

УДК 541.541:544.454

## К ВОПРОСУ О ДЕТОНАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НАНОСЕКУНДНЫМ ПОТОКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2020 г. Академик РАН Ю. М. Милёхин<sup>1</sup>, Д. Н. Садовничий<sup>1,\*</sup>, К. Ю. Шереметьев<sup>1</sup>, Ю. Г. Калинин<sup>2</sup>, Е. Д. Казаков<sup>2,3</sup>, М. Г. Стрижаков<sup>2</sup>

Поступило 04.03.2020 г.

После доработки 11.05.2020 г.

Принято к публикации 12.05.2020 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований возбуждения детонации заливочной энергетической конденсированной системы, содержащей тринитрат глицерина, перхлорат аммония и алюминиевый порошок, вызванной воздействием наносекундного потока релятивистских электронов с плотностью потока 200 Дж/см<sup>2</sup>. Установлено, что скорость разлета газо-плазменных образований с поверхности энергетической конденсированной системы составляет ~22 км/с. Показано, что детонация изучаемой энергетической конденсированной системы при действии наносекундного потока релятивистских электронов достигается при значительно более низких давлениях, чем в случае инициирования зарядом взрывчатого вещества.

*Ключевые слова:* энергетическая конденсированная система, радиационная стойкость, детонация, тринитрат глицерина, перхлорат аммония, поток релятивистских электронов

DOI: 10.31857/S2686953520030103

В настоящее время перспективным направлением развития взрывчатых составов являются многокомпонентные заливочные энергетические конденсированные системы (ЭКС), состоящие из бризантного взрывчатого вещества, перхлората аммония (ПХА), алюминиевого порошка и полимерной основы. Такие смесевые ЭКС не уступают мощным взрывчатым веществам (типа октоген и гексоген) по параметрам взрыва, но обладают меньшей чувствительностью к механическим воздействиям. Для инициирования взрыва и детонации ЭКС, как правило, используются ударно-волновые воздействия [1]. Однако возможность достижения взрыва или детонации смесевых ЭКС с использованием наносекундных потоков релятивистских электронов (РЭ) практически не изучалась. Применение наносекундных потоков РЭ позволяет изучать самые начальные стадии быстрого разложения ЭКС и глубже

понять физическую природу таких быстропротекающих процессов, как взрыв и детонация.

Целью настоящей работы было экспериментальное изучение быстропротекающих процессов при воздействии наносекундного потока релятивистских электронов на энергетические конденсированные системы, содержащие некристаллические взрывчатые вещества.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали плоские образцы ЭКС толщиной 4.2 мм, состоящие из тринитрата глицерина, полиэфируретана и дисперсных порошков ПХА и алюминия в соотношении 55 : 9.2 : 15 : 20 (мас. %), отвержденные ароматическим динитрилоксидом. Средний диаметр частиц ПХА 25 мкм, а частиц Al – 5 мкм. Давление возбуждения детонации, критический диаметр и скорость детонации такого типа ЭКС экспериментально изучены в ряде работ [2, 3], а особенности радиолиза – в [4].

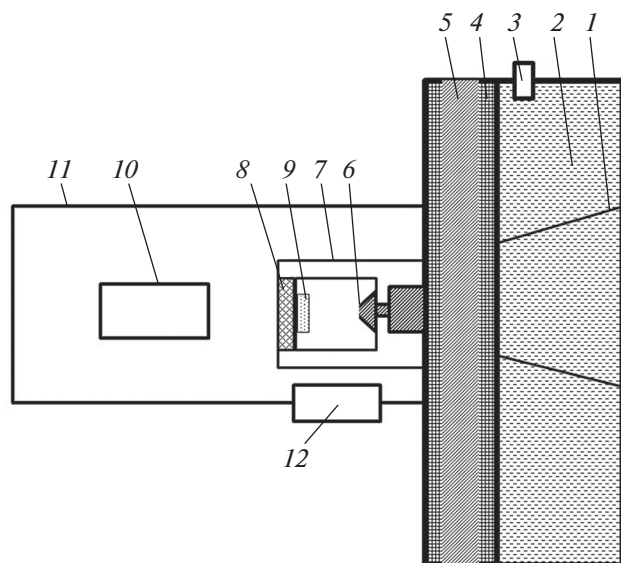
Схема проведения эксперимента по облучению образцов ЭКС на ускорителе “Кальмар” (СССР) [5] представлена на рис. 1. Температура испытаний комнатная. Образцы ЭКС закрепляли на аноде из нержавеющей стали, содержащем вырез прямоугольной формы под образцом ЭКС и боковую щель для наблюдения кинетики разлета.

<sup>1</sup> ФГУП “Федеральный центр двойных технологий “Союз”, Дзержинский Московской обл., Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

\*E-mail: soyuz@fcdt.ru

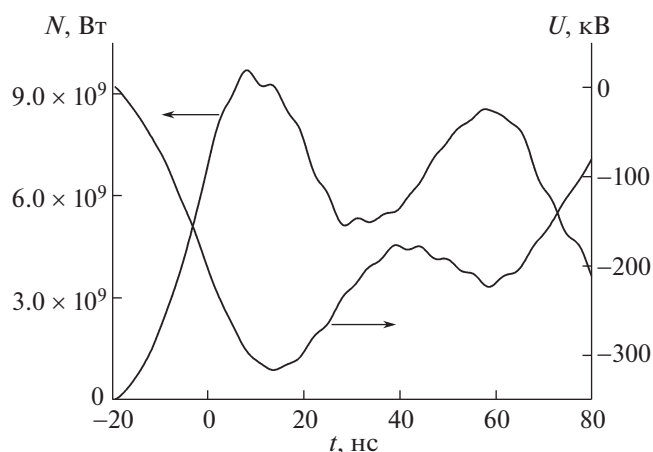


**Рис. 1.** Схема облучения. 1 – коаксиальный трансформатор, 2 – водяной объем, 3 – высоковольтный делитель, 4 – изолятор, 5 – безындуктивный шунт, 6 – катод, 7 – анодный узел, 8 – диэлектрическая пластина для крепления образца, 9 – образец, 10 – камера-обскуры, 11 – вакуумный объем, 12 – смотровое окно.

Наносекундный поток РЭ формировался в диоде ускорителя с латунным катодом диаметром 10 мм. Зазор между катодом и поверхностью образца ЭКС составлял 4–6 мм. Тильной стороной образец ЭКС плотно прижимался к пластине из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 4 мм, которая укреплялась на аноде таким образом, чтобы образец ЭКС не касался анода. Диаметр пятна облучения контролировали по распределению интенсивности рентгеновского излучения в его изображении, полученном с помощью рентгеновской камеры-обскуры, расположенной за образцом. Распространение катодной и анодной плазмы вдоль оси диода регистрировалось по ее оптическому излучению электронно-оптической хронографической камерой СФЭР-6 (Россия) [6].

Ток через диод ускорителя и напряжение на катоде регистрировались осциллографом Tektronix TDS 2024B (США) с помощью низкоиндуктивного шунта и высоковольтного делителя напряжения соответственно, расположенных вблизи выходного узла ускорителя “Кальмар”. Эксперименты выполнялись при поддержании в объеме диода динамического остаточного давления не выше  $1 \times 10^{-2}$  Па, для чего использовались диффузионные насосы.

Для изучения образования новых структур на поверхности материалов в экспериментах на ускорителе “Кальмар” использовали растровый электронный микроскоп JSM-6490 (Япония) с



**Рис. 2.** Зависимость мощности потока РЭ и напряжения в ускоряющем зазоре между катодом и анодом от времени.

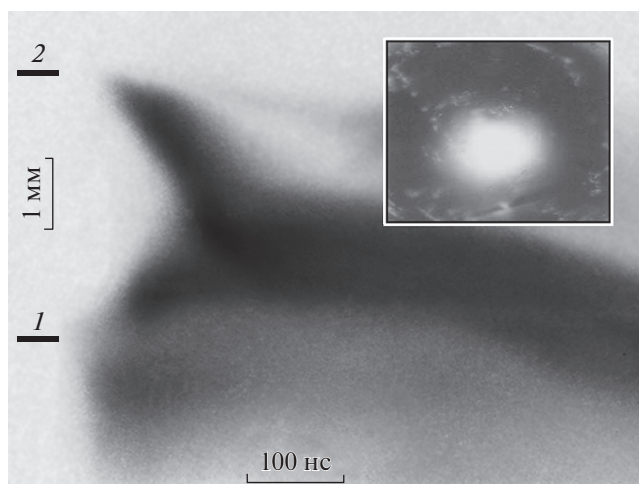
приставкой для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа QUANTAX (Германия).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах создавали поток РЭ ускорителя “Кальмар” при средней энергии РЭ 280 кэВ, максимальном значении тока пучка 28 кА и максимальной мощности  $9.5 \times 10^9$  Вт (рис. 2). Как показали контрольные эксперименты, 85% энергии пучка сосредоточено на поверхности образца площадью  $\sim 3$  см<sup>2</sup>. Средняя плотность потока энергии РЭ на образцах ЭКС составляла 200 Дж/см<sup>2</sup>.

Скорость уноса вещества с облучаемой поверхности образца ЭКС определялась как скорость перемещения границы светящейся области, и в начале разлета до 190 нс составляла  $\sim 22$  км/с (рис. 3). До замыкания межэлектродного промежутка (диола) ускорителя “Кальмар” плазмой свечение в прианодной и прикатодной областях диода ускорителя “Кальмар” пропадает, что связано с большой оптической плотностью плазмы [6].

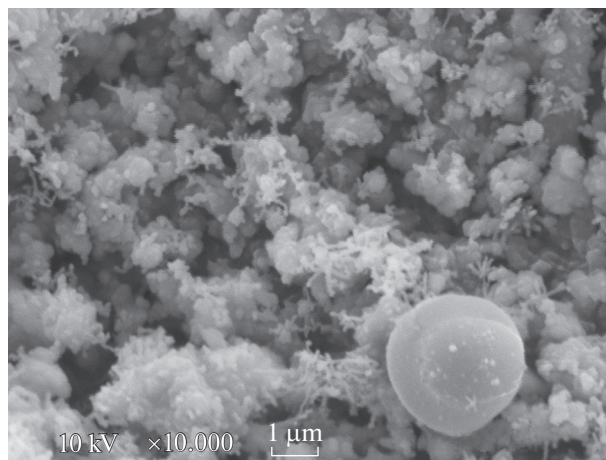
Воздействие потока РЭ вызвало сильный характерный хлопок, разрушение подложки и бокового окна анода, изготовленных из ПММА, а также появление характерных следов течения на аноде из нержавеющей стали в области закрепления образца ЭКС. Остатков образца ЭКС не обнаружено, однако на обращенных к образцу поверхностях раздробленных осколков ПММА обнаружен характерный “налет” черного цвета. Таким образом, по результатам последствий разрушения можно определенно говорить о реализации режима детонации изучаемых образцов ЭКС при воздействии потока электронов ускорителя “Кальмар”. Следов горения не обнаружено.



**Рис. 3.** Шелевая развертка разлета газо-плазменных образований в межэлектродном промежутке ускорителя “Кальмар” при воздействии на образец ЭКС релятивистского электронного пучка с плотностью потока энергии 200 Дж/см<sup>2</sup>. 1 – катод, 2 – поверхность образца. На вставке отпечаток геометрической формы площади облучения.

Микрофотографии образовавшегося “налета” на поверхности ПММА обнаруживают пористую структуру из частиц диаметром  $\sim 1$  мкм, а также частиц удлиненной формы (рис. 4). В ряде случаев на поверхности были обнаружены сферические частицы алюминия (рис. 4). Энергодисперсионный анализ с использованием электронов с энергией 10 кэВ для 12 изученных осколков показал, что образовавшийся на поверхности ПММА “налет” содержит (ат. %): углерод (49–57), кислород (32–23), алюминий (7.9–5), медь (2.7–1.6), цинк (1.4–1.3), железо (0.6), кремний-никель (2.3–5.6) и в небольших количествах хлор (0.06–0.08), свинец (0.12), азот (1.2–4.9). Состав образовавшихся конденсированных продуктов соответствует продуктам детонации изучаемого ЭКС и элементов, входящих в состав катодной плазмы.

Действительно, принцип действия высоковольтных диодов сильноточных ускорителей электронов, работающих по принципу “взрывной эмиссии”, всегда сопровождается образованием плазмы из элементов катода – в данном случае латуни [7]. Катодная плазма распространяется в диоде ускорителя (см., например, [6] и рис. 3), однако ввиду малой массы она не способна вызвать значимого ударно-волнового воздействия на ЭКС в облучаемой камере ускорителя “Кальмар”. Испарение материалов электродов продолжается на втором и последующих полупериодах разряда, когда диодный зазор ускорителя замыкается плазмой [6]. Этим объясняется появление в поверхностных слоях «налета» таких элементов как Cu, Zn, Fe, Ni, Pb. Кроме того, источником Fe может выступать анод.



**Рис. 4.** Типовая микрофотография продуктов детонации на поверхности ПММА.

В диэлектрической мишени за счет торможения пучка РЭ возникают достаточно мощные электрические поля, которые ограничены обменом зарядом с плазмой, окружающей облучаемую поверхность, и заземлением мишени. Генерируемые в диэлектрических образцах сильные электрические поля на ускорителе “Кальмар” – более  $5 \times 10^5$  В/см – вызывают электрический пробой полярных диэлектриков [8]. Ранее было показано, что максимальный пробег РЭ ускорителя “Кальмар” при рассматриваемых плотностях потока слабо чувствителен к эффекту электризации [9], поэтому влиянием электрического поля на пробег РЭ далее пренебрегали.

Численное моделирование переноса РЭ ускорителя “Кальмар” в образцах ЭКС выполнено методом Монте-Карло без учета их гетерогенности с детальным прослеживанием РЭ до энергии 1 кэВ [10]. Разыгрывали  $10^7$  историй первичных частиц. За глубину пробега РЭ принимали толщину мишени, на которой поток РЭ ослабляется на три порядка. Получено, что пробег электронов пучка ускорителя “Кальмар” составлял 560 мкм. Плотность инжектированного заряда достигает максимального по модулю значения на глубине  $\sim 300$  мкм. Структура энерговыделения такова, что практически постоянная поглощенная доза реализуется от облучаемой поверхности до глубины  $\sim 100$  мкм и составляет  $\sim 5.7$  МГр. На глубинах 200, 300 и 400 мкм поглощенная доза снижается до значений 2.9, 0.9 и 0.3 МГр соответственно.

Согласно классической теории, детонационное превращение взрывчатого вещества происходит под действием ударной волны, возбуждающей экзотермическую химическую реакцию. Поэтому стационарная детонационная волна состоит из ударного скачка и следующей за ним зоны химических превращений, в которой давление падает, а

вещество расширяется. В настоящее время общепринято, что при давлениях до 5 ГПа основным механизмом инициирования детонации служат “горячие точки” [1, 11]. Если температура во фронте ударной волны превышает некоторую характеристическую для данного вещества температуру (как правило  $\sim 1000$  К), то за время  $\sim 1$  нс происходит воспламенение очага и его распространение далее в образце [11].

В многокомпонентных ЭКС, изготавливаемых методом заливки с использованием полимерных горючих связующих, детонационный процесс далек от идеального и характеризуется увеличенной зоной химической реакции [2, 3]. Считая, что теплоемкость ЭКС близка к теплоемкости тринитрата глицерина 1300 Дж/(кг К) [12], повышение температуры образца ЭКС площадью  $\sim 3$  см<sup>2</sup> и толщиной 100 мкм за счет поглощения энергии пучка РЭ ускорителя “Кальмар” превышает 4000 К. То есть критерий инициирования детонации в ЭКС можно считать выполненным. Однако существуют некоторые сложности в оценке возможности дальнейшего развития детонации на необлученный РЭ объем изучаемого ЭКС.

Специфика генерации ударных волн наносекундным потоком РЭ обусловлена тем, что повышение давления в объеме мишени связано с быстрым энерговыделением при постоянстве объема образца, в котором происходит поглощение РЭ. Реализованное в экспериментах энерговыделение вызывает нагрев и сублимацию ЭКС с формированием механического импульса давления. Если принять за границу сублимации достижение плотности энергии  $Q_s = 1$  кДж/г, то консервативную оценку величины механического импульса давления получить достаточно просто [13]:

$$I_p = 0.7 \int_0^{m_s} (2Q(m) - Q_s)^{1/2} dm,$$

где  $Q(m)$  – распределение энерговыделения пучка РЭ по массовой глубине ( $m$ ) образца ЭКС,  $m_s$  – массовая толщина сублимированного слоя.

Оценка величины испарительного импульса составляет 755 Па с, а толщина сублимированного слоя составляет 290 мкм. Тогда для длительности потока РЭ на половине амплитудного значения 50 нс получаем максимальную оценку давления сжатия, без учета разгрузки на свободной поверхности, менее 3.7 ГПа. При этом сублимированная часть ЭКС начинает заполнять диод ускорителя еще во время действия потока РЭ.

Отметим, что приведенные выше оценки дают максимальное значение генерируемого импульса и, следовательно, давления. Как показано в [14], с увеличением плотности потока РЭ увеличивается доля расходуемой энергии, не связанной с гене-

рацией механического импульса. По-видимому, причиной этого является взаимодействие потока РЭ с движущимися навстречу продуктами детонации вещества мишени, потерей энергии на его ионизацию и излучение.

Экспериментально установлено, что изучаемые ЭКС обладают критическим диаметром детонации 6–8 мм и способны детонировать при инициирующем давлении более 20 ГПа, создаваемом зарядом взрывчатого вещества [3].

Проведенные оценки показывают, что наносекундный поток РЭ позволяет осуществить детонацию многокомпонентного ЭКС при инициирующем давлении в ударной волне много меньшем, чем при классическом ударно-волновом инициировании зарядом взрывчатого вещества. При этом детонация происходит в слое меньшем, чем диаметр детонации, определенный классическим методом.

В качестве возможного механизма, позволяющего понизить критические параметры возбуждения детонации, следует учитывать реализацию как в области облучения, так и в необлучаемом объеме ЭКС мощных электрических полей и частичных электрических разрядов. Достижимые в канале электрических разрядов высокие температуры и давления могут служить дополнительными “горячими точками”, облегчающими инициирование и развитие процесса детонации в смеси ЭКС. Влияние электрического поля на процессы взрыва и детонации порошкообразных и прессованных взрывчатых веществ было отмечено ранее, например, в работе [15].

## БЛАГОДАРНОСТИ

Эксперименты на установке “Кальмар” выполнены при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (приказ № 1569 от 16 июля 2019 г.). Авторы признательны Д.В. Бакулину, Б.Р. Гафарову и С.А. Малинину за помощь в проведении работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва: в 2 т. / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е. М.: Физматлит, 2002.
2. Милехин Ю.М., Осавчук А.Н., Куликов В.Н. и др. // Труды Международной конференции XIII Харионовские чтения 14–18 марта 2011 г. Саров: Изд-во ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2011. С. 189–193.
3. Kulikov V.N., Matveev A.A., Osavchuk A.N., et al. // Progress of detonation physics. S.V. Frolov and G.D. Roy, Eds. Moscow: Torus Press, 2016. P. 188–196.
4. Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н., Коптелов А.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 4. С. 66–71.
5. Демидов Б.А., Ивкин М.Б., Петров В.А. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 2. С. 101–116.

6. *Ананьев С.С., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А. и др. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 608–615. <https://doi.org/10.7868/S0367292117070022>*
7. *Бугаев С.П., Литвинов Е.А., Месяц Г.А. и др. // Успехи физ. наук. 1975. Т. 115. С. 101–120.*
8. *Садовничий Д.Н., Гафаров Б.Р., Милехин Ю.М. и др. // В сб. “Физика экстремальных состояний вещества–2001” / Под ред. В.Е. Фортова. Черноголовка, 2001. С. 36–39.*
9. *Гафаров Б.Р., Ефремов В.П., Садовничий Д.Н. и др. // Химическая физика. 2001. Т. 20. № 4. С. 66–72.*
10. *Ланпа А.В., Бурмистров Д.С., Васильев О.Н. // Известия ВУЗов МВ и ССО СССР. Сер. Физика. 1988. № 2. С. 77–82.*
11. *Лобойко Б.Г., Любятинский С.Н. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 6. С. 45–64.*
12. *Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Лопаткин С.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 2. С. 108–118. <https://doi.org/10.15372/FGV20190211>*
13. *Бакулин В.Н., Острик А.В. // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5. № 4. С. 151–166.*
14. *Демидов Б.А., Ефремов В.П., Казаков Е.Д. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 2. С. 96–99. <https://doi.org/10.7868/S003281621602004X>*
15. *Борисенок В.А., Брагунец В.А., Симаков В.Г. и др. // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.7868/S0207401X14030042>*

## TO THE QUESTION OF THE DETONATION OF MULTICOMPONENT ENERGETIC CONDENSED SYSTEMS UNDER NANOSECOND ELECTRON BEAM

**Academician of RAS Yu. M. Milekhin<sup>a</sup>, D. N. Sadovnichii<sup>a, #</sup>, K. Yu. Sheremetyev<sup>a</sup>, Yu. G. Kalinin<sup>b</sup>,  
E. D. Kazakov<sup>b, c</sup>, and M. G. Strizhakov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> FSUE “The Federal center for dual-use technologies “Soyuz”, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

<sup>c</sup> National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: [soyuz@fcdt.ru](mailto:soyuz@fcdt.ru)

The results of experimental studies of initiation of detonation in flood energetic condensed systems containing glycerol trinitrate, ammonium perchlorate and aluminium powder under nanosecond relativistic electron beam with a flux density of 200 J/cm<sup>2</sup> are given. It has been found that ablation of a gas-plasma formation from the energetic condensed system surface has expansion rate of ~22 km/s. It has been demonstrated that detonation of the considering energetic condensed system under nanosecond relativistic electron beam occurs at significantly lower pressures than in the case of initiation by explosive substances.

*Keywords:* Energy condensed system, radiation resistance, detonation, glycerol trinitrate, ammonium perchlorate, flow of relativistic electrons