

УДК 541.541:544.454

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА АЛЮМИНИЗИРОВАННЫЕ ЛИТЬЕВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Д. Н. Садовничий¹, Ю. М. Милёхин¹, Ю. Г. Калинин², Е. Д. Казаков^{2,3},
Г. С. Лавров¹, К. Ю. Шереметьев¹

¹Федеральный центр двойных технологий «Союз», 140090 Дзержинский, soyuz@fcddt.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182 Москва

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Москва

Методами электронно-оптической хронографии с наносекундным разрешением, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа изучены особенности разрушения энергетической конденсированной системы на основе тринитрата глицерина, полиэфируретана и алюминиевого порошка от воздействия пучка релятивистских электронов с максимальной энергией 310 кэВ, полной длительностью $170 \div 180$ нс и средней плотностью потока $200 \div 215$ Дж/см². Обсуждается влияние генерации импульсных электрических полей и ударно-волновых нагрузок, сопровождающих поглощение пучка релятивистских электронов, на возникающие в образцах энергетических конденсированных систем механические повреждения.

Ключевые слова: энергетическая конденсированная система, тринитрат глицерина, пучок релятивистских электронов, ударные волны, радиационные эффекты, электризация.

DOI 10.15372/FGV20220210

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перспективным направлением развития взрывчатых составов является разработка многокомпонентных литьевых энергетических конденсированных систем (ЭКС), состоящих из бризантного взрывчатого вещества, окислителя, алюминиевого порошка и полимерной основы [1]. Такие смесевые ЭКС не уступают мощным взрывчатым веществам (типа октоген и гексоген) по параметрам взрыва, но обладают меньшей чувствительностью к механическим воздействиям. Для изучения процессов инициирования взрыва и детонации ЭКС, как правило, используются ударно-волновые эксперименты [2].

Пучки релятивистских электронов (РЭП) позволяют создавать достаточно высокую плотность энергии, выделяемой в мишени на глубине пробега электронов, и способны вызывать детонацию кристаллов бризантных взрывчатых веществ [3–6]. По сравнению с традиционными способами инициирования ударных волн, отличительной особенностью РЭП

является достаточно интенсивная электризация диэлектрических мишеней [7, 8].

Для инициирования литевых ЭКС пучками релятивистских электронов необходимо учитывать их гетерогенность. В первом приближении обеспечение осреднения энерговыделения от воздействия РЭП в элементарном объеме ЭКС достигается, когда максимальный пробег электронов пучка превышает диаметр дисперсных частиц не менее чем в 10 раз. Это резко ограничивает возможности сильноточных электронных ускорителей для изучения превращений в литевых ЭКС.

При изучении ударно-волновых процессов в литевых ЭКС важно обеспечить не менее чем двукратное превышение диаметра РЭП на мишени по сравнению с толщиной мишени. Кроме того, надо учитывать, что критические диаметры детонации литевых ЭКС достигают 6 мм [9]. Для снижения влияния боковой разгрузки и нежелательных сдвиговых деформаций диаметр РЭП на мишени должен превышать 12 мм.

Генерируемые ускорителем «Кальмар» (Россия) РЭП позволяют создавать ударно-волновые нагрузки на площади 3 см² при энер-

гии РЭП до 350 кэВ, вызывающие как интенсивную абляцию, так и откольные разрушения полимерных и композиционных материалов [10–13]. В работе [14] при воздействии потока электронов ускорителя «Кальмар» с плотностью потока энергии 200 Дж/см^2 наблюдалась детонация литевой ЭКС на основе тринитрата глицерина, перхлората аммония и алюминия. В работах [15, 16] показано, что увеличение содержания алюминиевого порошка вызывает снижение скорости детонации и давления возбуждения детонации ЭКС, а теплота взрывного превращения при этом повышается. Для изучения особенностей распространения ударной волны в литевых ЭКС на основе тринитрата глицерина при воздействии РЭП представляет интерес выполнить эксперименты с ЭКС, в которых перхлорат аммония полностью заменен алюминиевым порошком.

Целью настоящей работы было изучение особенностей воздействия наносекундного пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» на отвержденные литевые энергетические конденсированные системы, содержащие тринитрат глицерина и алюминиевый порошок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали плоские образцы ЭКС размером $35 \times 35 \text{ мм}$ и толщиной 5 мм, состоящие из тринитрата глицерина, полиэфируретана и порошка алюминия в соотношении 25.8/4.2/70 (мас. %), отвержденные ароматическим динитрилоксидом. Средний диаметр частиц $\text{Al} \approx 5 \text{ мкм}$. Отверждение выполнено в режиме, исключающем седиментацию частиц алюминия.

Схема проведения экспериментов на ускорителе «Кальмар» [17] представлена на рис. 1. Образцы ЭКС закрепляли на аноде из стали 12Х18Н10Т, имеющем вырез прямоугольной формы под образец ЭКС и боковую щель для наблюдения кинетики разлета.

РЭП формировался в диоде ускорителя с катодом из латуни ЛС59-1 диаметром 10 мм. Зазор между катодом и поверхностью образца ЭКС в экспериментах составлял $4 \div 6 \text{ мм}$. Тыльной стороной образец ЭКС плотно прижимался к пластине из органического стекла (ГОСТ 10667-90 марки СО-120-К) толщиной 4 мм, которая закреплялась на аноде таким образом, чтобы образец ЭКС не касался анода. Диаметр пятна облучения контролировали по

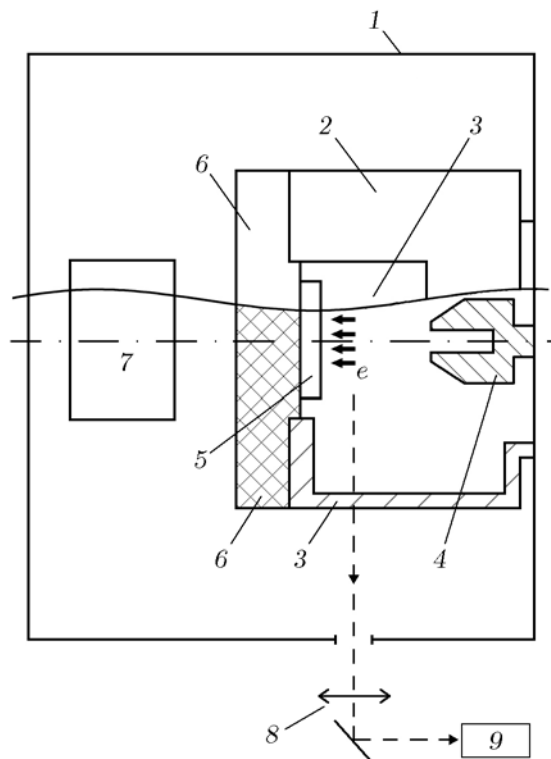


Рис. 1. Схема облучения на ускорителе «Кальмар»:

1 — вакуумная камера, 2 — анод, 3 — прорез в аноде для наблюдения разлета плазмы, 4 — катод, 5 — исследуемый образец, 6 — подложка из оргстекла, 7 — камера обскуры, 8 — фокусирующая линза, 9 — электронно-оптическая камера; штриховой линией обозначен оптический тракт

распределению интенсивности рентгеновского излучения в его изображении, полученном с помощью рентгеновской камеры обскуры, расположенной за образцом. Распространение катодной и анодной плазмы вдоль оси диода ускорителя «Кальмар» регистрировалось по ее оптическому излучению электронно-оптической хронографической камерой СФЭР-6 (Россия) [11]. Скорость абляции материала определяли по скорости перемещения границы светящейся области над поверхностью образца.

В каждом эксперименте ток через диод ускорителя и напряжение на катоде регистрировались осциллографом Tektronix TDS 2024B (США) с помощью соответственно низкоиндуктивного шунта и высоковольтного делителя напряжения, расположенных вблизи выходного узла ускорителя «Кальмар». Точность измерения электрических параметров РЭП в эксперименте не превышала $10 \div 15 \%$. Далее параметр

ры конкретного эксперимента приводятся без указания их точности.

Эксперименты выполнялись при поддержании в объеме диода ускорителя динамического вакуума с остаточным давлением не выше 10^{-2} Па, для чего использовался диффузионный насос с предварительной форвакуумной откачкой. Температура испытаний комнатная. В контрольных экспериментах показано, что за время вакуумирования объема диода ускорителя с образцом при подготовке эксперимента (в течение 2 ч) изменение массы образца не превышало 20 мг. Взвешивание осуществляли на аналитических весах ВЛР-20 (Россия) с абсолютной погрешностью 75 мкг.

В экспериментах создавали РЭП ускорителя «Кальмар» с максимальной энергией электронов до 310 кэВ, током пучка ≈ 28 кА и максимальной мощностью $\approx 8.4 \cdot 10^9$ Вт. Типовые осциллограммы кинетики тока пучка I и напряжения на катоде U представлены на рис. 2, а развиваемая мощность N — на рис. 3. Как показали контрольные эксперименты, 85 % энергии пучка сосредоточено на поверхности образца площадью $S = 3$ см². Средняя плотность потока энергии РЭП в экспериментах изменялась от 200 до 215 Дж/см². Полная длительность импульса составляла $170 \div 180$ нс, а длительность на половине амплитудного значения — $60 \div 90$ нс.

Для изучения морфологии поверхности и разломов ЭКС после воздействия РЭП ускорителя «Кальмар» использовали растровый элек-

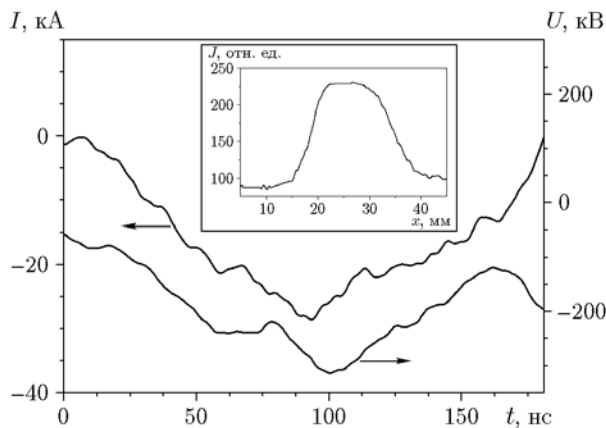


Рис. 2. Типовая зависимость тока и напряжения РЭП ускорителя «Кальмар» от времени: на врезке радиальное распределение плотности энергии РЭП (J) по диаметру пятна облучения (x) по данным камеры обскуры

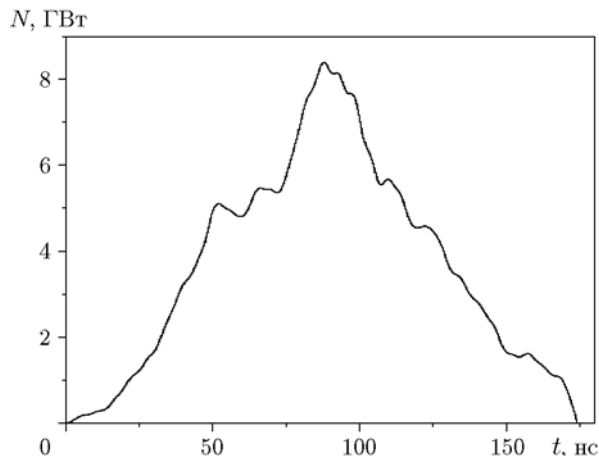


Рис. 3. Типовая зависимость мощности РЭП в ускоряющем зазоре между катодом и анодом от времени (плотность энергии РЭП 200 Дж/см², полная длительность импульса 174 нс)

тронный микроскоп JSM-6490 (Япония) с приставкой для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа QUANTAX (Германия).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 4 приведена типовая щелевая развертка разлета газоплазменных образований в межэлектродном промежутке ускорителя «Кальмар» при воздействии РЭП на образец ЭКС. Появление слабого свечения в анодной области вблизи поверхности ЭКС наблюдается спустя $45 \div 57$ нс после начала воздействия РЭП. Свечение усиливается через $250 \div 290$ нс. До замыкания межэлектродного промежутка (диода) ускорителя «Кальмар» плазмой свече-

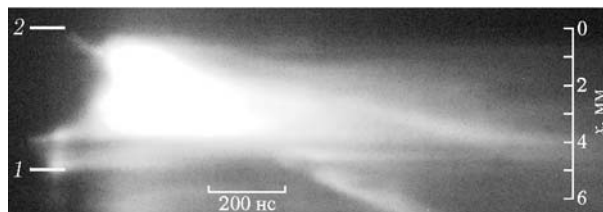


Рис. 4. Щелевая развертка свечения при разлете газоплазменных образований в межэлектродном промежутке ускорителя «Кальмар» при воздействии РЭП на образец ЭКС (плотность энергии РЭП 200 Дж/см², полная длительность импульса 174 нс): 1 — катод, 2 — поверхность образца

ние в прианодной и прикатодной областях диода ускорителя пропадает, что связано с большой оптической плотностью плазмы.

В проведенных экспериментах средняя скорость уноса вещества с облучаемой поверхности образца ЭКС составляла ≈ 8 км/с и была постоянной в течение 150 нс ее надежной регистрации. Полученное значение скорости абляции практически совпадает со скоростью абляции неэнергетических материалов, например эпоксидной смолы, при одинаковой плотности потока энергии РЭП ускорителя «Кальмар» [11].

Типовая фотография поверхности ЭКС после воздействия пучка РЭП показана на рис. 5. Воздействие РЭП сопровождалось образованием сквозной трещины в центральной части пятна облучения с расходящимися от нее $3 \div 4$ радиальными, несимметрично расположенными трещинами, проникающими на всю толщину образца ЭКС. Глубина кратера колеблется от $35 \div 53$ мкм у границы с неповрежденной частью образца (рис. 6) и достигает 340 мкм в области сквозной трещины. В центральной области кратера поверхность ЭКС «гладкая» (зона 1), но на расстояниях более 10 мм от центра кратера становится шероховатой. Это скорее всего связано с различной скоростью деформирования и остаточными температурами, при которых реализуется откол [18, 19]. Обращает на себя внимание наличие множества борозд, ориентированных в направлении от центральной сквозной трещины, вызванных высокоскоростным течением. Важно отметить, что помимо трещин в образцах присутствовали сквоз-

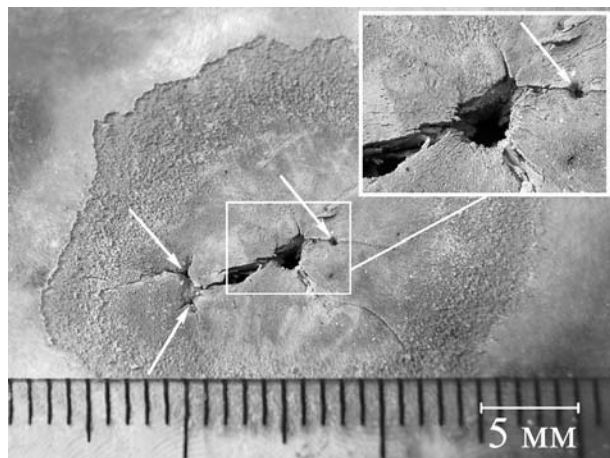


Рис. 5. Типичная фотография облученной поверхности ЭКС после воздействия РЭП

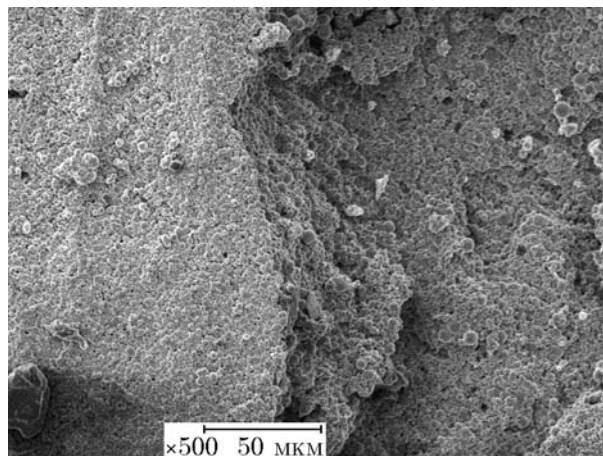


Рис. 6. Типичная микрофотография поверхности ЭКС на границе зоны уноса и сохранившейся части образца после воздействия РЭП

ные отверстия малого радиуса, обозначенные на рис. 5 стрелками.

В кольцевом слое, непосредственно прилегающем к кратеру, наблюдается изменение цвета — серый цвет образца сменяется белым (зона 2), а далее на периферии облучаемой поверхности (зона 3) переходит в налет черного цвета. В четырех проведенных экспериментах воспламенение ЭКС толщиной 5 мм отсутствовало.

Результаты энергодисперсионного анализа элементного состава поверхностных слоев ЭКС после воздействия РЭП (энергия электронов 10 кэВ) представлены в таблице. При удалении от центральной части кратера наблюдаются понижение общего содержания алюминия и рост содержания углерода, кислорода, железа и меди. Обнаруженный элементный состав сформирован химическим составом ЭКС, а также элементами, входящими в состав катодной плазмы ускорителя. Снижение содержания алюминия и повышение содержания кислорода и азота можно объяснить реакциями обра-

Элементный состав поверхности ЭКС
после воздействия РЭП ускорителя «Кальмар»

Зона	Состав, ат. %					
	C	N	O	Al	Fe	Cu
1	26.97	1.88	8.80	61.02	0.39	0.94
2	40.18	2.88	15.75	38.04	0.93	2.22
3	48.32	3.56	20.62	22.94	1.32	3.24

зования оксида и нитрида алюминия, а также неполным разложением ЭКС до углерода и его оседанием на образец из газовой фазы.

Как известно, действие сильноточных ускорителей электронов, работающих по принципу «взрывной эмиссии», всегда сопровождается образованием плазмы из элементов катода, в данном случае латуни [20]. Катодная плазма распространяется в диоде ускорителя (см., например, [5] и рис. 3), однако ввиду малой массы она не способна вызвать значимого ударно-волнового воздействия на ЭКС в облучаемой камере ускорителя «Кальмар». Смещение оптически активной анодной и катодной плазмы достигается при времени ≈ 200 нс от начала процесса, причем на последующих стадиях, когда оптическая плотность плазмы возрастает, не происходит контакта ее наиболее плотной части с поверхностью образца до ≈ 1 мкс. Важно учитывать, что испарение материалов электродов продолжается на втором и последующих полупериодах разряда, когда диодный зазор ускорителя замыкается плазмой [11]. Источником железа выступает анод. Испарением материала анода и катода объясняется появление в поверхностных слоях ЭКС таких элементов, как Cu, Fe. Отметим, что содержание Cu, Fe возрастает в направлении от центральной области воздействия (зона 1) к периферийным областям кратера (зоны 2 и 3).

Микрофотографии разлома образца ЭКС после воздействия РЭП на глубине ≈ 1 мм в плоскости сквозной трещины в центральной

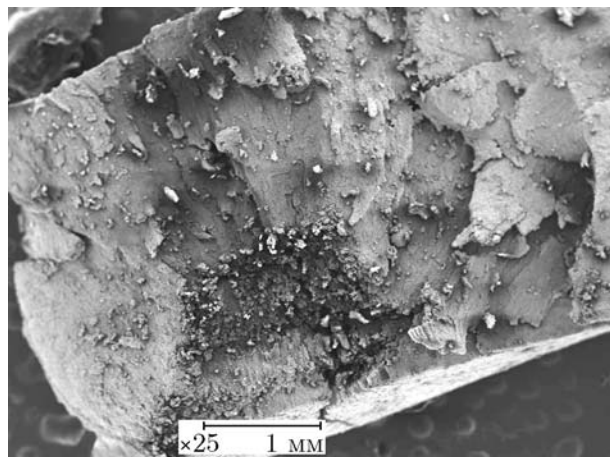


Рис. 7. Типичная микрофотография ЭКС в плоскости разреза сквозного отверстия:

РЭП направлен снизу вверх по нормали к поверхности образца

области кратера обнаруживают полость, в которой наблюдается сплавление частиц алюминия в более крупные агломераты, достигающие диаметра 65 мкм (рис. 7). Это указывает на то, что процесс интенсивного энерговыделения начинался в объеме ЭКС вблизи облучаемой поверхности, однако не распространился на весь объем. Отметим, что на поверхности кратера агломераты такого большого размера отсутствуют (см. рис. 6). Резкая граница кратера указывает на достаточно традиционный для неэнергоемких соединений характер уноса, обусловленный сублимацией или отколом [11].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

При анализе полученных результатов важно учесть, что литьевые ЭКС на основе тринитрата глицерина являются диэлектриками [21]. Поэтому при воздействии РЭП в изучаемых ЭКС возникают достаточно мощные электрические поля, которые ограничены обменом зарядов с плазмой, окружающей облучаемую поверхность, и заземлением мишени. На примере поликарбоната было показано, что максимальный пробег РЭП ускорителя «Кальмар» при рассматриваемых плотностях потока слабо чувствителен к эффекту электризации [22], поэтому влиянием электрического поля на пробег РЭП далее пренебрегали.

Численное моделирование переноса РЭП ускорителя «Кальмар» в образце ЭКС выполнено методом Монте-Карло без учета его гетерогенности, с детальным прослеживанием электронов всех поколений до энергии 1 кэВ [23]. Разыгрывали 10^7 историй первичных частиц. За глубину пробега РЭП принимали толщину мишени, на которой РЭП ослабляется на пять порядков.

Для оценки динамики энерговыделения полную длительность воздействия РЭП разбивали на десять равных временных интервалов по 17.4 нс. Для каждого временного интервала рассчитывалось распределение поглощенной дозы по толщине образца, соответствующее осредненным в данном интервале значениям тока и энергии РЭП. Полученные на каждом временном интервале распределения поглощенных доз с учетом их доли в суммарном токе РЭП далее суммировали, что позволило оценить динамику пространственного изменения поглощенной дозы при воздействии РЭП.

Как видно из расчетов (рис. 8), за первые 52.2 нс воздействия РЭП (кривая 3) глубина

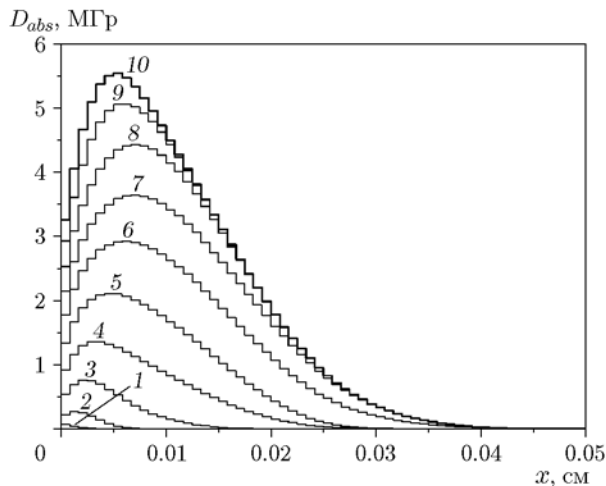


Рис. 8. Изменение во времени распределения поглощенной дозы от воздействия РЭП по толщине образца:

кривые 1–10 соответствуют десяти временным интервалам по 17.4 нс; плотность энергии РЭП 200 Дж/см², мощность РЭП согласно рис. 3

облучения составляет 200 мкм, а энерговыделение на глубине 25 мкм достигает значения $D_{abs} = 0.76$ МГр, что соответствует максимальной мощности дозы $3.7 \cdot 10^7$ МГр/с. Далее энергия электронов пучка повышается и глубина области облучения возрастает. Так, после прохождения максимума тока РЭП при длительности воздействия 104.4 нс (кривая 6) глубина проникновения электронов возрастает до 450 мкм, а энерговыделение на глубине 58 мкм от поверхности достигает 2.9 МГр, при этом мощность дозы увеличивается до $4.8 \cdot 10^7$ МГр/с. Максимальный пробег электронов пучка ускорителя «Кальмар» составлял 520 мкм.

Зная энерговыделение от действия потока РЭП в ЭКС, можно оценить параметры возникающей ударной волны. Поскольку скорости абляции изучаемой ЭКС и неэнергетического материала (эпоксидной смолы) при одинаковых уровнях РЭП совпадают, в первом приближении при расчете параметров ударно-волновых нагрузок будем пренебрегать вкладом от разложения ЭКС в ударной волне. Для моделирования динамики ударных волн использовали систему уравнений газодинамики в одномерной постановке в форме Лагранжа, в которой не учитывается вклад девиаторных напряжений и процессов релаксации [18]. Система уравнений газодинамики замыкается

уравнением состояния типа Ми — Грюнайзена, справедливым для небольших степеней сжатия:

$$p(x, t) = \rho_0 c_0^2 (1 - \rho/\rho_0) + \rho_0 \Gamma Q(x, t),$$

где p — давление, Γ — эффективный коэффициент Грюнайзена, c_0 — скорость звука, ρ_0 и ρ — начальная и текущая плотность, Q — энерговыделение от воздействия РЭП.

Численные решения получены по классической конечно-разностной явной схеме на лагранжевой сетке типа «крест» второго порядка точности по пространству и времени [24] с использованием ударной адиабаты вещества в виде $D = a + bu$ (D — скорость ударной волны, u — массовая скорость). Шаг пространственной сетки выбирался исходя из значений числа Куранта в диапазоне $0.1 \div 0.25$, что обеспечило устойчивость численного решения.

В гетерогенном материале энерговыделение от РЭП является неравновесным, что обусловлено различными свойствами компонентов композита, а также их тепловым и механическим взаимодействием. Поэтому коэффициент Грюнайзена будет не только характеристикой материала, но и параметром самого процесса нагрева. Как показано в работах [22, 25] для композиционных материалов, наполненных дисперсными частицами микронных размеров, эффективный коэффициент Грюнайзена составляет $0.6 \div 1.1$ и не превышает таковой для полимерного связующего. В дальнейших расчетах коэффициент Грюнайзена принимали равным 0.8. В исследуемом диапазоне давлений использовали ударную адиабату ЭКС $D = 2.4 + 1.6u$ (здесь размерность D и u — км/с) и откольную прочность — 0.2 ГПа [26–29]. Ударную адиабату и откольную прочность оргстекла принимали согласно [18]. Энергию сублимации полагали равной 1 кДж/г [30]. Считали, что лицевой откол происходит мгновенно при достижении откольной прочности [18].

Полученное расчетное изменение формы импульса давления представлено на рис. 9. Видно, что максимальное давление в слоях ЭКС вблизи облучаемой поверхности достигает 2.9 ГПа, а лицевой откол ЭКС (соответствующий достижению прочности 0.2 ГПа) происходит на глубину 250 мкм за время 270 нс. Полученный результат неплохо совпадает с экспериментально измеренной максимальной глубиной центральной области кратера в ЭКС — 340 мкм. Обращает на себя внимание близость

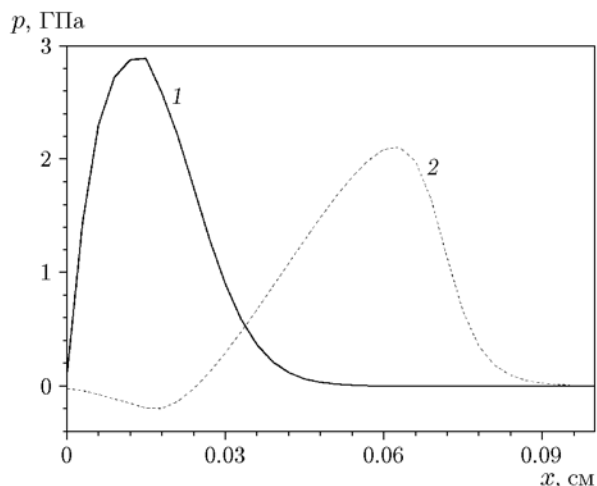


Рис. 9. Изменение давления ударной волны при ее распространении в образце в моменты времени 0.10 (1) и 0.27 мкс (2) в ЭКС:

плотность энергии РЭП 200 Дж/см², мощность РЭП согласно рис. 3

полученного времени откола с экспериментально обнаруженным усилением свечения плазмы вблизи поверхности ЭКС при 250 ÷ 290 нс. Учитывая оценочный характер расчета, совпадение вполне удовлетворительное. Отметим, что при увеличении энергии сублимации до 3 кДж/см² и прочих равных условиях максимальное давление достигает 3.3 ГПа, а лицевой откол ожидается уже за 310 нс. Довольно слабое, в пределах 5 %, влияние на результаты расчетов оказывает изменение значения коэффициента b от 1.3 до 2.0.

При лицевом отколе происходит унос как алюминиевых частиц, так и более низкокипящих компонентов полимерного горючего связующего ЭКС. Действительно, в зоне 1 нами отмечается незначительное снижение содержания алюминия по сравнению с исходной рецептурой ЭКС. А оседание продуктов «взрывной эмиссии» катода и плазмы, образованной действием РЭП на аноде ускорителя «Кальмар», начинается уже после завершения лицевого откола ЭКС и соответствует минимуму именно в зоне 1.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время общепринято, что при относительно небольших давлениях инициирование детонации связано с образованием горячих точек [2, 31]. Если температура во фронте ударной волны превышает некоторую ха-

рактеристическую для данного вещества температуру (как правило ≈ 1000 К), то за время ≈ 1 нс происходит воспламенение очага и его дальнейшее распространение в образце [31]. Выполненные в последнее время пирометрические измерения обнаружили температуры горячих точек более 4000 К при высокоскоростном ударе (≈ 2.5 км/с, длительность ≈ 5 нс) по флегматизированным образцам триаминотринитробензола [32] и пентаэритриттетранитрата [33]. Близкая оценка ≈ 3000 К получена при детонации тетранитропентаэритрита наносекундным электронным пучком [6].

Считая удельную теплоемкость ЭКС пропорциональной массовым долям полимерного горючего, связующего и алюминия, получаем оценку 1 кДж/(кг·К) [34]. В принципе при столь высокой поглощенной дозе от действия РЭП на ЭКС возможно дополнительное тепловыделение, связанное с протеканием радиационно-химических реакций [35], однако в отсутствие цепного процесса разложения ЭКС эффект не превысит 20 % от энерговыделения, вызванного поглощением РЭП [36]. Пренебрегая температурной зависимостью теплоемкости, при длительности воздействия РЭП 90 нс (кривая 5 на рис. 8) получаем, что консервативная оценка температуры составляет более 1000 К на толщине образца ЭКС 120 мкм, а при длительности 160 нс температура этого слоя превышает 3000 К. То есть критерий инициирования детонации в ЭКС можно считать выполненным. Однако не только детонации, но воспламенения образцов ЭКС не происходило.

Интересно отметить, что при воздействии РЭП за время 52.2 нс температура слоя ЭКС толщиной 25 мкм достигает 1000 К, что почти в два раза больше температуры испарения тринитрата глицерина из ЭКС, установленной методом дифференциальной сканирующей калориметрии [37]. Оценка возникающего давления при реализованном за 52.2 нс энерговыделении от воздействия РЭП по используемой оценочной модели расчета ударно-волновых нагрузок не превышает 0.72 ГПа и этого недостаточно для появления откола. Вполне разумно допустить, что появление слабого свечения вблизи поверхности ЭКС, наблюдаемое в период 45 ÷ 57 нс (см. рис. 4), можно связать с процессом испарения со свободной поверхности тринитрата глицерина.

Экспериментально обнаруженное образование полости в ЭКС после воздействия РЭП

ускорителя «Кальмар» показывает, что под облучаемой поверхностью ЭКС началось формирование очага с высокой температурой, однако его распространения на весь образец не произошло. Образование агломератов на стенках полости указывает на достижение температур, превышающих температуру плавления оксида алюминия ≈ 2300 К. Глубина расположения и диаметр очага воспламенения значительно превышают максимальный пробег электронов ускорителя «Кальмар».

Для приближенной оценки фазовых и химических превращений, возможных в ЭКС при высоких температурах, выполнены расчеты по программе TERRA [38, 39]. Получено, что при постоянном объеме вследствие низкого коэффициента избытка окислителя в изучаемой ЭКС (0.188) конденсированная фаза продуктов реакции содержит 45 % непрореагировавшего Al, 30 % Al_2O_3 , 12 % AlN и 3 % углерода (остальное — газообразные продукты). Температура в таком очаге достигает 3500 К, а давление 0.43 ГПа.

Интересно отметить, что в аналогичных расчетах для ЭКС, изучавшейся в работе [14], которая характеризуется более высоким коэффициентом избытка окислителя 0.556, полученная температура продуктов сгорания ≈ 4500 К и давление ≈ 2.08 ГПа. Значимое повышение давления в данном случае связано с более низкой долей Al_2O_3 (≈ 35 %) в продуктах сгорания.

Воздействие РЭП ускорителя «Кальмар» на полимерные материалы сопровождается формированием области трещин вблизи облучаемой поверхности полимера, однако они не выходили на тыльную сторону образца [40, 41]. Это отличает поведение ЭКС при воздействии РЭП от неэнергетических полимерных материалов.

Образовавшиеся радиальные трещины и сквозные отверстия в ЭКС при воздействии РЭП очень похожи на последствия субмикросекундного электрического пробоя такого типа ЭКС [42]. Развитие радиальных трещин вызвано появлением тангенциальных напряжений и давления газообразных продуктов разложения в канале электрического пробоя [43].

В экспериментах по воздействию РЭП ускорителя «Кальмар» на полиметилметакрилат (оргстекло), импульсная электрическая прочность которого достаточно высока — более 300 кВ/см, при инъекции заряда РЭП плотностью $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-5}$ Кл/см² (плот-

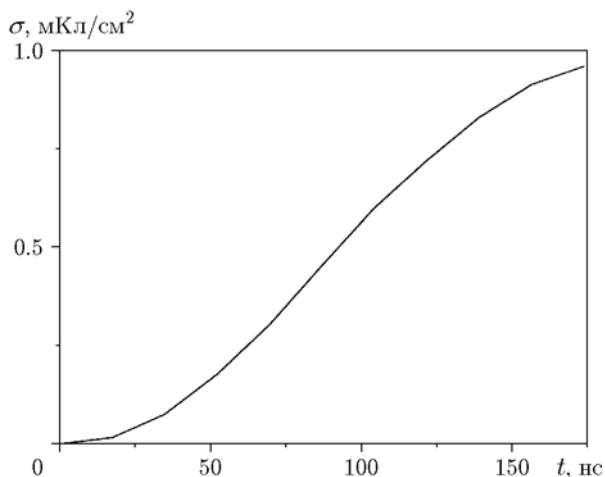


Рис. 10. Кинетика инжектированного в образец ЭКС электрического заряда в процессе действия РЭП:

плотность энергии РЭП 200 Дж/см², мощность РЭП согласно рис. 3

ность тока РЭП 300 А/см²) обнаружены множественные разрядные фигуры Лихтенберга в области торможения РЭП [44]. Плотность инжектированного заряда электронного пучка

$$\sigma(t) = \frac{1}{S} \int_0^t I(t) dt, \text{ достигнутая в эксперимен-}$$

тах с ЭКС весьма велика (рис. 10). Учитывая слабое влияние радиационно-индуцированной электропроводности на генерацию объемного электрического заряда и поля при наносекундных воздействиях электронного излучения, следует ожидать близости скоростей генерации электрических полей в ЭКС и в полиметилметакрилате до наступления электрического пробоя [45]. Оценку напряженности электрического поля без учета стока зарядов в процессах радиационной электропроводности и компенсации объемного заряда при электрическом пробое можно получить по формуле $E = \sigma / \epsilon \epsilon_0$ (ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость ЭКС, измеренная на частоте более 1 МГц, ϵ_0 — электрическая постоянная). При $\epsilon = 30$ [21] уже за 10 нс напряженность электрического поля в области пробега электронов пучка составит 300 кВ/см.

Большое содержание алюминиевого порошка ответственно за формирование неоднородного распределения электрического поля в объеме ЭКС [46]. При этом происходит резкое понижение электрической прочно-

сти композиции, что ограничивает уровни возникающих электрических полей. Электрическая прочность изучаемой ЭКС в интервале длительности действия высокого напряжения $0.1 \div 10$ мкс составляет $14 \div 18$ кВ/см [47]. Потеря электрической прочности при столь малых величинах электрического поля сопровождается формированием в образце сразу нескольких каналов пробоя.

При полной компенсации плазмой в диодном промежутке ускорителя электрического заряда, накопленного в ЭКС, электрическое поле будет сосредоточено только в области проникновения РЭП в образец ЭКС, а за максимальным пробегом электронов пучка электрическое поле должно отсутствовать. Наблюдаемые экспериментально сквозные трещины и отверстия указывают, что достаточное для электрического пробоя электрическое поле (более 14 кВ/см) от воздействия РЭП присутствует в необлучаемой части образца. Плазма в канале электрического пробоя ЭКС обеспечивает сброс накопленной энергии (в наших экспериментах более 600 Дж) от РЭП ускорителя «Кальмар» через образец ЭКС на анод, что сопровождается истечением газоплазменных продуктов с формированием мощной ударной волны и образованием сквозной трещины в образце ЭКС. Отметим, что в экспериментах на высоковольтных генераторах импульсных напряжений столь высокого уровня энерговысвещения (600 Дж) в канал пробоя нам достичь не удалось [42, 47].

Учитывая высокую плотность инжектированного заряда и низкую электрическую прочность алюминизированной ЭКС, формирование множества частичных электрических разрядов следует ожидать в течение всего времени действия РЭП, причем оно будет сопровождаться как перераспределением объемного электрического заряда в объеме ЭКС, так и его выбросом в окружающую образец «диодную» плазму. Частичные электрические пробои в объеме ЭКС могут выступать в качестве горячих точек, способствующих развитию детонационных процессов [48].

В настоящее время сложно ответить на вопрос, в какой момент времени после воздействия РЭП в ЭКС происходит потеря электрической прочности с образованием сквозного канала электрического пробоя, замыкающего катодную и анодную области диода ускорителя «Кальмар». Наличие и форма борозд в крате-

ре, ориентированных от центральной трещины (см. рис. 5), позволяет полагать, что истечение газоплазменных продуктов пробоя из сквозной трещины в образце ЭКС продолжается после появления лицевого откола, вызванного ударно-волновыми процессами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что воздействие пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» с максимальной энергией 310 кэВ, полной длительностью $170 \div 180$ нс и средней плотностью потока $200 \div 215$ Дж/см² не вызывает взрыва или воспламенения образца алюминизированной ЭКС на основе тринитрата глицерина и полиэфируретана.

С помощью метода электронно-оптического хронографирования с наносекундным разрешением показано, что воздействие пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» при плотности потока энергии $200 \div 215$ Дж/см² сопровождается абляцией поверхности ЭКС со скоростью 8 км/с, что практически совпадает со скоростью абляции неэнергетического материала — отвержденной эпоксидной смолы при той же плотности потока энергии РЭП.

Показано, что свечение ЭКС вблизи поверхности, облучаемой РЭП ускорителя «Кальмар», имеет две характерные области. При времени $45 \div 57$ нс начинается свечение слабой интенсивности, которое может быть ассоциировано с испарением тринитрата глицерина из ЭКС или частичными электрическими пробоями в ЭКС, а усиление свечения наблюдается в интервале времени $250 \div 290$ нс, что близко к времени появления лицевого откола, вызванного возникающими в ЭКС ударно-волновыми процессами.

Проведенные оценки показали, что повышения температуры до 1000 К в слое толщиной 120 мкм за время действия РЭП 90 нс недостаточно для инициирования с помощью РЭП литиевого алюминизированного ЭКС.

Обнаружено образование очага высокотемпературного разложения ЭКС на глубине, превышающей пробег РЭП ускорителя «Кальмар», в котором найдены агломераты диаметром до 65 мкм. Проведенные термодинамические расчеты показали возможность достижения температуры, необходимой для плавления оксида алюминия.

Характер механических повреждений образцов ЭКС при воздействии РЭП ускорителя «Кальмар» указывает на реализацию электрического пробоя ЭКС уже за время действия РЭП, что сопровождается снижением уровня генерированного электрического поля и сбросом накопленной в ускорителе энергии через канал пробоя на заземленный контур ускорителя. Электроразрядный механизм позволяет понять образование трещин, сквозных отверстий и полости миллиметрового диаметра в ЭКС от воздействия РЭП.

Таким образом, при изучении последствий воздействия потоков релятивистских электронов с наносекундным фронтом на алюминизированные литьевые ЭКС, помимо классических ударно-волнового и теплового действия, важно учитывать особенности генерации электрических полей и протекание электроразрядных процессов в ЭКС.

Эксперименты на установке «Кальмар» выполнены при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 2073 от 09.10.2020 г.). Авторы признательны С. А. Малинину, Б. Р. Гафарову, А. Н. Осавчуку и Д. В. Бакулину за помощь в проведении работы.

ЛИТЕРАТУРА

- Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субханандра Рао А. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
- Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е. — М.: Физматлит, 2002.
- Бакшаев Ю. Л., Блинов П. И., Долгачев Г. И. Иницирование взрыва ВВ электронным пучком // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 1. — С. 116–118.
- Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Пузынин А. В. Детонация монокристаллов тэна, инициируемая электронным пучком // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 6. — С. 111–118.
- Олешко В. И., Лисицын В. М., Скрипин А. С., Ципилев В. П. Электрический пробой и взрывное разложение монокристаллов тетранитрата пентаэритрита при облучении электронным пучком // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, вып. 9. — С. 37–43.
- Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Спектрально-кинетические характеристики свечения монокристаллов тетранитропентаэритрита, детонирующего при воздействии сильнооточного пучка электронов // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 10. — С. 27–31.
- Олешко В. И., Штанько В. Ф. Генерация сильных электронных полей в области пробега мощного электронного пучка в LiF // Журн. техн. физики. — 1986. — Т. 56, вып. 6. — С. 1235–1236.
- Балычев И. Н., Вайсбурд Д. И., Трофимов В. А. Импульсная электрическая прочность твердых диэлектриков при облучении сильнооточными электронными пучками // Импульсный электрический разряд в диэлектриках. — Новосибирск: Наука, 1985. — С. 134–142.
- Kulikov V. N., Matveev A. A., Osavchuk A. N., Shishov N. I. Experimental studies of multi-component castable explosives detonation characteristics // Progress of Detonation Physics / S. V. Frolov, G. D. Roy (Eds). — Moscow: Torus Press, 2016. — P. 188–196.
- Воробьев О. Ю., Демидов Б. А., Ефремов В. П., Рудаков А. И., Ни А. Л., Морозов П. В., Фортон В. Е. Применение сильнооточного электронного пучка для генерации ударных волн и метания ударников // Письма в ЖТФ. — 1990. — Т. 16, вып. 22. — С. 86–88.
- Ананьев С. С., Багдасаров Г. А., Гасилов В. А., Данько С. А., Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г., Курило А. А., Ольховская О. Г., Стрижаков М. Г., Ткаченко С. И. Исследование динамики анодной плазмы при воздействии мощного электронного пучка на эпоксидную смолу // Физика плазмы. — 2017. — Т. 43, № 7. — С. 608–615. — DOI: 10.7868/S0367292117070022.
- Demidov B. A., Krutikov D. I., Sadovnichii D. N., Kazakov E. D., Kurilo A. A., Strizhakov M. G., Sheremetyev K. Y., Kalinin Y. G., Orlov M. Y., Shashkov A. Y. The study of fiberglass reinforced with carbon nanotubes destruction under a high-current electron beam impact // 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). — 2020. — P. 874–877. — DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242084.
- Ananyev S. S., Dan'ko S. A., Kazakov E. D., Kalinin Yu. G., Kurilo A. A., Strizhakov M. G. Behavior specificities of the plasma in the REB — polymeric anode interactions // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 747. — 012003(1–4). — DOI: 10.1088/1742-6596/747/1/012003.
- Милехин Ю. М., Садовничий Д. Н., Шереметьев К. Ю., Калинин Ю. Г., Казаков Е. Д., Стрижаков М. Г. К вопросу о детонации многокомпонентных энергетических конденсированных систем наносекундным потоком электронов // Докл. РАН. Химия, науки о материалах. — 2020. — Т. 492–493. — С. 38–42. — DOI: 10.31857/S2686953520030103.
- Милехин Ю. М., Осавчук А. Н., Куликов В. Н., Бестужева Т. А., Одинцов

- В. А., Имховик Н. А. Влияние содержания компонентов в мощных взрывчатых составах на их взрывчатые и энергетические характеристики // XIII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — 2011. — С. 189–193.
16. Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин В. Г. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 82–95.
17. Демидов Б. А., Ивкин М. В., Петров В. А., Фанченко С. Д. Импульсный электронный ускоритель «Кальмар-1» с плотностью мощности РЭП до $5 \cdot 10^{12}$ Вт/см² // Атом. энергия. — 1979. — Т. 46, вып. 2. — С. 101–104.
18. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортков В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
19. Мочалова В. М., Уткин А. В., Павленко А. В., Малюгина С. Н., Мокрушин С. С. Импульсное сжатие и растяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // Журн. техн. физики. — 2019. — Т. 89, вып. 1. — С. 126–131.
20. Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Проскуровский Д. Н. Взрывная эмиссия электронов // Успехи физ. наук. — 1975. — Т. 115, № 1. — С. 101–120.
21. Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Малинин С. А., Воропаев И. Д., Богданова Е. В. Диэлектрическая релаксация в энергетических конденсированных системах на основе полиэфируретанового эластомера I. Частотная зависимость // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 5. — С. 132–140. — DOI: 10.15372/FGV20170516.
22. Гафаров Б. Р., Ефремов В. П., Садовничий Д. Н., Демидов Б. А., Фортков В. Е. Генерация давления в гетерогенном материале при неравновесном энерговыделении в компонентах // Хим. физика. — 2001. — Т. 20, № 4. — С. 66–72.
23. Лаппа А. В., Бурмистров Д. С., Васильев О. Н. Расчет микродозиметрических характеристик в воде, облучаемой электронами и гамма-квантами // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Сер. Физика. — 1988. — Т. 2. — С. 77–82.
24. Рождественский Б. П., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений. — М.: Наука, 1978.
25. Демидов Б. А., Ефремов В. П., Ивкин М. В., Мещеряков А. Н., Петров В. А. Воздействие мощных потоков энергии на вакуумную резину // Журн. техн. физики. — 2003. — Т. 73, вып. 6. — С. 130–135.
26. Гафаров Б. Р., Уткин А. В., Разоренов С. В., Богач А. А., Юшков Е. С. Структура фронта слабой ударной волны в высоконаполненных композитах // ПМТФ. — 1999. — Т. 40, № 3. — С. 161–167.
27. Милехин Ю. М., Гафаров Б. Р., Садовничий Д. Н., Уткин А. В., Долгобородов А. Ю., Маршаков В. Н., Мелик-Гайказов Г. В. Особенности поведения высоконаполненных энергетических материалов при умеренном ударно-волновом нагружении // IV Междунар. конф. «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах» (ICOC-2002): сб. тр. — 2004. — С. 115–127.
28. Jordan J. L., Herbold E. B., Sutherland G., Fraser A., Borg J., Richards D. W. Shock equation of state of multi-constituent epoxy-metal particulate composites // J. Appl. Phys. — 2011. — V. 109, N 13. — P. 013531(1–8). — DOI: 10.1063/1.3531579.
29. Li J.-B., Li W.-B., Wang X.-M., Li W.-B. Shock response and prediction model of equation of state for aluminum powder/rubber matrix composites // Mater. Design. — 2020. — V. 191, N 10. — 108632(1–10). — DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108632.
30. Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
31. Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
32. Bassett W. P., Johnson B. P., Dlott D. D. Dynamic absorption in optical pyrometry of hot spots in plastic-bonded triaminotrinitrobenzene // Appl. Phys. Lett. — 2019. — V. 114, N 19. — 194101(1–5).
33. Bassett W. P., Johnson B. P., Neelakantan N. K., Suslick K. S., Dlott D. D. Shock initiation of explosives: High temperature hot spots explained // Appl. Phys. Lett. — 2017. — V. 111, N 6. — 061902(1–5).
34. Энергетические конденсированные системы: краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
35. Коптелов А. А., Садовничий Д. Н., Шленский О. Ф. Тепловыделение в полимерах под действием γ -облучения // Докл. АН. — 2000. — Т. 374, № 4. — С. 499–502.
36. Милехин Ю. М., Коптелов А. А., Коптелов А. И., Садовничий Д. Н. Влияние ионизирующего излучения на кинетику термического разложения энергетических материалов // Тр. XXIX Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела». — 2019. — С. 90–98.
37. Милехин Ю. М., Коптелов А. А., Садовничий Д. Н., Шишов Н. И., Бестужева

- Т. А., Бутенко Е. А. Термическое разложение сложнотермического полиуретана и эластомеров на его основе, подвергнутых воздействию γ -излучения // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 133–138.
38. Трусов Б. Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2012. — № 2. — С. 240–249.
39. Милехин Ю. М., Бурский Г. В., Лавров Г. С., Попов В. С., Садовничий Д. Н. Энергетика и внутренняя баллистика ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Наука, 2018.
40. Демидов Б. А., Ефремов В. П., Ивкин М. И., Петров В. А., Мещеряков А. Н. Динамика процесса взаимодействия сильнооточного импульса электронного пучка с полимерными материалами // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. — 2008. — № 8. — С. 55–60.
41. Демидов Б. А., Ефремов В. П., Калинин Ю. Г., Петров В. А., Ткаченко С. И., Чукбар К. В. Экспериментальное определение момента разрушения полиметилметакрилата и полистирола за фронтом ударной волны, возбужденной сильнооточным импульсным электронным пучком // Журн. техн. физики. — 2012. — Т. 82, вып. 3. — С. 94–98.
42. Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Лопаткин С. А., Важов В. Ф., Гусев С. А., Бутенко Е. А. Импульсный электрический пробой смесевых энергетических конденсированных систем // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 107–115.
43. Буркин В. В., Буркина Р. С., Тимохин А. М. Особенности гидродинамического воздействия электровзрыва на зажигание конденсированных веществ // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 15–22.
44. Садовничий Д. Н., Гафаров Б. Р., Герасев В. И., Милехин Ю. М., Тютнев А. П., Боев С. Г., Ефремов В. П., Демидов Б. А. Электрический пробой, вызванный электронным облучением ПММА // Физика экстремальных состояний вещества — 2001 / под ред. В. Е. Фортова. — Черноголовка, 2001. — С. 36–39.
45. Садовничий Д. Н., Тютнев А. П., Милехин Ю. М. Электрические эффекты в полимерах и композиционных материалах при облучении пучками электронов // Изв. АН. Сер. химическая. — 2020. — № 9. — С. 1607–1613.
46. Alekseev M. V., Savenkov E. B., Berezin A. V., Markov M. B., Sadovnichii D. N. Numerical simulation of electromagnetic field propagation in heterogeneous material // AIP Conf. Proc. — 2019. — V. 2167, N 1. — P. 020008(1–5). — DOI: 10.1063/1.5131875.
47. Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Калинин С. А., Богданова Е. В. Экспериментальное изучение электроразрядных процессов в энергетических конденсированных системах при воздействии микросекундных импульсов высокого напряжения // X науч. конф. Волжского регион. центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». — 2019. — Т. 2. — С. 35–40.
48. Борисенок В. А., Бельский В. М. О механизме образования горячих точек в конденсированных взрывчатых веществах // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 3. — С. 46–53.

Поступила в редакцию 06.04.2021.

После доработки 29.04.2021.

Принята к публикации 09.06.2021.