

МИНИАТЮРНОЕ СФЕРИЧЕСКОЕ ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

УДК 662.215.2

Е. В. Зотов, Н. Н. Гердюков, Л. В. Володина

ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Саров

С помощью нескольких методик исследовано взрывное устройство в виде тонкостенной сферической ампулы, заполненной гомогенным жидким взрывчатым веществом (ЖВВ) минимальной массой $\sim 0,1$ г или кварцевым песком, пропитанным ЖВВ. Показано, что исследованная конструкция ампулы в сочетании с электроискровым иницированием в центре ампулы обеспечивает практически симметричный разлет продуктов взрыва и инертного материала, гарантирующий одномерное нагружение концентрично расположенных сферических оболочек. Установлено, что использование порошкообразных инертных материалов расширяет диапазон применения устройства, в частности, за счет более плавного, эшелонированного нагружения.

Одним из методов исследования динамических прочностных свойств конструкционных материалов является внутреннее взрывное нагружение оболочек. Рассмотренный в работе [1] способ определения вязкоупругих характеристик основан на анализе затухания собственных колебаний толстостенных сферических оболочек вследствие рассеяния упругой энергии в процессе колебаний. Собственные радиальные колебания оболочки возбуждаются в результате центрально-симметричного взрывного нагружения с использованием жидкого взрывчатого вещества (ЖВВ), помещенного в сферическую ампулу. Основным аргументом в пользу выбора ЖВВ было то, что оно инициируется непосредственно электрическим искровым разрядом [2] и не требует вспомогательных средств иницирования, разлет продуктов взрыва (ПВ) которых может влиять на характер нагружения. В экспериментах со стальной оболочкой [1] предельная масса ЖВВ, при которой не происходило пластического деформирования, равнялась 15 г. При испытаниях оболочек сравнимых размеров из полимерных и композитных материалов предельная масса ЖВВ должна составлять доли грамма. В настоящей работе изложены некоторые результаты экспериментальной отработки миниатюрного сферического взрывного нагружающего устройства с ЖВВ. Особое внимание уделено факторам, влияющим на симметрию и динамику нагружения.

Техника эксперимента. Сферическая оболочка ампулы, конструкция которой показана на рис. 1, состоит из двух полусферических деталей из ПММА с замковым соединением по экватору. В полюсах оболочки имеются заливочные отверстия (одно для заполнения ампулы жидким ВВ, другое для выхода воздуха). Electroды в виде двух скрученных медных проволок диаметром 0,13 мм закреплены эпоксидным клеем. В центре полости оболочки между электродами образован зазор $l = 0,1 \div 0,15$ мм. Для испытаний были изготовлены ампулы нескольких типоразмеров с внутренним радиусом $R_{вн} = 2,5 \div 5,4$ мм, при этом толщина стенки определялась из условия постоянства соотношения массы обо-

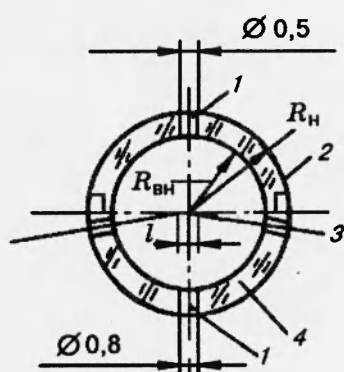


Рис. 1. Конструкция ампулы:

1 — заливочные отверстия; 2, 4 — полусферические детали; 3 — электроды; $R_{вн}$, $R_{н}$ — внутренний и наружный радиусы ампулы

лочки и массы ЖВВ $m_{об}/m_{ЖВВ} = 0,4$. В качестве ЖВВ применялся раствор нитробензола в тетранитрометане в массовом соотношении 26/74 с плотностью $1,5 \text{ г/см}^3$, скоростью детонации $7,5 \text{ мм/мкс}$ и критическим диаметром $0,05 \text{ мм}$ [3]. При наличии жестких стенок детонация распространяется с нормальной скоростью в слоях толщиной вплоть до $0,015 \text{ мм}$ [4]. В результате высоковольтного пробоя ЖВВ от точки инициирования, соответствующей середине межэлектродного промежутка, распространяется сферическая детонационная волна [2]. Влияние электродов на детонационный процесс в этом ЖВВ отсутствует.

В некоторых опытах ампулы заполнялись кварцевым песком, пропитанным ЖВВ. Применение кварцевого песка позволяет дополнительно уменьшать массу ЖВВ и изменять условия нагружения. Размеры частиц кварца $0,1\text{--}0,2 \text{ мм}$. Объемное содержание песка $62\text{--}64,5 \%$, массовое — $73\text{--}76 \%$. Экспериментально показано, что в гетерогенной среде, состоящей из кварцевого песка насыпной плотности, пропитанного ЖВВ, возможно электроискровое инициирование ЖВВ с последующим распространением детонации по жидкостным каналам между частицами. Скорость волнового процесса в такой среде $\sim 7,2 \text{ мм/мкс}$. В ампулах с кварцевым песком отношение массы инерта (оболочки и кварцевого песка) к массе ЖВВ составляло в среднем $4,15$.

В ходе экспериментов осуществлялась фотохронографическая регистрация процессов в режиме покадровой киносъемки или непрерывной щелевой развертки с помощью камеры ВКФ-13 [5]. Оценивалось воздействие инертных частиц на лавсановую пленку толщиной $0,2 \text{ мм}$, установленную перпендикулярно радиусу на расстоянии 75 мм от центра ампулы. Проводилось измерение амплитуды и длительности импульса давления, создаваемого воздействием на преграду воздушной ударной волны (УВ) и ПВ в сочетании с инертными частицами. Для этого использовались пьезоэлектрические датчики давления ПДД-1 [6], помещенные между латунными стержнями, согласующимися с ними по акустическому импедансу. Торце стержня устанавливался на расстоянии 75 мм от ампулы. Электрические импульсы с датчика регистрировались посредством цифрового измерительного комплекса с дискретностью $0,2 \text{ мкс}$. Погрешность амплитудных измерений $\leq 15 \%$, временных — $\leq 5 \%$.

Разлет ампулы при инициировании гомогенного ЖВВ. На рис. 2 представлены типичные фотохронограммы, полученные при фоторегистрации собственного свечения процесса и на фоне импульсной подсветки. На кинограммах указано время в микросекундах относительно нулевого кадра. Анализ хронограмм показывает, что воздушная УВ и пылевидный слой разрушенной оболочки в основном сохраняют центральную симметрию.

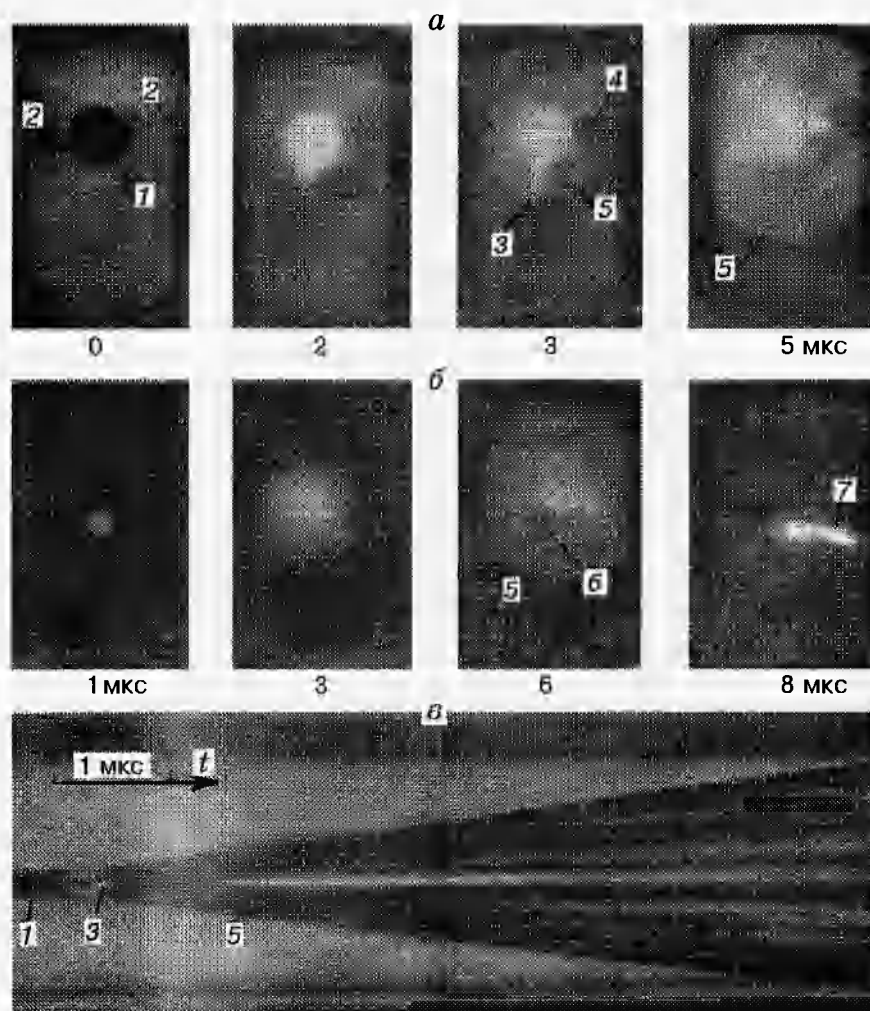


Рис. 2. Фотохронограммы начальной стадии разлета ампул с однородным ЖВВ:

а, б — регистрация на фоне импульсной подсветки; *б* — регистрация собственного свечения процесса; 1 — ампула; 2 — электроды; 3 — ПВ; 4 — «теневая» зона; 5 — внешняя граница оболочки или фронта воздушной УВ; 6 — возмущение от заливочного отверстия; 7 — канал разряда; $R_{\text{вн}} = 4$ (*а*) и 2,5 мм (*б, в*)

На основании результатов обработки изображений, полученных в опытах для ампул с $R_{\text{вн}} = 2,5 \div 4$ мм, проведена оценка мгновенной скорости движения микроосколков оболочки в различные моменты времени. Так, при $t = 1 \div 5$ и $6 \div 9$ мкс $u = 3 \div 3,6$ и $2,3 \div 3$ мм/мкс соответственно. В опытах с регистрацией более поздней стадии разлета частиц (на расстоянии 75 мм от центра ампулы) максимальная скорость не превышала 2,3 мм/мкс.

Разлет ампулы с кварцевым песком, пропитанным ЖВВ. На рис. 3 представлены типичные фотохронограммы ранней стадии разлета ампул с кварцевым песком. Качественную сторону картины разлета на более поздней стадии дополняют кадры кинограммы на рис. 4, полученной в эксперименте на фоне взрывной подсветки. На расстоянии 60 мм от центра ампулы устанавливался экран из кальки (расстояние между concentрическими окружностями на экране 50 мм).

После непродолжительного плавного расширения оболочка ампулы разрушается, и

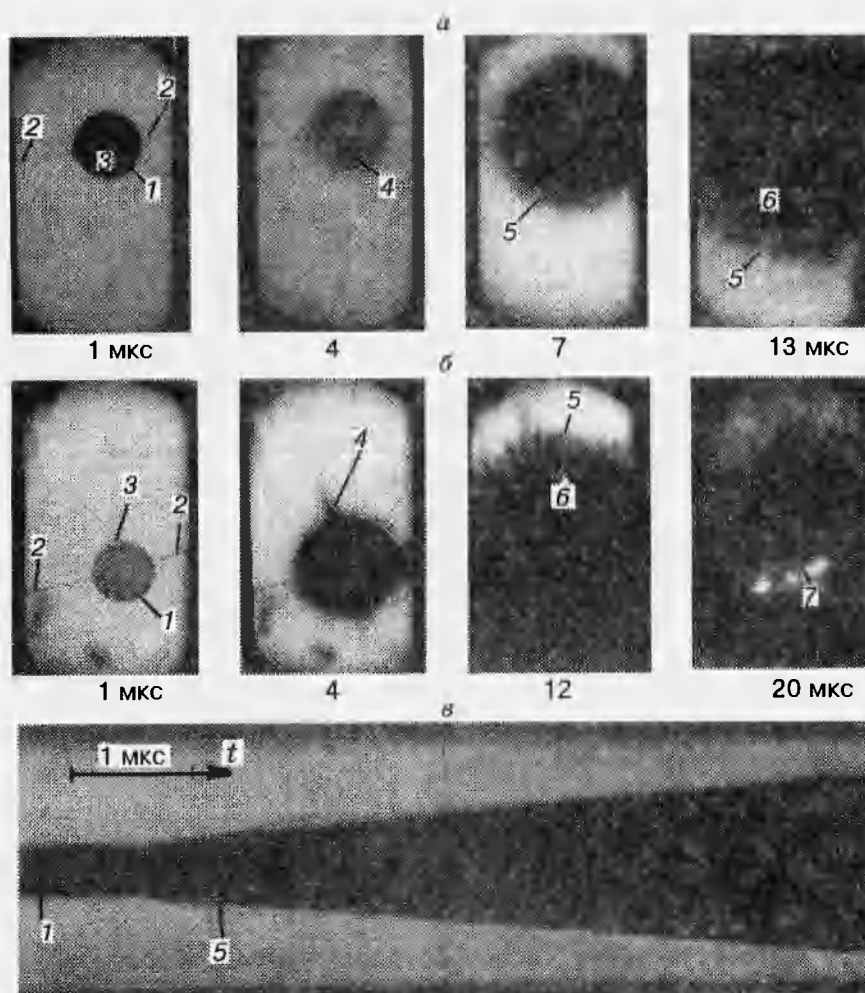


Рис. 3. Фотохронограммы начальной стадии разлета ампул с кварцевым песком, пропитанным ЖВВ, при различной ориентации заливочных отверстий:
 1 — ампула; 2 — электроды; 3 — заливочное отверстие; 4 — возмущение от заливочного отверстия;
 5 — внешняя граница оболочки; 6 — внешняя граница кварцевого песка; 7 — канал разряда;
 $R_{вн}$, мм: а — 4,6, б — 4,0, в — 5,4

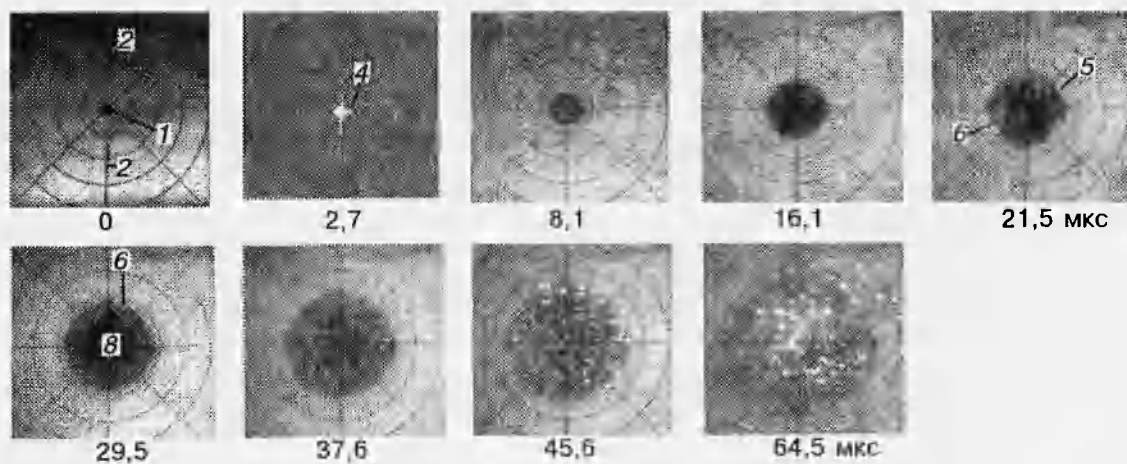


Рис. 4. Кинограмма разлета ампулы с кварцевым песком, пропитанным ЖВВ:
 8 — центральная зона кварцевого песка; $R_{вн} = 5,0$ мм; остальные обозначения см. на рис. 3

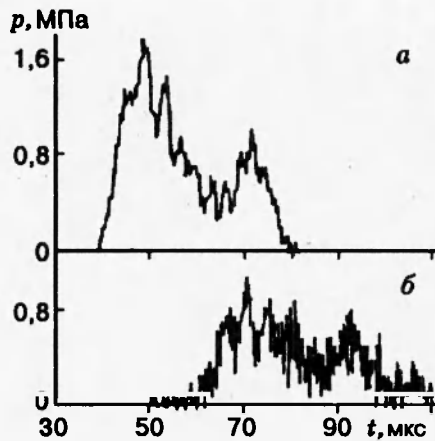


Рис. 5

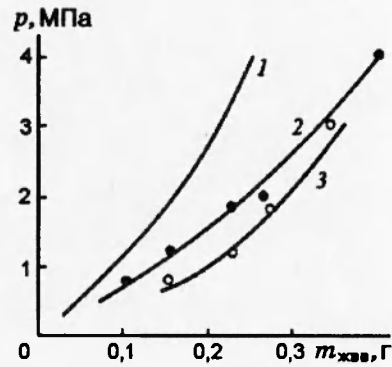


Рис. 6

Рис. 5. Типичные записи импульса давления при взрыве ампул с гомогенным ЖВВ (а) и с кварцевым песком, пропитанным ЖВВ той же массы (б):

$R_{\text{вн}} = 3,2$ (а) и $4,6$ мм (б)

Рис. 6. Расчетная и экспериментальные зависимости давления от массы ЖВВ

продукты взрыва прорываются по образовавшимся трещинам в виде микроструй. Центр условной границы разлета оболочки совпадает с начальным положением центра ампулы. На более поздних стадиях разлета ампулы можно выделить две зоны (см. рис. 3, $t = 12, 13$ мкс): более прозрачную внешнюю зону, состоящую из осколков оболочки из оргстекла, и темную зону кварцевого песка. Еще позднее (см. рис. 4) на фоне расширяющегося облака из частиц кварцевого песка наблюдается почти неподвижная центральная зона.

В серии опытов для ампул с $R_{\text{вн}} = 4,0 \div 5,4$ мм начальная скорость разлета осколков оболочки равна $2,3 \div 2,8$ мм/мкс. Спустя промежуток времени ≈ 10 мкс мгновенная скорость уменьшается до значений $1,7 \div 2,5$ мм/мкс, а при $t \approx 40$ мкс она не превышает $1,7$ мм/мкс. Граница песка в это время расширяется со скоростью $\sim 0,8$ мм/мкс. Приведенные значения скоростей следует считать оценочными из-за субъективного выделения границ различных зон. Дополнительная информация может быть получена по моментам появления сквозных отверстий в экране.

Результаты измерения давления. На рис. 5 приведены типичные записи импульса давления. Фронт импульса при взрыве ампулы с кварцевым песком более пологий, чем при взрыве ампулы с гомогенным ЖВВ (~ 15 и ~ 5 мкс соответственно). Это обеспечивает более плавное, эшелонированное нагружение испытываемых оболочек из композитных или полимерных материалов или других объектов.

Зависимости амплитуды давления от массы ЖВВ приведены на рис. 6. Анализ независимых результатов измерения давления позволяет сделать следующие выводы. В случае взрыва ампулы с чистым ЖВВ перед фронтом воздушной УВ летят осколки оболочки, средняя скорость которых на расстоянии $R = 75$ мм $\bar{u}_{об} = 2 \div 2,3$ мм/мкс. Средняя скорость УВ с увеличением массы ЖВВ возрастает от $1,35$ мм/мкс при $m_{\text{ЖВВ}} = 0,1$ г до $2,1$ мм/мкс при $m_{\text{ЖВВ}} = 0,4$ г. При этом давление во фронте УВ возрастает от $0,8$ до 4 МПа (линия 2 на рис. 6). В случае взрыва ампул с гетерогенным составом $\bar{u}_{об} = 1,4 \div 1,5$ мм/мкс.

Средняя скорость фронта (границы) основной массы кварцевого песка увеличивается от 1,2 мм/мкс при $m_{ЖВВ} = 0,15$ г до 1,45 мм/мкс при $m_{ЖВВ} = 0,34$ г; амплитуда давления при этом изменяется от 0,8 до 3 МПа (линия 3 на рис. 6). При одинаковой массе ЖВВ средняя скорость воздушной УВ на 20–30 % больше скорости кварцевого песка. Давление в исследуемом диапазоне при взрыве ампул с гетерогенным составом на 15–50 % меньше, чем при взрыве ампул с той же массой гомогенного ЖВВ.

Экспериментальные результаты исследования разлета ампулы с песком и их интерпретация качественно согласуются с работой [7], в которой численно исследуется разлет продуктов детонации конденсированного ВВ с твердофазными включениями. Так, в частности, твердые частицы опережают продукты детонации и ударную волну.

Длительность импульса давления для обоих способов заполнения ампулы практически одна и та же и равна 40–60 мкс. Оценка давления, действующего на датчик при взрыве ампулы с чистым ЖВВ, может быть проведена по эмпирическим формулам Садовского для сферического заряда [3]. На рис. 6 расчетная зависимость давления от массы ЖВВ (без оболочки) показана линией 1.

Допуская, что энергия взрыва ЖВВ идет только на разгон осколков оболочки (с кинетической энергией $(m_{об} \cdot \bar{u}_{об}^2)/2$) и на формирование воздушной УВ, получим (при теплоте взрыва ЖВВ и тротила $5,86 \cdot 10^3$ и $4,32 \cdot 10^3$ Дж/г соответственно и $m_{об} = 0,06$ г, $m_{ЖВВ} = 0,15$ г, $\bar{u}_{об} = 2,2$ мм/мкс, $R = 75$ мм) амплитуду давления в проходящей волне 0,36 МПа, отраженное давление 1,44 МПа. В опыте для ампул с $R_{вн} = 2,9$ мм зарегистрировано давление 1,2 МПа. Для такой же оценки максимального давления при взрыве ампулы с гетерогенным составом из энергии ЖВВ дополнительно вычитается кинетическая энергия кварцевого песка с массой $m_{п}$. При той же массе ЖВВ (при $m_{об} = 0,18$ г, $m_{п} = 0,42$ г, $\bar{u}_{об} = 1,4$ мм/мкс, $\bar{u}_{п} = 1,2$ мм/мкс, $R = 75$ мм) получим амплитуду давления в проходящей волне 0,27 МПа, отраженное давление 1 МПа. В опыте для ампул с $R_{вн} = 4,0$ мм зарегистрировано давление 0,8 МПа. Таким образом, и оценки, и эксперимент показывают снижение амплитуды действующего давления в $\sim 1,5$ раза.

Симметрия разлета. Наличие некоторых конструктивных и технологических элементов (незаглушаемые заливочные отверстия, экваториальный стык, неоднородность оболочки ампулы в местах крепления электродов) не позволяет считать ампулу идеально симметричной. Возможно также (при нарушении технологии) неравномерное заполнение ампулы кварцевым песком.

Анализ хронограмм опытов с гомогенным ЖВВ показывает, что воздушная УВ (в начальной стадии) и пылевидный слой разрушенной оболочки в основном сохраняют центральную симметрию (см. рис. 2, а, б). Исключение составляют начальные микроструи ПВ в заливочных отверстиях и «тенева» зона электродов. В опытах с лавсановым экраном следы осколков наблюдаются только в кольцевой зоне от верхнего заливочного отверстия (см. рис. 2, б) и в области электродов.

В экспериментах с пропитанным кварцевым песком также сохраняется центральная симметрия (см. рис. 3, а, б и рис. 4), искажаемая лишь выбросом порции кварцевого песка из заливочных отверстий. С течением времени относительное опережение сгустка уменьшается, и он «рассасывается». В общем случае экран из лавсана под действием частиц кварца покрывается равномерной рябью в виде микрократеров, за исключением «тени» от подводных проводников. Более крупные осколки оболочки пробивают экраны (см. рис. 4). В серийных испытаниях эти локальные возмущения могут быть уменьшены при уменьшении массы оболочек, например, заменой ПММА выдавленной пленкой из лавсана.

В заключение отметим, что диапазон применения настоящего устройства может быть существенно расширен. Этого можно достичь варьированием в широких пределах массой ЖВВ (минимальное значение $\sim 0,1$ г, максимальное не ограничено) за счет изменения объема ампулы и пропитки жидким ВВ различных порошкообразных инертных веществ. Появляется также возможность плавного (эшелонированного) нагружения испытуемых объектов за счет движения с разной скоростью осколков оболочки, фронта воздушной УВ и порошкообразного материала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-16504).

ЛИТЕРАТУРА

1. Володина Л. В., Зотов Е. В., Красовский Г. Б. и др. Динамика вязкоупругих сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 91–95.
2. Зотов Е. В., Козырев А. С., Бабадей С. М. и др. Иницирование детонации растворов нитробензола в тетранитрометане в канале электрического искрового разряда // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 4. С. 110–114.
3. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
4. Зотов Е. В., Красовский Г. Б., Рыжова В. Н. Предельные условия распространения детонации в жидких растворах нитробензола в тетранитрометане и фторнитроформе // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 1. С. 111–115.
5. Решеткин В. И., Дьяков Н. Ф., Мальцева А. В. и др. Высокоскоростная фото-регистрирующая камера ВКФ-13 // Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекающих процессов: Тез. докл. 14 Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1989. С. 12.
6. Бодренко С. И., Гердюков Н. Н., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Применение кварцевых датчиков давления для исследования ударно-волновых процессов // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 146–148.
7. Лановец В. С., Левин В. А., Рогов Н. К. и др. Разлет продуктов детонации конденсированного ВВ с твердофазными включениями // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 88–92.

Поступила в редакцию 12/IX 1994 г.
