения. Форма и размеры оболочки силового контура влияют на некоторые особенности газодинамических процессов, протекающих при взрыве заряда ВВ, и распределение ударно-волновых нагрузок на замкнутый контур ВЗК. Указанные параметры конструкции определяют величину суммарного (падающего и отраженного) импульса давления, действующего на силовой контур, т. е. динамические и квазистатические нагрузки на него. От размеров и места расположения загрузочного люка (или люков и вводов) зависит прочность и жесткость силового контура ВЗК, а элементы защиты корпуса, днищ и крышки могут снижать и перераспределять динамические нагрузки на элементы ВЗК.

Масса (размеры) и форма заряда ВВ задают амплитуду и длительность импульса давления, действующего на силовой корпус ВЗК при взрыве. Инертные элементы, окружающие заряд ВВ или находящиеся внутри него, ускоряются, деформируются и разрушаются за счет передающейся на них энергии взрыва, формируют совместно с ударной волной и газообразными продуктами нагружающий импульс давления, воздействующий на оболочку ВЗК. Некоторые особенности воздействия фрагментов инертных элементов, разлетающихся в виде поля осколков с разными скоростями, либо сформировавшегося струйного течения газовой среды или кумулятивной струи могут существенно изменить реакцию ВЗК и привести к ее локальным разрушениям. Расположение в объекте точки инициирования влияет на асимметрию детонации ВВ, которая приводит к формированию струйных течений, направленных полей осколков, т. е. вызывает несимметричное нагружение ВЗК.

Разработка конструкции ВЗК должна сопровождаться испытаниями опытных образцов на взрывостойкость, в т. ч. при повышенных и разрушающих взрывных нагрузках. Для ВЗК, имеющих достаточно большие размеры и стоимость, такие испытания целесообразно проводить на геометрически подобных натурным образцам моделях меньшего размера, по возможности при прочих равных условиях, а именно: одинаковые конструкции, материал, технология изготовления, способ нагружения, окружающая среда, и т. д. [1]. Однако известно, что с уменьшением масштаба модели ее прочность может повышаться. Следовательно, запас прочности, определенный на такой модели и перенесенный на натуральную конструкцию, будет завышен и фактический запас прочности ВЗК может оказаться недостаточным.

Физические проявления влияния масштабного фактора на прочность конструкции (масштабный эффект (МЭ)) могут быть многообразны, так как связаны с несущей способностью конструкции, характеристиками прочности (например, с разрушающим напряжением  $\sigma_p$  или деформацией  $\varepsilon_p$ ), видом и характером разрушения (вязкое или хрупкое, катастрофическое), местом разрушения. Корректно оценить масштабный эффект можно путем сравнения реакции геометрически подобных конструкций на сходственное нагружение. При геометрическом подобии справедливы соотношения  $V/L^3 = \text{const}$  и  $F/L^2 = \text{const}$  ( $V$  – объем,  $L$  – характерный размер,  $F$  – площадь поперечного сечения конструкции), а сходственное нагружение возможно лишь при соблюдении подобия систем «нагружаемая конструкция–нагружающая машина». Подобие этих систем при статических испытаниях, как правило, не соблюдается, так как трудноосуществимо, но успешно реализуется при взрывных испытаниях, если соблюдается соотношение  $\xi = m/M = \text{const}$  ( $m$  – масса ВВ,  $M$  – масса нагружаемой конструкции или ее части, деформируемой взрывом). Выполнение этого условия обеспечивает тождественность напряженно-деформированных состояний (с учетом поправки на отличие скоростей деформирования) [1].

Проявление МЭ сопровождается резким снижением несущей способности конструкции по мере увеличения ее размеров и хрупким катастрофическим характером разрушения. Результаты экспериментальных исследований показали, что существуют способы ослабления и даже ухода от влияния МЭ [1, 11]. Ослабления этого влияния можно добиться, например, за счет использования материалов, в которых оптимально сочетаются требуемые прочность и вязкость разрушения с высокой пластичностью, например, нержавеющей или легированных сталей [1]. Другой способ – модификация конструкций, и в нем можно выделить два направления. Первое направление связано с влиянием формы конструкции на ее чувствительность к МЭ. Например, напряженно-деформированные состояния оболочек цилиндрической и сферической формы при внутреннем импульсном нагружении существенно различаются: цилиндрическая оболочка находится в состоянии, близком к одноосному (окружному) растяжению, а сферическая – в двухосном напряженном состоянии. По сравнению с цилиндрической оболочкой, при равных условиях (размеры, нагрузки, и пр.), в единице объема сферической оболочки накапливается примерно в два раза больше упругой энергии, поэтому она более чувствительна к влиянию МЭ и разрушается более катастрофично [1]. Второе направление связано с увеличением размера конструкции без изменения характерного размера силовых элементов, воспринимающих нагрузки. Так, масштабный фактор слабо или практически не влияет на прочность оболочечных конструкций сформированных из волокнистых композитов, рулонов из тонких стальных листов, канатов. Причина заключается в том, что, несмотря на изменение размеров конструкций, характерные размеры силовых элементов, например, диаметр волокон в композите, диаметр проволоки в канате или толщина листа в рулоне, не меняются, следовательно, остается прежней и доля запасенной упругой энергии, идущая на их разрушение [1, 4–6, 11].

Имеется положительный опыт разработки ВЗК, в которой роль силового слоя играет волокнистый композит, образованный слоистой намоткой заданной структуры нитей из тонких (диаметром  $\sim 0,01$  мм) стеклянных волокон, пропитанных полимерным связующим. В этом случае

сильный МЭ отсутствует, поскольку как в модели, так и в натуре одинаковые волокна разрушаются при достижении одних и тех же деформаций, а запас упругой энергии на разрушение отдельного волокна берется из окрестности волокна вблизи трещины. В частности, установлено [1, 3–6, 12, 13], что нагруженные взрывом геометрически подобные цилиндрические оболочки из ориентированного стеклопластика разрушаются при  $\xi_p = \text{const}$  и  $\varepsilon_p = \text{const}$ , что означает отсутствие сильного МЭ. Наличие дефектов на отдельных волокнах, приводящее к их разрывам в соответствующих сечениях, не способно резко снизить прочность оболочки в целом, так как вероятность совпадения дефектов у тысяч параллельно уложенных волокон в данном сечении ничтожно мала. Выполненные методом намотки оболочки из стеклопластика и базальтопластика с эпоксидной матрицей обладают большей удельной прочностью, коррозионной стойкостью, нечувствительностью к влиянию масштабного фактора и малой чувствительностью к мелким дефектам [1, 12]. Разрушаются они в области упругости и обладают высокой энергоемкостью. Относительно низкая термостойкость матрицы, малая циклическая прочность и динамическая неустойчивость оболочек из указанных композитов при импульсном нагружении [1] – основные недостатки, накладывающие ограничения на самостоятельное применение этих материалов для силового корпуса ВЗК. Однако установлено [1, 4, 11], что подкрепление изнутри стеклопластика и базальтопластика стальной оболочкой устраняет указанные недостатки, при этом стальной слой задает форму оболочки корпуса, блокирует динамическую неустойчивость слоя композита, снижает тепловые нагрузки, обеспечивает герметичность ВЗК. Металлокомпозитная конструкция существенно более энергоемка по сравнению с чисто стальной, например, это позволяет решить проблемы, связанные с ограничениями по массе, что важно для транспортабельности ВЗК. Такие ВЗК успешно применялись в качестве основного взрывозащитного контура в физических опытах и во взрывозащитных контейнерах для эвакуации аварийных боеприпасов и террористических устройств (см. рис. 2, в–д) [1, 12, 13]. Показатель весового совершенства (отношение массы заряда ВВ, взрыв которого локализует контейнер, к массе контейнера) сферических металлокомпозитных ВЗК составляет 1,1–2,5 %, что более чем в два раза выше по сравнению с аналогичными металлическими контейнерами [1, 3, 13].

ВЗК однократного применения, изготавливаемые из сталей, как правило, допускают в наиболее нагруженных частях конструкции незначительные пластические деформации (1–2 %), так как иначе не удастся получить для них приемлемые массово-габаритные характеристики. Поэтому перед каждым взрывным испытанием такой ВЗК с заданным уровнем нагрузки требуется проводить расчетно-экспериментальное обоснование ее прочности и надежности, при обязательном выполнении условия работы материала силового корпуса в области упругих деформаций. Если в отдельных зонах наиболее нагруженных сечений ВЗК допускаются незначительные пластические деформации, то их значения не могут превышать проверенных экспериментально уровней заведомо «неразрушаемых» деформаций (напряжений), которые примерно на порядок ниже «предельных» (близких к разрушающим) значений [14]. Для металлических ВЗК многократного применения допускаемые напряжения (деформации) для силового корпуса еще меньше, а значит при одних и тех же нагрузках по сравнению с конструкциями однократного применения возрастают их габариты и масса либо уменьшается масса подрываемых в них зарядов ВВ.

При создании ВЗК широко применяются расчетно-экспериментальные методы исследований. Разработаны специализированные программные комплексы, которые используются для расчетов газодинамических нагрузок, возникающих при взрыве заряда ВВ и определения напряженно-деформированного состояния элементов ВЗК в процессе их реакции на взрывные нагрузки [15–18]. Программный комплекс ДИАДА2D для расчета газодинамических нагрузок на элементы конструкций ВЗК основан на использовании метода С. К. Годунова [15–17]. Основу метода составляет решение задачи о распаде произвольного разрыва. Расчет течения проводится в подвижных эйлеровых координатах и позволяет выделять ударные и детонационные волны, контактные

разрывы. Примеры расчета взрыва компактного заряда ВВ с  $m_{ВВ} = 11,2$  кг ТЭ, окруженного многослойным корпусом, в цилиндрической металлокомпозитной ВЗК показаны на рис. 3, где для 1/4 части сечения ВЗК приведены поля распределения давления продуктов взрыва, расположение и форма основных конструктивных элементов, а также корпуса заряда ВВ на различные моменты времени [12].

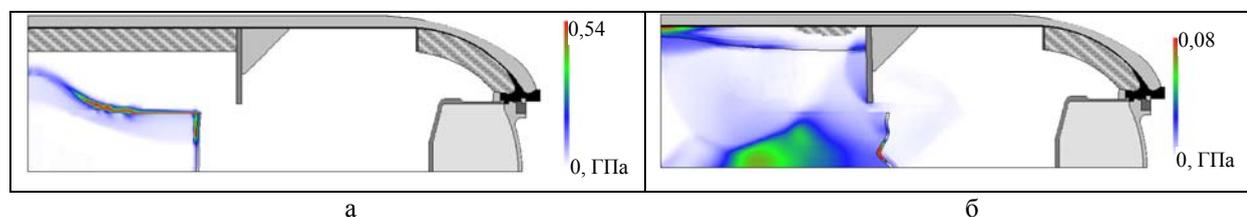


Рис. 3. Расчетная схема нагружения взрывом заряда ВВ с  $m_{ВВ} = 11,2$  кг ТЭ 1/4 части сечения цилиндрической металлокомпозитной ВЗК, приведенной на рис. 2,г, на два момента времени: а –  $t = 137$  мкс, б –  $t = 340$  мкс

Расчеты напряженно-деформированного состояния элементов ВЗК с учетом нелинейного поведения материала и контактного взаимодействия при интенсивных механических и тепловых нагрузках от взрыва проводятся с использованием программного комплекса DRACON [17]. На рис. 4 показаны в сравнении с результатами эксперимента некоторые результаты расчета в виде зависимостей окружной деформации от времени и распределения максимальной окружной деформации по длине образующей цилиндрической оболочки ВЗК. Данные зависимости характеризуют реакцию ВЗК на вышеуказанные взрывные нагрузки (рис. 3) [12].

Экспериментальные исследования ВЗК при взрывном нагружении включают:

- испытания новых конструктивных схем ВЗК и отдельных элементов;
- модельные и натурные испытания силовых элементов конструкции;
- модельные испытания конструкции в целом;
- натурные испытания на подтверждение несущей способности и запасов прочности;
- эксплуатационные испытания ВЗК.

Исследования позволяют выявить особенности реакции вновь разрабатываемой конструкции, оптимизировать ее конструктивную схему и отдельные силовые элементы, определить несущую способность и запасы прочности ВЗК, аттестовать ВЗК для однократного или многократного использования, подтвердить прочностной ресурс ВЗК в процессе эксплуатации, получить данные для тестирования расчетных программ, используемых при численном моделировании, сопровождающем все эксперименты.

Для получения необходимой информации о взрывостойкости и промышленной безопасности ВЗК при экспериментальной отработке и в процессе эксплуатации, с целью определения прочностных параметров ВЗК, характеризующих реакцию на взрывное и последующее квазистатическое нагружение, нами широко используются известные и специально разработанные измерительные методы диагностики [1, 5, 6, 12, 13]. Регистрация смещений и деформаций элементов ВЗК во времени проводится с помощью таких методов, как скоростная фотохронография (рис. 5), тензометрирование (рис. 6), электроконтактные измерения, скоростная киносъемка (рис. 7). Скорости движения поверхности корпуса ВЗК в заданных сечениях регистрируются лазерным и радиоинтерферометрами, емкостным датчиком, ускорения (перегрузки) – пьезоакселерометрами. Проводятся измерения импульсного и остаточного давления в ВЗК, температуры в ее полости и на стенках.

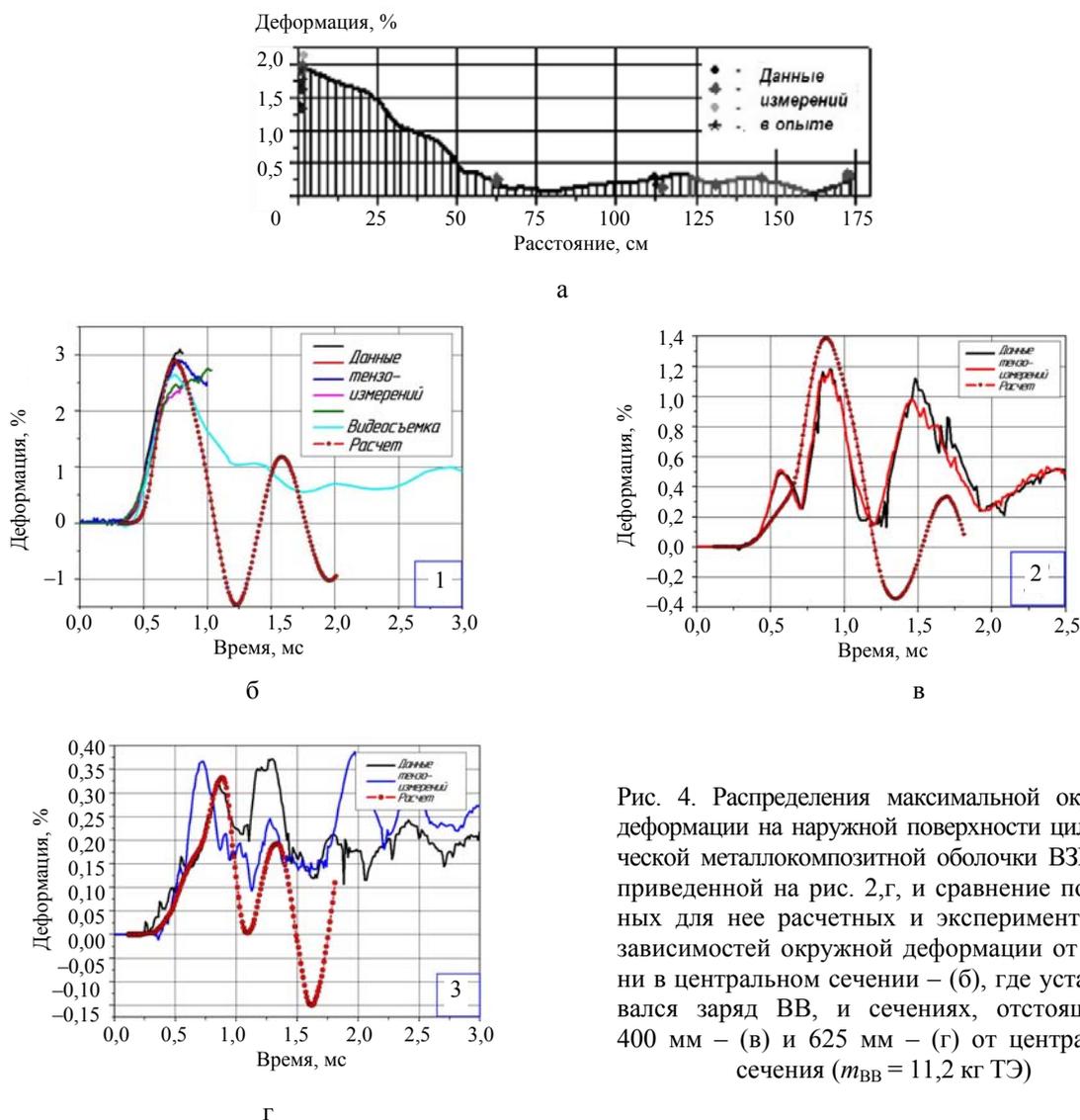


Рис. 4. Распределения максимальной окружной деформации на наружной поверхности цилиндрической металлокомпозитной оболочки ВЗК – (а), приведенной на рис. 2,г, и сравнение полученных для нее расчетных и экспериментальных зависимостей окружной деформации от времени в центральном сечении – (б), где устанавливался заряд ВВ, и сечениях, отстоящих на 400 мм – (в) и 625 мм – (г) от центрального сечения ( $m_{ВВ} = 11,2$  кг ТЭ)

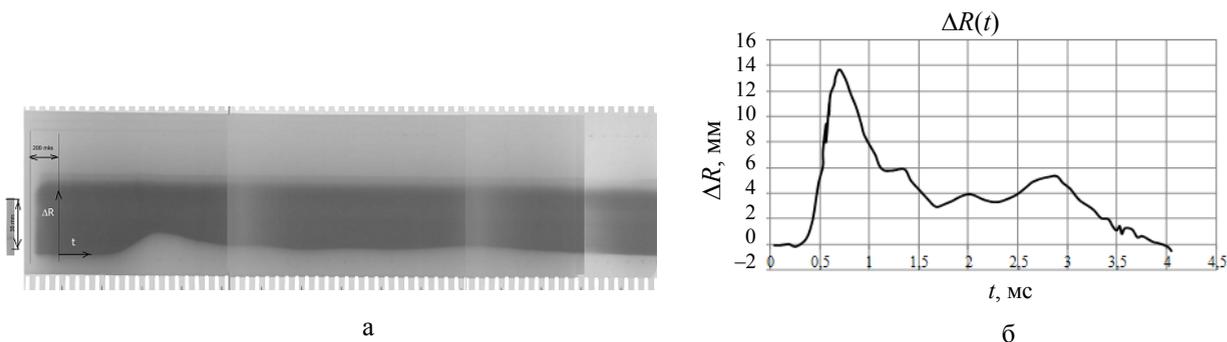


Рис. 5. Фотохронограмма опыта – (а) и результаты ее обработки в виде зависимости «радиальное смещение – время» – (б), полученные при испытании взрывом заряда ВВ с  $m_{ВВ} = 11,2$  кг ТЭ цилиндрической металлокомпозитной ВЗК, приведенной на рис. 2,г

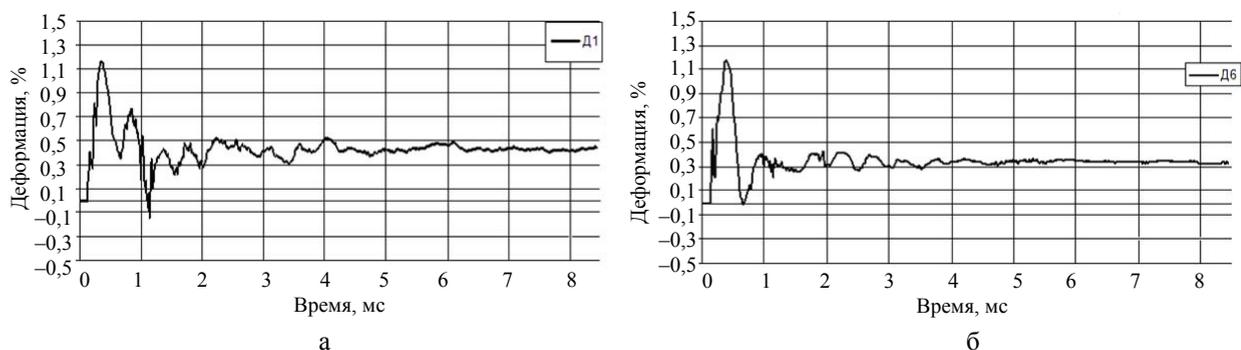


Рис. 6. Зависимости окружных динамических деформаций от времени, полученные при испытании взрывом заряда ВВ с  $m_{ВВ} = 5,4$  кг ТЭ сферической ВЗК, приведенной на рис. 2, в: а – вблизи экватора, б – на расстоянии 200 мм от экватора



Рис. 7. Кадры скоростной видеосъемки испытания сферической ВЗК на различные моменты времени (стрелки указывают на места истечения газов): а –  $t = 1$  мс, б –  $t = 2$  мс

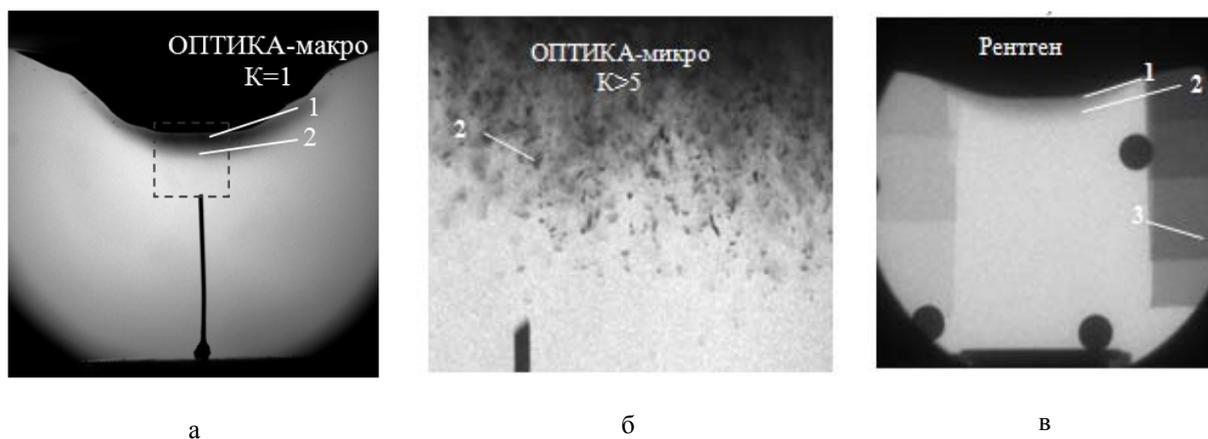


Рис. 8. Регистрация в ВЗК оптическими (а, б) и рентгенографическим (в) методами процесса «пыления» со свободной поверхности образца из свинца при ударно-волновом нагружении: 1 – свободная поверхность образца, 2 – поток частиц, 3 – эталоны из свинца (фольга толщиной от 30 до 480 мкм)

К настоящему времени в практике физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ использовались малогабаритная ВЗК с несущей способностью 15 г ТЭ и транспортабельный контейнер «Колба», выдерживающий взрыв до 200 кг ТНТ [1] (рис. 2,а, д). Разработаны ВЗК различных модификаций с силовым корпусом из стали, стали и бетона, композитных материалов и стали для локализации взрыва с энергией до 50 кг ТНТ, ряд из них успешно эксплуатируются. Примеры регистрации в ВЗК с помощью оптических и рентгенографических методов процесса выброса частиц («пыления») со свободной поверхности образца из свинца при ударно-волновом нагружении с максимальной амплитудой нагружающего импульса давления ~15 ГПа, представлены на рис. 8 [19]. Таким образом, созданное научно-исследовательское направление работ, основанное на физически обоснованных научно-технических подходах к проектированию, экспериментальных методах и численном моделировании, позволяет создавать ВЗК различного назначения, обеспечивающих промышленную безопасность при проведении исследований взрывных процессов, а также при их применении для взрывных технологий с использованием зарядов ВВ массой от единиц грамм до десятков килограмм.

## Список литературы

1. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
2. Пат. 2130563. Устройство для локализации продуктов взрыва / Д. В. Григорьев, М. А. Сырунин, А. И. Абакумов и др. // Бюллетень. 1997. № 1.
3. Пат. 2009387. Способ изготовления устройства для локализации взрыва / А. Г. Иванов, М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко // Там же. 1994. № 5.
4. Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. Контейнер для локализации взрыва компактного заряда взрывчатого вещества с инертной оболочкой // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 1. С. 196–208.
5. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г. Реакция на нагружение и прочность стеклопластикового контейнера при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 127–136.
6. Пат. 2244253. Контейнер для локализации взрыва / А. И. Абакумов, А. Л. Михайлов, М. А. Сырунин и др. // Бюллетень. 2005. № 1.
7. Пат. 2280234. Взрывная камера / Е. Д. Вишневецкий, М. А. Сырунин, А. Б. Ермаков, В. А. Снопов // Там же. 2006. № 20.
8. Пат. 2257537. Контейнер для локализации взрыва / М. А. Сырунин, А. И. Абакумов, Е. Д. Вишневецкий и др. // Там же. 2005. № 21.
9. Пат. 2367899. Локализирующее устройство для радиографических исследований взрывных процессов / М. А. Сырунин, Е. Д. Вишневецкий, А. Л. Михайлов и др. // Там же. 2009. № 26.
10. Пат. 2404407. Взрывозащитная камера / М. А. Сырунин, Е. Д. Вишневецкий, А. Г. Федоренко, В. А. Чернов // Там же. 2010. № 32.
11. Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. и др. О концепции создании камер для энергетики взрывного термоядерного синтеза // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 171–179.

12. Абакумов А. И., Девяткин И. В., Мельцас В. Ю. и др. Разработка взрывостойкого контейнера АТ595. Расчетно-теоретическое и экспериментальное обоснование параметров конструкции // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2008. Вып. 12. С. 298–309.
13. Абакумов А. И., Сырунин М. А., Соловьев В. П., Михайлов А. Л. Разработка сферического металлокомпозитного контейнера, обеспечивающего удержание взрыва с энерговыведением 5 кг ТЭ // Сборник трудов Международной конференции «XIII Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 2011. С. 441–456.
14. Рябов А. А., Романов В. И., Сырунин М. А. и др. Численные и экспериментальные исследования деформирования и разрушения стальных цилиндрических оболочек при взрывном нагружении // Проблемы прочности и пластичности. 2003. Вып. 3. С. 122–127.
15. Величко О. М., Губкова Г. Н., Дерюгин Ю. Н. и др. Пакеты программ для решения многомерных задач газовой динамики разностным методом С. К. Годунова // Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и обработки ракетно-артиллерийского вооружения». 2000.
16. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
17. Лин Э. Э., Мельцас В. Ю., Портнягина Г. Ф. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по давлению при сильном расширении продуктов взрыва в замкнутом объеме // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. Вып. 4. С. 266–275.
18. Абакумов А. И., Низовцев П. Н., Певницкий А. В., Соловьев В. П. Программный комплекс DRACON для расчета упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении // Сб. тез. докладов Международной конференции «IV Забабанинские научные чтения». Снежинск, 1995. С. 89–90.
19. Бурцев В. В., Лебедев А. И., Михайлов А. Л. и др. Многокадровая протонография – метод исследования быстропротекающих гидродинамических процессов // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 6. С. 16–28.

## **Explosion-Proof Chambers for Investigations of Hydrodynamic Processes and Explosive Technologies**

M. A. Syrunin, V. A. Ogorodnikov

*One of the ways to protect the environment from the explosion products is to localize them in the closed volume of explosion-proof chamber or container. Explosion-proof chambers are used to: investigate the properties of materials at high pressures and temperatures; test high explosives and ammunition; evacuate and destroy terrorist-made devices; safety transport and store the objects, containing high explosives. Explosion-proof chambers are also used in safe explosion welding and some other fields of technique, connected to explosive processes.*

*In RFNC-VNIIEF a scientific trend has been created, in which boundaries different types of explosion-proof chambers have been developed and implemented. The chambers with enclosed volumes from  $\sim 10^{-3}$  to  $\sim 10$  m<sup>3</sup> are capable to hermetically localize explosion products of charges with masses in TNT equivalent from several grams to dozens of kilograms. In this article scientific and technical approaches to designing explosion-proof chamber constructions, used to investigate different hydrodynamic processes, have been offered.*