

10;12

## Проблемы возбуждения детонации в бризантных взрывчатых веществах сильноточным электронным пучком

© В.А. Морозов,<sup>1</sup> Г.Г. Савенков,<sup>2</sup> В.А. Брагин,<sup>2</sup> В.М. Кац,<sup>1</sup> А.А. Лукин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт „Поиск“,  
188162 Мурино, Ленинградская область, Россия  
e-mail: sav-georgij@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 13 мая 2011 г. В окончательной редакции 17 августа 2011 г.)

Рассмотрены экспериментальные работы по инициированию бризантных взрывчатых веществ сильноточным электронным пучком наносекундной длительности. С помощью элементарных расчетных оценок показано, что при описываемых в работах параметрах пучка критические условия возбуждения детонации в бризантном взрывчатом веществе не выполняются. Приведены результаты экспериментов по воздействию импульсного электронного пучка на модельные образцы из парафина и воска. Показано, что основным действующим на образцы фактором является катодный плазменный факел.

### Введение

Начиная с работы [1], в периодических научных изданиях и в различных научных сборниках появился большой комплекс печатных работ, посвященный экспериментальным исследованиям в области возбуждения детонации в инициирующих взрывчатых веществах (ИВВ) при помощи импульсного электронного пучка микроили наносекундной длительности. Можно упомянуть также работы [2,3]. Большая часть указанных и не указанных экспериментальных работ посвящена исследованию предвзрывных явлений и механизмов процесса самовозбуждения, управляющих взрывным разложением. Весь этот цикл работ венчает монография [4].

В 2003 г. появилась работа [5], практически следом работы [6,7]. Есть и более поздние (вплоть до 2010 г.) работы, в которых авторы утверждают, что им удалось возбудить детонацию при помощи сильноточного электронного пучка (СЭП) наносекундной длительности в бризантном взрывчатом веществе (БВВ) (хотя и самом чувствительном из этого класса взрывчатых веществ) — тетранитропентаэритрите (ТЭНе). Параметры электронного пучка, использованного в работах, следующие: энергия электронов в пучке — 250 keV, длительность импульса от 10 ns в [7] до 25 ns в [5,6], при этом амплитуда тока указана только в работе [7] — ~ 1 kA, в остальных работах этот параметр не упоминается. Диаметр электронного пучка, который определялся диаметром центрального отверстия в аноде, в работах [5,6] равнялся 1.5 mm, в работе [7] — 3.5 mm. Иницируемый заряд ТЭНа представлял из себя: в работе [5] — прессованная из порошка с дисперсностью  $S = 600 \text{ kg/m}^3$  таблетка диаметром 4 mm, высотой 1.8 mm и плотностью  $1.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . В работе [6] исследовался монокристалл размерами  $3 \times 2 \times 1 \text{ mm}$ , в работе [7] — монокристаллы с толщиной в направлении действия электронного пучка от 1.03 до 2.03 mm.

Можно заметить, что во всех экспериментальных работах, в том числе и не указанных нами в настоящей работе, размеры образцов малы, для того чтобы уверенно регистрировать детонационный процесс. К тому же наличие детонации осуществлялось путем фиксации и измерения спектрально-кинетических параметров свечения, которое, как будет показано ниже, может быть вызвано не только продуктами взрывного разложения ТЭНа. В связи с этими обстоятельствами возникают некоторые сомнения в утверждениях авторов указанных работ о возбуждении ими детонации в зарядах ТЭНа.

Целью настоящей работы является оценка возможностей действующих факторов электронного пучка на заряды БВВ по возбуждению в них детонации при вышеуказанных параметрах СЭП.

В экспериментальной части работы приведены результаты воздействия СЭП на модельные диэлектрические материалы (парафин и воск), которые позволяют сделать выводы о решающем воздействии на облучаемые образцы, в том числе и зарядов взрывчатых веществ (ВВ), не столько электронного пучка, сколько металлической плазмы, образующейся при генерации пучка.

### 1. Действующие факторы электронного пучка и возможности инициирования БВВ с помощью СЭП

Очевидно, что потенциально возможными действующими факторами импульсного электронного пучка на взрывчатые вещества являются: *тепловое воздействие, механическое и ударно-волновое.*

В такой последовательности и проведем теоретические оценки их возможностей по инициированию плоского заряда БВВ.

Согласно теории [8], при *тепловом* воздействии разогрев заряда ВВ в некоторых локальных очагах (в так

называемых „горячих точках“) до критической температуры ( $T_{cr}$ ) (температуры вспышки) приводит к быстрой экзотермической реакции (т.е. к взрыву или к детонации). Для стандартной навески ТЭНа  $T_{cr}$ , например, составляет  $\sim 203^\circ\text{C}$  [8].

Можно достаточно просто показать, что в случае действия электронного пучка на заряд ТЭНа выделение энергии пучка происходит практически на каждой молекуле ВВ, т.е. в качестве „горячей точки“ или очага инициирования следует рассматривать всю область энерговыделения электронного пучка, имеющую в первом приближении диаметр пучка  $d$  и толщину, равную экстраполированному пробегу электронов.

Основная трудность, связанная с расчетом температуры в очаге возбуждения при действии электронного пучка, заключается в определении распределения удельной поглощенной энергии  $\Delta E$  по толщине образца. Известны различные экспериментально-расчетные способы и оценки ее определения, которые апробированы на инертных веществах и материалах. Наибольшее распространение получил закон Бугера [9], который можно записать для нашего случая в виде [10]

$$\Delta E(x, t) = \beta \rho_0 q_0(t) \exp(-\beta \rho_0 x) f(t), \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент поглощения материала,  $q_0$  — плотность потока энергии,  $x$  — глубина проникновения излучения в среду,  $f(t)$  — временная конфигурация поглощения импульса излучения,

$$f(t) = 1 - |1 - t/t_b|, \quad t \leq 2t_b,$$

$$f(t) = 0, \quad t > 2t_b,$$

$t_b$  — длительность импульса излучения.

Для определения коэффициента поглощения материала  $\beta$ , необходимого для построения функциональной зависимости (1) для ТЭНа (допуская, что  $\beta$  является в процессе облучения постоянной величиной по толщине образцу), воспользуемся одночастичным приближением. То есть оценим распределение средней поглощенной энергии от одного электрона по толщине образца с помощью метода модели отрезков с обобщенным временем, основанного на интегральном уравнении переноса с ядром в виде функции Грина [11].

Согласно этой модели, траектория электрона разбивается на отрезки, на которых энергия, потерянная электроном, составляет некоторую величину  $\Delta E$ . Эта величина достаточно мала и поэтому полагается, что электрон теряет эту энергию, проходя некоторый отрезок  $\Delta x$  прямолинейно, а в конце отрезка упруго рассеивается. Поскольку данная оценка производится на один электрон без учета энергетического спектра пучка, то она является сильно завышенной. По ней в лучшем случае можно определить только порядок искомой величины.

На рис. 1 приведена расчетная кривая поглощенной энергии для одного электрона (при средней энергии

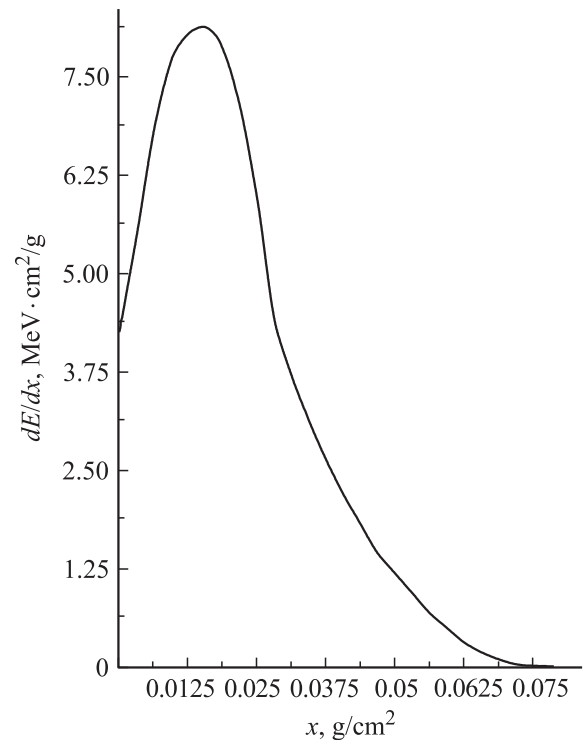


Рис. 1. Распределение поглощенной энергии одного электрона по толщине образца.

электронов в спектре 250 keV), построенная по указанной модели. Из рисунка следует, что экстраполированная (эффективная) глубина пробега электронов в ТЭНе плотностью  $\rho = (1.5-1.75) \text{ g/cm}^3$  составляет  $h_{\text{eff}} = (0.32-0.375) \text{ mm}$  (напомним, что экстраполированный пробег получается при пересечении с осью абсцисс продолжения линейной части кривой, характеризующей изменение интенсивности взаимодействия электрона с веществом), а глубина максимального энерговыделения одного электрона  $h_{\text{em}} = (0.1-0.125) \text{ mm}$ . Если бы электроны не рассеивались, не поглощались и т.д., то приблизительно аналогично распределению поглощенной энергии по глубине образца должна распределяться и температура образца, однако этого, конечно же, не происходит.

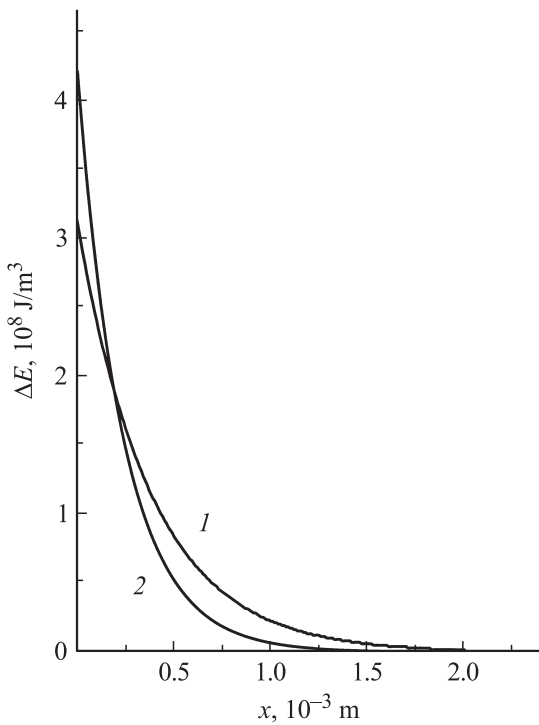
Очевидно, что на лицевой поверхности поглощения энергия будет равна

$$\Delta E(t_b) = \Delta E_1 n, \quad (2)$$

где  $\Delta E_1$  — поглощенная энергия одного электрона,  $n$  — количество электронов в пучке, имеющих среднюю энергию. Максимальное количество электронов со средней энергией в пучке определяется по зависимости

$$n \approx \frac{W}{E} \pi \frac{d^2}{4} t_b, \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр пучка,  $E$  — средняя энергия электронов в спектре,  $W$  — плотность потока мощности электронного пучка.



**Рис. 2.** Распределение удельной поглощенной энергии пучка электронов по толщине образца (значения  $\Delta E$  — при  $x = 0$  соответствуют: 1 —  $\beta = 1.76$ , 2 —  $2.4 \text{ m}^2/\text{kg}$ ).

Используя соотношения (1)–(3), график на рис. 1 и данные работы [5], определим коэффициент поглощения для ТЭНа. Используя  $W = 4 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,  $E = 250 \text{ keV}$ ,  $t_b = 25 \text{ ns}$ ,  $d = 1.5 \text{ mm}$ ,  $\rho_0 = (1.5–1.75) \text{ g/cm}^3$ , получим  $\beta = 1.76–2.40 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

Оценка средней температуры  $T_{\text{max}}$  в приповерхностном слое толщиной  $0.1 \text{ mm}$  (см. рис. 1, 2) дает, при указанных выше параметрах облучения с учетом функции распределения электронов по энергии, значения коэффициента поглощения  $\beta$  и удельной теплоемкости ТЭНа  $c_p = 1670 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  [5],  $180–200^\circ\text{C}$ . То есть слой толщиной  $100 \mu\text{m}$  разогревается не более чем на  $80–90^\circ\text{C}$  (естественно, что микронные слои испаряются), что явно не достаточно для возбуждения детонации. Отметим, что на глубине максимального энерговыделения одного электрона (см. рис. 1) при условии выделения на этой глубине энергии всего количества электронов оценки значений максимальных температур дают  $T_{\text{max}} = 150–180^\circ\text{C}$ . При этом все оценки являются сильно завышенными.

Рассмотрим *механическое* действие пучка. Так как кинетическая энергия электронов в пучке  $E$  оказывается соизмеримой с энергией покоя электрона  $E_0 = 511 \text{ keV}$ , то импульс электрона определяется релятивистским соотношением

$$P_b = \frac{1}{c} \sqrt{(E_0 + E)^2 - E_0^2}, \quad (4)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Количество электронов, падающих в единицу времени на единицу поверхности образца, равно  $W/E$ , тогда давление, развиваемое в ВВ за счет механического импульса электронов:

$$p_m = \frac{WP_b}{E}. \quad (5)$$

Подставляя в (4) и (5) значения  $W$  и  $E$ , найденные в [5], получим значение давления  $p_m = 3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , которое ничтожно по сравнению с характерным давлением в ударных волнах инициирующих ВВ.

Наконец, оценим в приповерхностном слое толщиной  $0.1 \text{ mm}$  амплитуду давления, создаваемого ударной волной, возникающей при действии на образец электронного пучка. Элементарный расчет по зависимости

$$p_{\text{max}} \approx \frac{\gamma \Delta E}{\Delta V}$$

(где  $\gamma$  — коэффициент Грюнайзена,  $\Delta V$  — объем слоя) показывает, что при типичных значениях коэффициента Грюнайзена для ТЭНа  $\gamma = 1.15–1.2$  амплитуда давления  $p_{\text{max}} \approx 480–640 \text{ MPa}$ , т.е. и в этом случае значения амплитуд давления достаточно малы по сравнению с требуемым критическим давлением для ТЭНа.

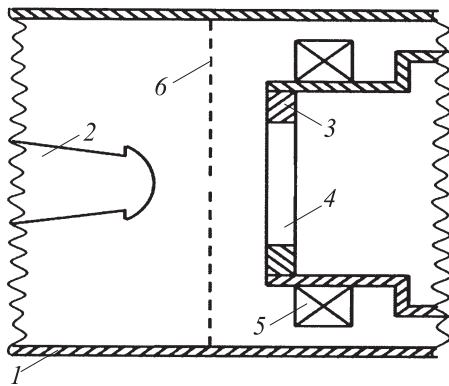
Таким образом, элементарные теоретические (сильно завышенные) оценки показывают, что условия инициирования ТЭНа электронным пучком с параметрами, приведенными в работах [5–7], не выполняются или выполняются с трудом. Однако если увеличить энергию электронов до  $650 \text{ keV}$ , то оценочные расчеты по вышеприведенным формулам показывают, что и значения температуры и давления, создаваемого ударной волной при воздействии чистого электронного пучка, вполне достаточны для инициирования детонации в ТЭНе.

Тем не менее в указанных работах их авторами наблюдается свечение, которое они интерпретируют как взрывное свечение продуктов детонации. В связи с этим возникает вопрос. Что же это за „взрывное“ свечение?

Поэтому с целью получения данных о процессах, происходящих в диэлектрических материалах при воздействии на них СЭП, были проведены следующие экспериментальные исследования на модельных образцах.

## Методика эксперимента и экспериментальные образцы

Как известно исходным сырьем при синтезе БВВ в соответствии с их химической природой являются ароматические углеводороды, алифатические предельные и непредельные углеводороды, аминоспирты, различные эфиры (например, эфиры нитропроизводных фенолов), алифатические спирты и др.). Поэтому в качестве материалов для образцов были выбраны парафин и воск, которые в некоторых случаях служат также в качестве добавок к ВВ. Первый по химическому составу — сложный углеводород, второй — смесь сложных эфиров



**Рис. 3.** Схема облучения образца через бронзовую сетку: 1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — стальное кольцо, 4 — образец, 5 — пояс Роговского (измеритель тока электронного пучка), 6 — бронзовая сетка.

и углеводородов. Плотности этих веществ близки к плотности насыпного ТЭНа (у парафина  $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$  и  $\rho = 0.96 \text{ g/cm}^3$  у воска), а температуры вспышки лежат в диапазоне  $T_{fp} = 160\text{--}180^\circ\text{C}$ , что достаточно близко совпадает с температурой вспышки ТЭНа  $T_{fp} = 205\text{--}215^\circ\text{C}$ .

В качестве источника возбуждения СЭП использовался импульсный сильноточный ускоритель электронов ГКВИ-300 со средней энергией электронов в спектре 250 keV и длительностью импульса напряжения на полувывоте  $\sim 20\text{--}30 \text{ ns}$ . Диаметр пучка электронов — 10 mm. Литые образцы в форме дисков с размерами  $\varnothing 20 \times (1.0\text{--}4.5) \text{ mm}$  находились в стальных кольцах диаметром 32.5 mm и соответствующей высоты. Воздействие электрического пучка на образцы осуществлялось в вакуумной камере при давлении остаточных газов  $\sim 10^{-2} \text{ Pa}$  и температуре помещения  $20^\circ\text{C}$ . Образец устанавливался в оправку перпендикулярно летящему пучку электронов.

Поскольку в работе применялся в качестве источника электронов катод, работающий в режиме взрывной эмиссии, то кроме электронного пучка существенный вклад в нагревание и нагрев образца может вносить металлическая плазма, возникающая при генерации пучка [12,13]. Следует отметить, что во всех работах, посвященных инициированию детонации в БВВ с помощью СЭП наносекундной длительности, со всей очевидностью также использовались источники электронов взрывоэмиссионного типа. Однако ни в одной работе, посвященной инициированию СЭП взрывчатых веществ любого типа, об этом факте даже не упоминается. Справедливости ради укажем, что в работе [3] возбуждение взрыва в ИВВ импульсами микросекундной длительности осуществлялось действительно только пучками электронов на электронном линейном ускорителе ЭЛУ-4 со средним током в пучке  $10^{-3} \text{ A}$ , т.е. налицо автоэмиссионное происхождение электронного пучка без всякой плазмы.

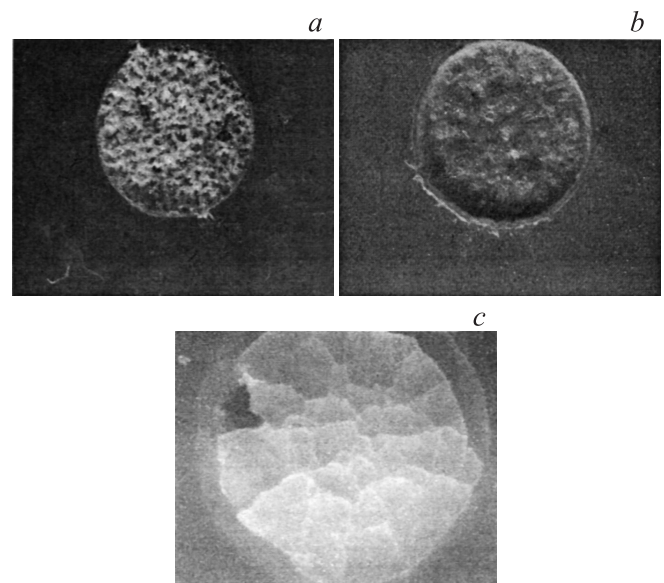
В настоящей работе применяли 3 схемы нагружения образцов. В первой схеме с образцами взаимодействовали и пучок электронов и плазма. Во второй (рис. 3) — большая часть плазмы отсекалась с помощью мелкоячеистой ( $0.1 \times 0.1 \text{ mm}$ ) бронзовой сетки, служившей в качестве анода и наконечник, в третьей схеме плазма отсекалась полностью с помощью титановой фольги толщиной  $15 \mu\text{m}$ , устанавливаемой перед образцом. Во всех трех случаях расстояние между катодом и образцом составляло 5 mm.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

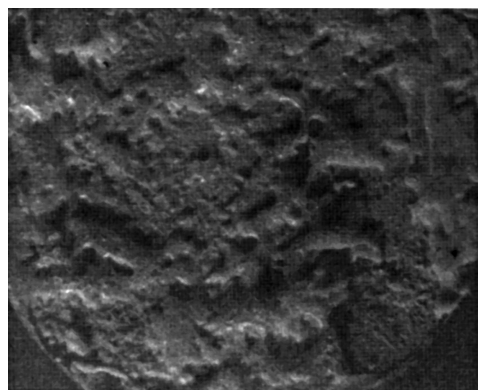
Воздействие двух (либо одного) факторов на образцы толщиной 3–4.5 mm приводило к следующему состоянию лицевой и тыльной поверхностей.

В первом случае, когда действовали и плазма и пучок, на лицевой поверхности обоих типов образцов образовывались каверны глубиной до 2-х mm и диаметром  $\sim 10 \text{ mm}$  (рис. 4), что соответствовало диаметру электронного пучка. При этом цвет образца во всех его толщине в зоне воздействия электронного и плазменного пучков был более светлым по сравнению с исходным. Этот результат указывал на факт полного прогрева образца в этой зоне. На тыльной поверхности в обоих образцах происходили вспучивание и разрушение части поверхности диаметром  $\sim 15 \text{ mm}$  (рис. 4).

Образцы толщиной 1 mm в некоторых случаях просто напросто пробивались насквозь, и остатки образцов попадали в приемный контейнер. Поэтому утверждение в работе [14] о том, что на пьезопреобразователь воздействовали продукты взрывного разложения зарядов, отстоящие от него на расстоянии 3–15 mm, является



**Рис. 4.** Поверхность образцов после воздействия электронного пучка и плазмы. a — воск; b, c — парафина.



**Рис. 5.** Фронтальная поверхность образца из парафина после воздействия сильноточным электронным пучком (без плазмы).

не до конца проверенным фактом, поскольку на пьезодатчик могут воздействовать продукты невзрывного разложения ВВ.

В случае 2-й схемы эксперимента большая часть плазмы отсекалась с помощью сетки, и, вероятно, поэтому тыльная поверхность образцов оставалась без изменения (в том числе и по цвету). На лицевой поверхности образцовывалась ячеистая каверна глубиной до 1 мм и диаметром  $\sim 10$  мм.

И наконец, действие на образцы чистого электронного пучка также приводило к тому, что тыльная поверхность оставалась без изменения. В то время как на лицевой поверхности возникала характерная пузырчатая структура материала (рис. 5) с отслаиванием на некоторых участках тонких пленочных слоев, толщина которых не превышала  $30 \mu\text{m}$ .

Таким образом, можно считать установленным фактом, что большое влияние на диэлектрические образцы оказывает плазма, которая образуется при взрывах микробъемов катода. Именно плазменный катодный факел определяет динамику кратерообразования и выброса массы в виде паров материала образца, которые затем осаждаются на катоде, что неоднократно наблюдалось нами в эксперименте. Естественно, что плазма оказывает влияние и на физические процессы, происходящие в образцах инициируемого ТЭНа при использовании в качестве инициируемого устройства электронного ускорителя.

Так, скорость плазменного фронта, измеренная в экспериментах [12], в среднем равна  $1.5 \cdot 10^8$  мм/с, а инкубационное время процесса, регистрируемого в экспериментах по возбуждению детонации в ТЭНа, составляло не менее 100 нс. И поскольку расстояние между катодом и образцом во всех экспериментах было не более 10 мм, то с инициируемым образцом не менее 30 нс взаимодействовал плазменный пучок, температура которого составляет не менее 2000–3000 К, а плотность на несколько порядков превосходит плотность электронного пучка. При этом плотность (или концентрация) плазмы в сильной степени зависит от объема, в котором

она сосредоточена [13], т. е. чем ближе было расстояние между катодом и образцом ТЭНа, тем более плотный плазменный пучок с ним взаимодействовал. Такой плазменный пучок мог приводить, просто напросто, к взрывному испарению или разложению образцов ТЭНа, толщина которых, как мы помним, составляла не более 2 мм. И свечение, регистрируемое в экспериментах, вполне могло быть люминесценцией паров ТЭНа или продуктов его разложения и плазмы.

Поэтому заявление о возбуждении детонации в ТЭНе при помощи сильноточного электронного пучка с вышеприведенными энергетическими параметрами без проведения экспериментов на достаточно больших зарядах являются, по меньшей мере, преждевременными. Тем не менее очевидно, что совместное действие электронного пучка и плазмы в случае достаточно больших размеров заряда ТЭНа или зарядов других бризантных взрывчатых веществ способно вызвать их детонацию.

## Заключение

На основании проведенных оценок чувствительности ТЭНа к различным внешним факторам и экспериментальных результатов по воздействию сильноточного электронного пучка на диэлектрические материалы (воск и парафин) можно сделать следующие выводы.

1. Путем элементарных оценок показано, что в рамках экспериментов, изложение которых дано в ряде работ, опубликованных в 2003–2010 гг., возбудить детонацию в бризантном взрывчатом веществе — ТЭНе только с помощью импульсного электронного пучка не удается.

2. Установлено, что при генерации электронного пучка вторичным (но, возможно, решающим с точки зрения взаимодействия со взрывчатым веществом и возбуждения в нем детонации) фактором воздействия на образец является пучок плазмы, также генерируемый с катода электронного ускорителя, который имеет скорость  $\sim 150$  км/с и температуру 2000–3000 К.

3. Высказано предположение, что регистрируемое в экспериментах свечение является совместной люминесценцией частиц плазменного факела и паров ТЭНа или продуктов его разложения.

## Список литературы

- [1] Рябых Н.М., Сафонов Ю.Н. // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск: Наука, 1983. С. 73–80.
- [2] Рябых С.М., Карабукаев К.Ш., Барелко В.В. // IV Всесоюзное совещание по детонации. Сборник докладов. Т. 1. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1988. С. 141–147.
- [3] Рябых С.М., Жуланова В.П., Холодковская Н.В., Шаховалов В.Г. // ФГВ. 1996. Т. 32. № 3. С. 113–118.
- [4] Захаров Ю.А., Алукер Э.Д., Адуев Б.П. и др. Предвзрывные явления в азидах тяжелых металлов. М.: ЦЭИ „Химмаш“, 2002. 112 с.

- [5] *Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П.* // Письма ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 16. С. 23–28.
- [6] *Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Тупицын Е.В.* // Письма ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 15. С. 91–95.
- [7] *Loboiko V.G., Garmasheva N.V., Filin V.P., Gromov V.P.* et al. // AIP Conf. Proc. 2006. Vol. 849. P. 133–139.
- [8] *Физика взрыва. Т. 1* / Под ред. Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.
- [9] *Галиев Ш.У., Бабич Ю.Н., Жураховский С.В.* и др. Численное моделирование волновых процессов в ограниченных средах. Киев: Наукова думка, 1989. 200 с.
- [10] *Морозов В.А.* // Вестник СПбГУ. Сер. 1. 1993. Вып. 3 (№ 15).
- [11] *Евдокимов О.Б.* // Изв. вузов. Физика. 1974. № 8. С. 110–114.
- [12] *Мецераков Ю.И., Морозов В.А.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 9. С. 1982–1986.
- [13] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [14] *Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Пузынин А.В.* // Химическая физика. 2010. Т. 29. № 6. С. 54–57.