

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФРАГМЕНТАЦИИ ТОНКИХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Д. В. Ханин, М. А. Сырунин, В. Ю. Мельцас, Г. Ф. Портнягина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработка новых экспериментальных методов, позволяющих исследовать поведение материалов и конструкций, механизмы их разрушения при воздействии импульсных (взрывных) нагрузок, крайне важна для более глубокого понимания физических процессов, связанных с разрушением, создания более совершенных физических и математических моделей разрушения, совершенствования методов расчетного моделирования процессов разрушения. Одним из таких новых методов, который сейчас внедряется в практику газодинамических исследований, является импульсная протонная радиография. С помощью данного метода можно устанавливать определяющие механизмы разрушения, исследовать их кинетику, что позволяет достоверно оценивать и прогнозировать размеры образующихся частиц и фрагментов при разрушении материала, их последующее движение и воздействие на преграды.

В данной работе представлены результаты двух протонных радиографических экспериментов, в которых исследовалась фрагментация (разрушение) полусферических оболочек при взрыве прилегающего к внутренней стороне оболочки полусферического заряда взрывчатого вещества (ВВ). В первом эксперименте оболочка была изготовлена из стали Ст20, во втором – из алюминиевого сплава АМг-6.

Протонографические опыты проводились по общей схеме, вид которой приведен на рис. 1. Фотография готовой сборки для стальной оболочки приведена на рис. 2. В обоих опытах была использована половина сферического заряда ВВ радиусом 16,3 мм и массой 14,5 г. Обе полусферических оболочки имели внутренний диаметр равный диаметру ВВ с минимальным допуском для обеспечения собираемости с зарядом. В первом опыте с оболочкой из стали Ст20 толщина стенки равнялась  $\delta_1 = 0,4$  мм. Отношение массы инертного окружения ВВ к массе ВВ составляло  $\sim 36,6$  %. Толщина стенки алюминиевой оболочки во втором опыте  $\delta_2 = 1,15$  мм. При этих размерах было обеспечено отношение массы инертного окружения ВВ к массе ВВ  $\sim 38$  % (что соответствует удельной массе стальной оболочки).

Кадры протонографических изображений, полученные в опыте со стальной полусферой, показаны на рис. 3 (кадры протонографических изображений для алюминиевой полусферы в общем виде аналогичны кадрам для стальной полусферы и поэтому не приводятся). Для построения графиков зависимости приращения  $dR$  радиуса кромки полусферы (или рас-

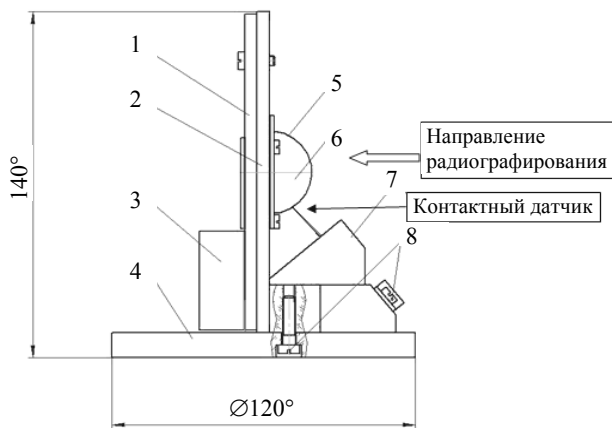


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки: 1 – демпфер из пенопласта плотностью  $0,3 \text{ г/см}^3$  в виде диска диаметром 120 мм и толщиной  $h_2 = 5$  мм; 2 – экран в виде диска диаметром 120 мм из оргстекла толщиной  $h_1 = 5$  мм; 3 – розетка и ЭД; 4 – диск; 5 – полусферическая оболочка; 6 – полусфера из ВВ радиуса  $R = 16,3$  мм и массой  $m = 14,5$  г; 7 – опора электроконтактного датчика; 8 – винты

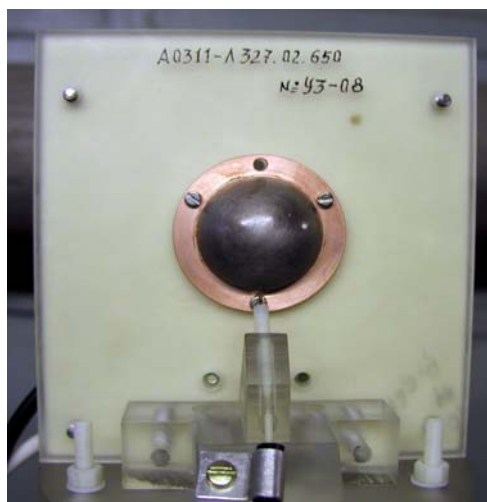


Рис. 2. Фотография экспериментальной сборки с оболочкой из стали Ст20

ширения) от времени в каждом кадре вычисляли изменение  $dR$  радиуса  $R$  на видимой кромке расширяющейся стальной оболочки. В качестве масштаба использовали диаметр крепежного кольца  $D$ , который был неизменным по результатам сравнения со статическими кадрами. Замеры показали, что видимая кромка стальной и алюминиевой оболочек близка к окружности на каждом из кадров.

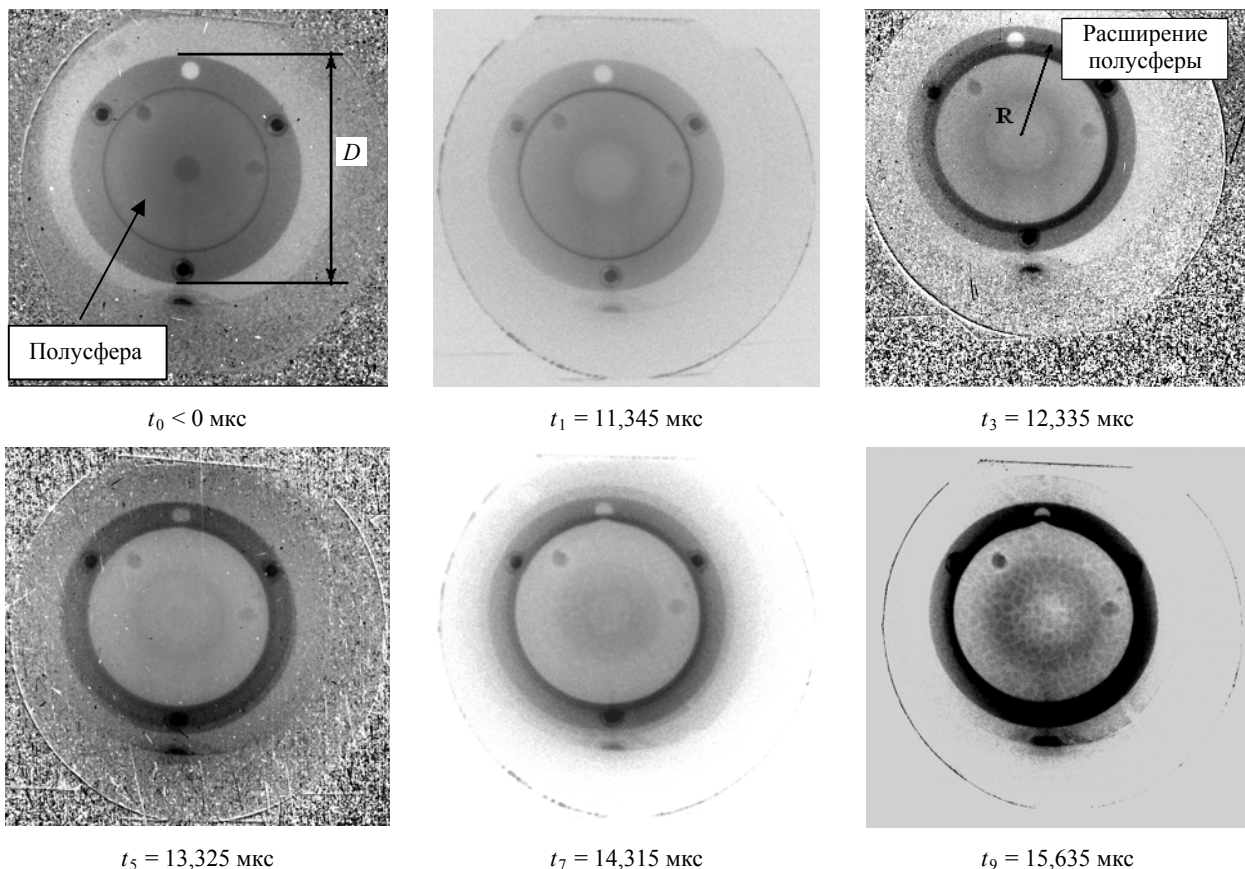


Рис. 3. Протонограммы стальной полусферы, полученные на различные моменты времени

Графики зависимости приращения  $dR$  радиуса кромки полусферы по результатам обработки кадров протонографии показаны на рис. 4. Линейная аппроксимация полученных точек движения кромки полусфер показывает хорошее согласие с экспериментальными данными и позволяет оценить скорость расширения оболочек, которая для полусферы из стали Ст20 составила  $V_1 = 2,59$  км/с, а для полусферы из алюминиевого сплава АМг-6  $V_2 = 2,24$  км/с, что практически совпадает с данными расчетов. Расчетное время начала воздействия при отражении волны детонации ВВ от стальной оболочки полусферы  $t_0 = 11,28$  мкс согласуется с экспериментальной оценкой времени начала движения полусферы  $t_0^* = 11,213$  мкс, получаемой путем продления до оси абсцисс аппроксимирующей опытные данные прямой (рис. 4,а).

Экспериментальная оценка времени начала движения алюминиевой полусферы  $t_0^* = 11,26$  мкс, также получаемая продлением до оси абсцисс аппроксимирующей опытные данные прямой (рис. 4,б), удовлетворительно согласуется с расчетным временем начала воздействия при отражении волны детонации ВВ от поверхности алюминиевой полусферы  $t_0 = 11,53$  мкс.

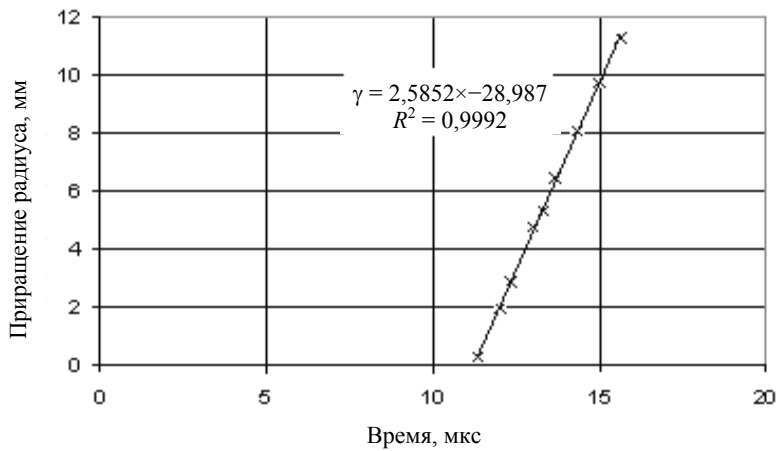
Оценка количества осколков для стальной и алюминиевой полусфер, наиболее хорошо различимых по последним протонографическим кадрам, проводилась следующим образом. Подсчитывали

количество осколков, на хорошо видимом сегменте полусферы. Число осколков в пересчете на полную сферу вычисляли умножением числа осколков, подсчитанных на сегменте, на отношение площади всей сферы к площади сегмента. Из кадра на время  $t = 15,635$  мкс для стальной полусферы были выделены границы разрывов между осколками (рис. 5,а). Для алюминиевой полусферы границы разрывов между осколками были выделены из кадра на время  $t_{11} = 16,370$  мкс (рис. 5,б).

Красными точками помечены осколки, видимые целиком, а синими – осколки, видимые частично (заходят за край окружности диаметра  $D_{окг}$ ), их количество учтено в половинном размере. Общее количество осколков в пересчете на полную сферу для стали Ст20 составило  $N_{ст} = 2813$  шт., для алюминия АМг-6  $N_{ал} = 2265$  шт. Для обеих оболочек проведен также расчет при уменьшенном диаметре окружности сферического сегмента  $D_{окг}^*$ , где образовавшиеся осколки видны наиболее четко на изображении. В этом случае для стали Ст20 получено количество осколков  $N_{ст} = 2922$  шт. и для алюминия АМг-6  $N_{ал} = 2229$  шт., что близко к предыдущим результатам и результатам предварительных опытов с аналогичными сборками, где было получено по щитовой методике число осколков для стальной сферы  $N_{ст} = 3346$  шт., для алюминиевой сферы  $N_{ал} = 2146$  шт.

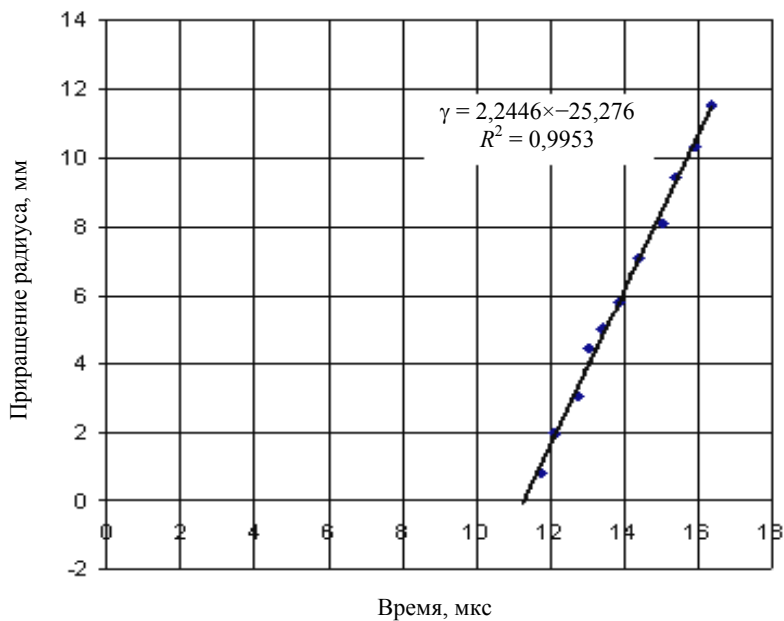
В работах [1, 2] описан метод расчета фрагментации тонких цилиндрических и сферических метал-

лических оболочек под действием динамической



× Точки движения оболочки по протонограммам

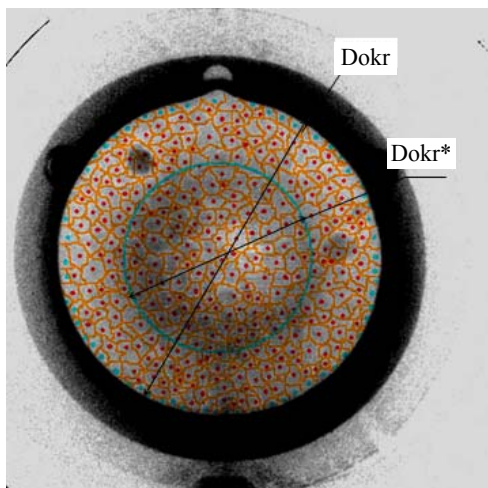
а



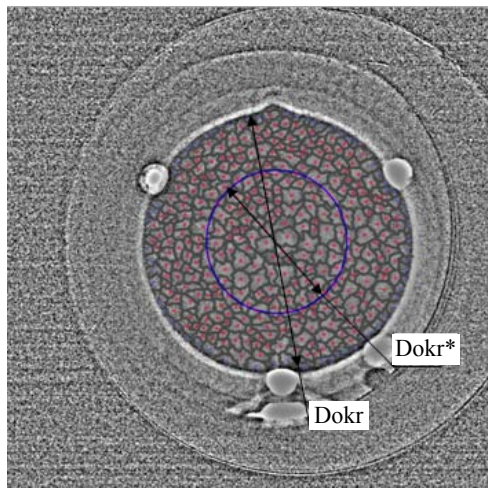
◆ Точки движения оболочки по протонограммам

б

Рис. 4. Результаты обработки кадров протонографии по определению движения кромки полусферы:  
а – из стали Cr20; б – из алюминия АМг-6



а



б

Рис. 5. Схема подсчета числа осколков по протонограмме: а – стальной полусферы; б – алюминиевой полусферы нагрузки с вычислением спектра по массе фрагментов. Этот метод был реализован в комплексе ДИАДА-2D [3]. Проведенные расчеты показали, что при надлежащем выборе характерного размера (массы) фрагмента, полученное число фрагментов хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Вычислить характерную массу фрагмента можно двумя способами. Первый – если известно заранее общее число фрагментов, то, разделив массу сферической оболочки на число фрагментов, получим величину, которую можно принять за характерную массу. Второй способ – приближенное вычисление характерной массы. Для стальной сферической оболочки в работе [4] приведена эмпирическая формула для вычисления характерного размера осколков  $d$  из баланса упругой энергии и работы разрушения при дроблении оболочек

$$d = 8\lambda E / Y^2, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости (для стали –  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>);  $Y$  – динамический предел текучести;  $\lambda$  – работа разрушения после пластической деформации.

В расчетах с алюминиевой оболочкой для определения характерного размера осколков был выбран критерий определения размера осколка по формуле из [5]

$$a_k = \frac{24\gamma \eta^{1/3}}{3\rho \& \eta}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – поверхностная энергия разрушения твердого тела,  $\&$  – скорость деформации.

Расчетная геометрия фрагментации для стальной и алюминиевой полусфер представлена на рис. 6.

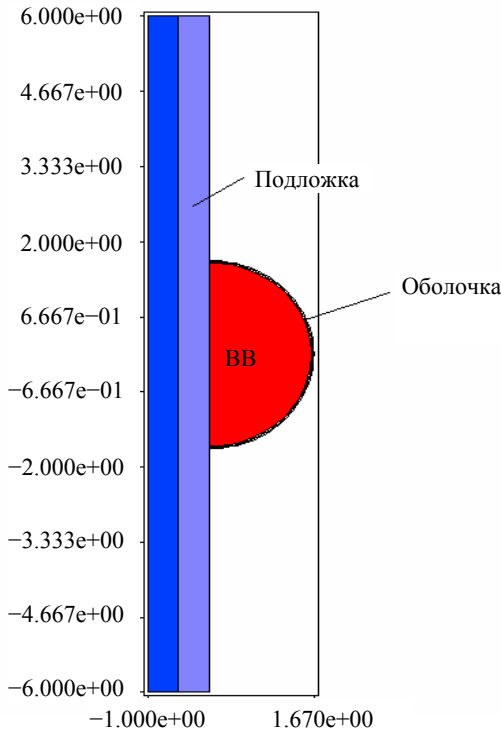


Рис. 6. Постановка расчета

Отметим, что фрагментация полусферы с полусферическим зарядом происходит не одновременно, а растянута по времени. Для стальной полусферической оболочки фрагментация начинается в момент  $t_n = 5,19$  мкс и заканчивается в момент  $t_k = 5,46$  мкс (здесь, как и далее, время отсчитывается от начала детонации), для алюминиевой полусферы фрагментация оболочки началась на момент времени  $t_n = 5,29$  мкс над центром заряда и закончилась на  $t_k = 5,75$  мкс вблизи подложки. Фрагментация задерживается вблизи подложки из-за значительного уменьшения скорости оболочки, связанного с разгрузкой в продуктах взрыва. На рис. 7 приведены формы для стальной оболочки на отдельные моменты времени.

На рис. 8 показаны скорости элементов оболочки по времени для стальной и алюминиевой оболочек соответственно. Для обоих материалов вблизи подложки скорость оболочки в 1,6 раза меньше, чем на полюсе.

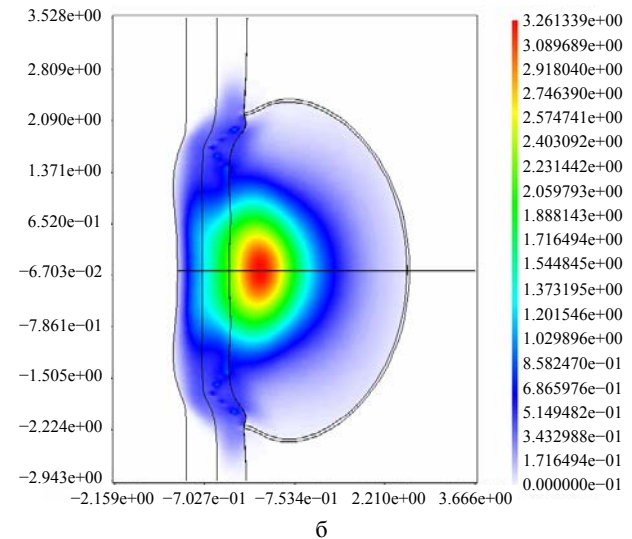
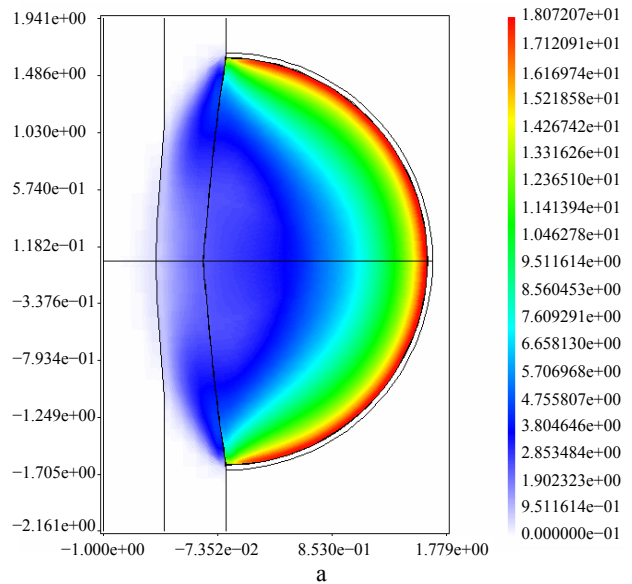
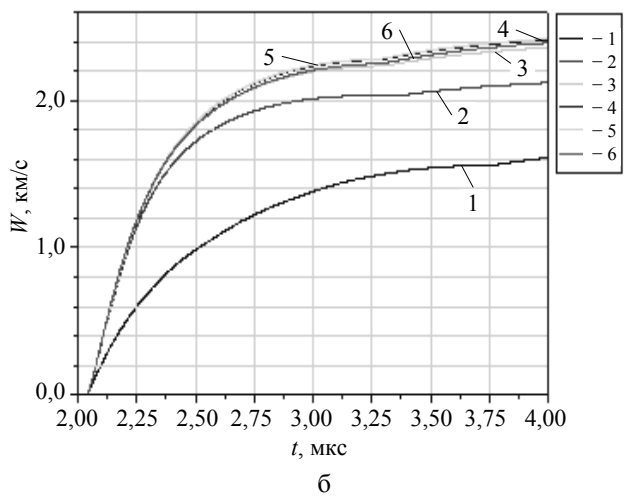
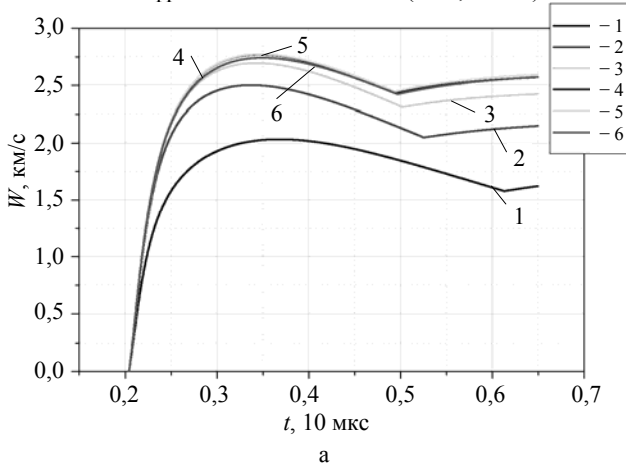


Рис. 7. Поле давления в стальной оболочке: а – на момент окончания детонации ( $t = 2,04$  мкс); б – на момент окончания фрагментации оболочки ( $t = 5,46$  мкс)



1 –  $\alpha = 3^\circ$ , 2 –  $\alpha = 30^\circ$ , 3 –  $\alpha = 45^\circ$ , 4 –  $\alpha = 60^\circ$ ,  
 5 –  $\alpha = 75^\circ$ , 6 –  $\alpha = 90^\circ$   
 (угол  $\alpha$  отсчитывается от подложки)

Рис. 8. Зависимость от времени скорости в отдельных ее точках: а – стальной оболочки; б – алюминиевой оболочки

Расчеты с характерным размером, вычисленным по формуле (1) для стальной оболочки и по формуле (2) для алюминиевой дали общее количество осколков для стальной сферы 3190 и для алюминиевой 1882 осколка, что согласуется с экспериментальными данными по количеству фрагментов.

На рис. 9 полученные данные по количеству осколков сопоставлены с данными опытов работы [4], в которой были проведены опыты по взрывной фрагментации стальных и алюминиевых сфер с радиусом шара ВВ 33, 51 и 90 мм с близким отношением массы оболочек к массе ВВ  $\sim 0,3$ . Данное сравнение показывает хорошую зависимость числа осколков от масштаба сборки (радиуса шара ВВ).

Представленные данные анализа результатов протоннографических опытов с рассматриваемыми сборками показали возможность приемлемой визуализации состояния сборки для анализа процесса разгона, начала и развития фрагментации, а также количественных оценок числа фрагментов, образующихся при взрывном дроблении прилегающей к ВВ оболочки из стали или алюминия. Эти данные удовлетворительно согласуются с аналогичными данными, полученными ранее с применением других методик, и могут быть использованы при разработке модели взрывной фрагментации оболочек и численных методик для расчетов взрывных явлений с образованием высокоскоростных осколков.

Таким образом, метод протонной радиографии перспективен для получения информации о количественных и временных параметрах при исследовании начальной стадии высокоскоростного разрушения и фрагментации оболочек из конструкционных материалов.

Авторы выражают благодарность за большой вклад в создание работы А. Л. Михайлову, а также В. В. Бурцеву и А. В. Рудневу за проведение измерений и обработку результатов.

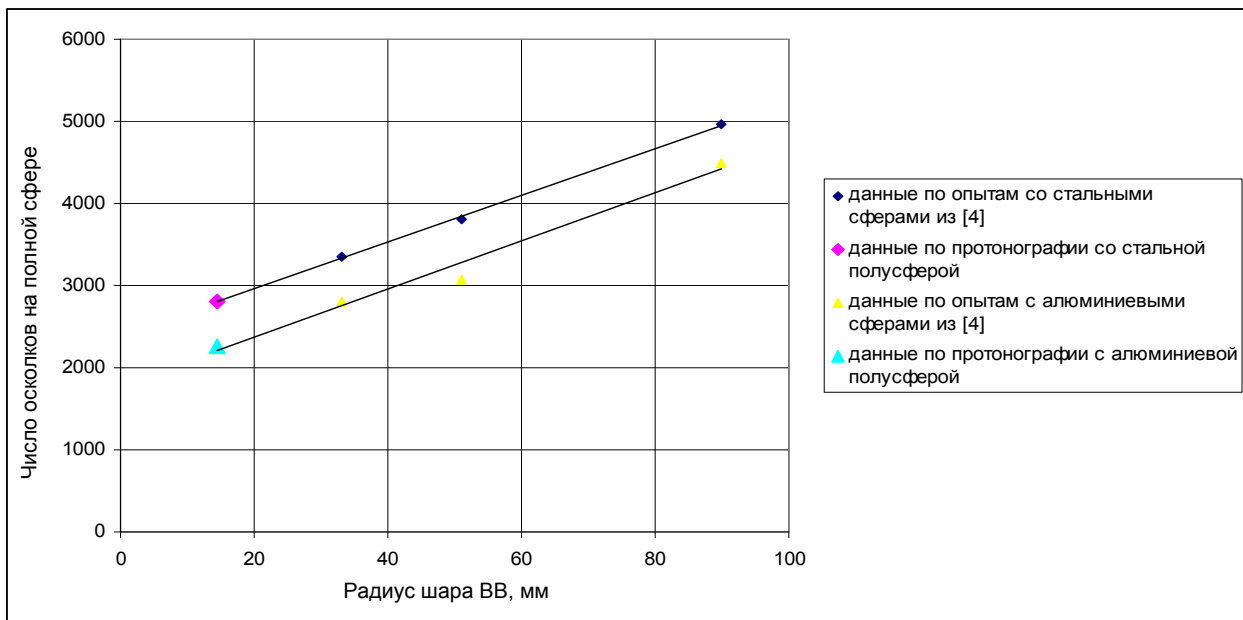


Рис. 9. Сравнение проведенных опытов по фрагментации оболочек при взрыве прилегающего шарового заряда ВВ

### Литература

1. Киселев А. Б. Простейшие математические модели разрушения космического аппарата при взрыве // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 2. С. 159–165.

2. Киселев А. Б. Математическое моделирование взрывного разрушения сферических оболочек с образованием двух фракций осколков // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика. Механика. 1999, № 2. С. 41–48.

3. Величко О. М., Губкова Г. Н., Дерюгин Ю. Н. и др. Пакеты программ для решения многомерных

задач газовой динамики разностным методом Годунова // Сб. докл. научной конференции Волжского регионального центра РАН АН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», 2000.

4. Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Цой А. П. Дробление сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Проблемы прочности. 2001, № 2. С. 78–87.

5. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: Российский федеральный ядерный центр-ВНИИЭФ, 2001.