

## ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ СМЕСЕВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Д. Н. Садовничий<sup>1</sup>, Ю. М. Милёхин<sup>1</sup>, С. А. Лопаткин<sup>2</sup>, В. Ф. Важов<sup>2</sup>,  
С. А. Гусев<sup>1</sup>, Е. А. Бутенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный центр двойных технологий «Союз», 140090 Дзержинский, fcdt@monnet.ru

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете  
634050 Томск

Экспериментально исследованы особенности импульсного, с длительностью фронта 0.2 мкс, электрического пробоя смесевых энергетических композиций, в которых полимерное связующее способно к самостоятельному горению. Показано, что электрический пробой образцов толщиной  $2 \div 4$  мм не приводит к воспламенению всего образца, однако способен вызывать его сильное разрушение. Обсуждаются особенности влияния дисперсных наполнителей на электрическую прочность и особенности разрушения энергетических конденсированных систем в сравнении с негорючими полимерными композициями.

Ключевые слова: энергетическая конденсированная система, алюминий, динитрат диэтиленгликоля, динитрат триэтиленгликоля, циклотетраметилтетранитрамин, электрический пробой, горение.

### ВВЕДЕНИЕ

Для решения проблем безопасного производства и транспортирования энергетических конденсированных систем (ЭКС) важное значение имеет изучение условий, при которых происходит потеря их электрической прочности [1–3]. Это особенно актуально для тех ЭКС, в которых полимерная основа способна самостоятельно гореть или взрываться. По своим электрофизическим свойствам смесевые ЭКС представляют собой полимерные композиты, наполненные дисперсными частицами, обладающими отличной от полимерной основы электропроводностью и относительной диэлектрической проницаемостью [1]. Электрический пробой в горючих материалах способен привести к распространению зоны химических превращений из первоначально малой области пробоя на весь объем и, возможно, к появлению таких негативных процессов, как возгорание или взрывное превращение [4–7]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованиям электрической прочности различного рода неоднородных диэлектриков [8–10] и чувствительности ЭКС к инициации взрыва от действия искры [11, р. E38–E55; 12], сведения об электрической прочности смесевых ЭКС весьма ограничены [11, р. D1221–D1222; 13]. Целью настоящей работы является изучение условий возникновения электри-

ческого пробоя при длительности фронта импульса высокого напряжения  $\approx 0.2$  мкс на примере ЭКС, состоящей из циклотетраметилтетранитрамина (НМХ), алюминия и способного к самостоятельному горению (активного) горючего-связующего на основе полярного каучука и смеси динитрата диэтиленгликоля и динитрата триэтиленгликоля.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах исследовали как само активное полимерное горючее-связующее (SV), так и композиции, изготовленные при введении в него НМХ массовым содержанием 30 % (Т1) и 70 % (Т2), порошка алюминия марки АСД со средним размером частиц  $6 \div 8$  мкм в количестве 50 % (Т3), высокодисперсного аморфного оксида кремния марки А-380 — 5 % (Т4), а также композицию (ТТ), содержащую 20 % алюминия АСД и 50 % НМХ. Минимальный размер частиц порошка НМХ  $\approx 15$  мкм, а максимум функции распределения приходился на область  $25 \div 50$  мкм. Для сравнения были изучены аналогичные инертные полимерные композиции, в которых энергоемкие нитроэфир были заменены диметилфталатом (N0), а массовое содержание алюминиевого порошка составляло 10 (N1), 20 (N2), 40 (N3) и 70 % (N4).

Исследуемые композиции тщательно вакуумировали при постоянном перемешивании и

отверждали в условиях, исключающих седиментацию дисперсных компонентов. В испытаниях использовали образцы в виде пластин размерами  $90 \times 60$  мм и толщиной  $h = 2 \div 4$  мм. Испытания проводили при температуре  $20 \div 22$  °С.

Электрический импульс формировался генератором импульсных напряжений (ГИН) по схеме Аркадзева — Маркса с выходным напряжением до 500 кВ (ГИН-500) со следующими параметрами: зарядное напряжение 100 кВ, длительность фронта импульса напряжения 0.2 мкс, емкость генератора в разряде 17.5 нФ.

Параметры пробивного напряжения и тока (амплитуда напряжения и тока, время до пробоя, форма импульса) измеряли при помощи малоиндуктивного омического делителя напряжения, токового шунта и двухканального цифрового осциллографа Tektronix TDS 2022B (по первому каналу регистрировали ток в разрядной цепи, по второму — изменение напряжения). Погрешность измерения амплитуды напряжения составляла  $\pm 3.6$  %, тока — не более 5 %. Возникновение электрического пробоя определялось по одновременному резкому снижению напряжения и росту силы тока (по абсолютной величине).

Пробой осуществлялся импульсом напряжения отрицательной полярности в квазиоднородном электрическом поле в геометрии электродов «плоскость — плоскость», при этом верхний (высоковольтный) электрод имел диаметр 10 мм, а нижний (соединенный с «землей» через низкоомный шунт) — 20 мм. Края медных электродов были скруглены, а поверхности электродов тщательно отшлифованы. Испытания проводили на воздухе и в среде деионизованной воды.

Амплитуду импульса высокого напряжения подбирали такой, чтобы пробой осуществлялся с минимальным перенапряжением — на фронте импульса вблизи его амплитудного значения. Тем самым исключали возможные отклонения импульсной электрической прочности ЭКС, связанные с перенапряжением и запаздыванием развития разряда. Для определения среднего значения пробивного напряжения испытывали не менее 5 образцов, это обеспечивало относительную ошибку не выше 15 %.

В экспериментах измеряли напряжение, при котором происходил пробой ( $U_p$ ), время его появления ( $t_p$ ), модуль максимального значения тока в цепи при пробое ( $I_{\max}$ ). В процессе

развития канала пробоя наблюдаются затухающие колебания тока и напряжения. Измерив период колебаний тока ( $T$ ), можно оценить индуктивность разрядного контура ( $L$ ) по формуле Томсона  $L = \frac{1}{C} \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2$ , здесь  $C$  — разрядная емкость ГИН. Далее рассчитывали следующие параметры: среднюю напряженность электрического поля при пробое  $E_p = U_p/h$ ; максимальное значение развиваемой мощности  $P_{\max}$  (из выражения  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ ); энергию, запасенную в ГИН,  $W = CU^2/2$ , и в ряде случаев, когда удавалось четко наблюдать стационарный участок тока в предпробивной стадии, рассчитывали также удельную электропроводность образца  $\gamma$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлены типичные осциллограммы тока в цепи (кривые 2 и 4) и напряжения на образце Г1 (кривые 1 и 3). Момент пробоя  $t_p$  отчетливо фиксировался по падению напряжения (кривая 3) и одновременному нарастанию абсолютной величины силы тока  $I$  в измерительной цепи (кривая 4). Кроме того, при появлении пробоя происходил характерный акустический удар. На рис. 2 представлено изменение развиваемой при пробое мощности  $P$ . Хорошо видно, что максимальное значение мощности достигается за время  $\approx t_p$ , однако далее в течение еще

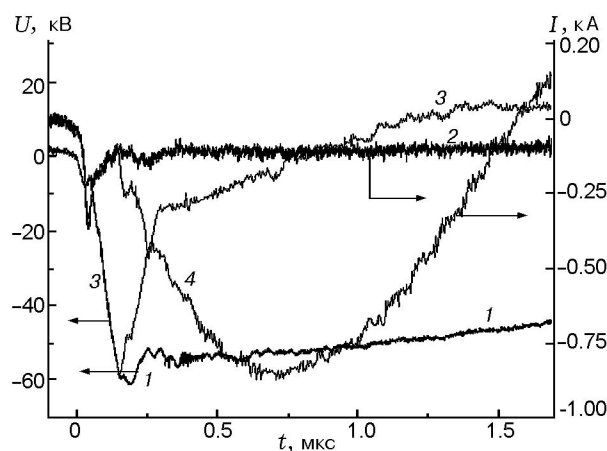


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (1, 3) и тока (2, 4) при импульсном нагружении образца Г1 толщиной 2.7 мм без возникновения пробоя (1, 2) и при возникновении электрического пробоя (3, 4)

Экспериментальные и расчетные параметры импульсного электрического пробоя в ЭКС

Композиция	$h$ , мм	$U_p$ , кВ	$P_{max}$ , МВт	$t_p$ , нс	$ I_{max} $ , кА	$W$ , Дж	$\gamma$ , $10^{-4}(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$	$E_p$ , кВ/см
SV	2.0	22.8	14	101	0.92	4.5	4	118.0
T1	2.7	59.9	15	164	0.9	31.4	1.7	220.0
T2	2.7	81.0	49	160	1.56	48.8	—	300.0
T3	2.4	8.27	3.2	152	0.58	0.6	69	34.4
T4	2.6	56.2	27	145	1.21	27.7	1.7	216.0
TT	4	13.0	3.2	162	0.55	1.5	7.3	32.5
N0	3.1	105	230	166	5.9	96.5	—	377.0
N1	3.4	27.4	50	100	3.0	6.5	—	102.3
N2	3.2	24.3	45	92	2.7	5.2	—	64.0
N3	2.4	9.31	6.4	97	1.45	0.76	—	37.6
N4	2.4	8.1	6.2	86	1.4	0.58	—	28.2

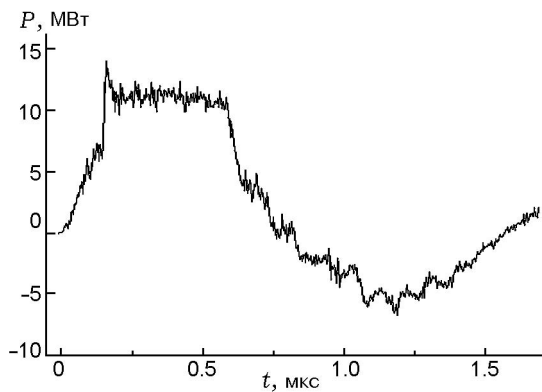


Рис. 2. Изменение мощности во времени при импульсном пробое образца T1 толщиной 2.7 мм

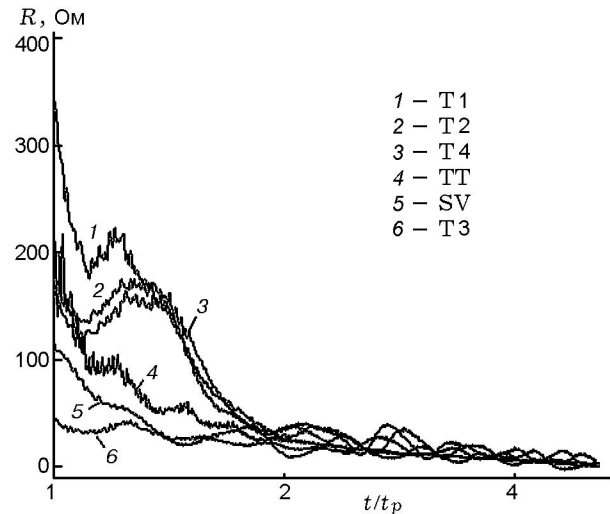


Рис. 3. Кинетика изменения сопротивления канала пробоя образцов ЭКС

примерно  $2t_p$  эта мощность поддерживалась в цепи образца. В опытах с другими ЭКС экспериментальные осциллограммы по своей форме достаточно близки. Полученные результаты приведены в таблице.

Из таблицы видно, что наличие диэлектрических частиц (НМХ или  $\text{SiO}_2$ ) приводит к повышению электрической прочности энергетической композиции, а электропроводящий алюминиевый порошок вызывает снижение электрической прочности. Таким же образом изменяется и значение максимального тока  $|I_{max}|$ , которое достигает минимального по модулю значения в металлсодержащих ЭКС (Т3), что можно объяснить различием активного со-

противления каналов разряда в образцах разного состава.

На рис. 3 показано изменение сопротивления канала разряда ( $R$ ), рассчитанного по осциллограммам тока и напряжения. Видно, что наименьшим сопротивлением обладает канал разряда в композиции Т3 (кривая 6), наполненной порошком алюминия. В остальных наполненных ЭКС сопротивление канала разряда заметно выше, чем в ненаполненном полимерном связующем SV (кривая 5). Интересно отме-

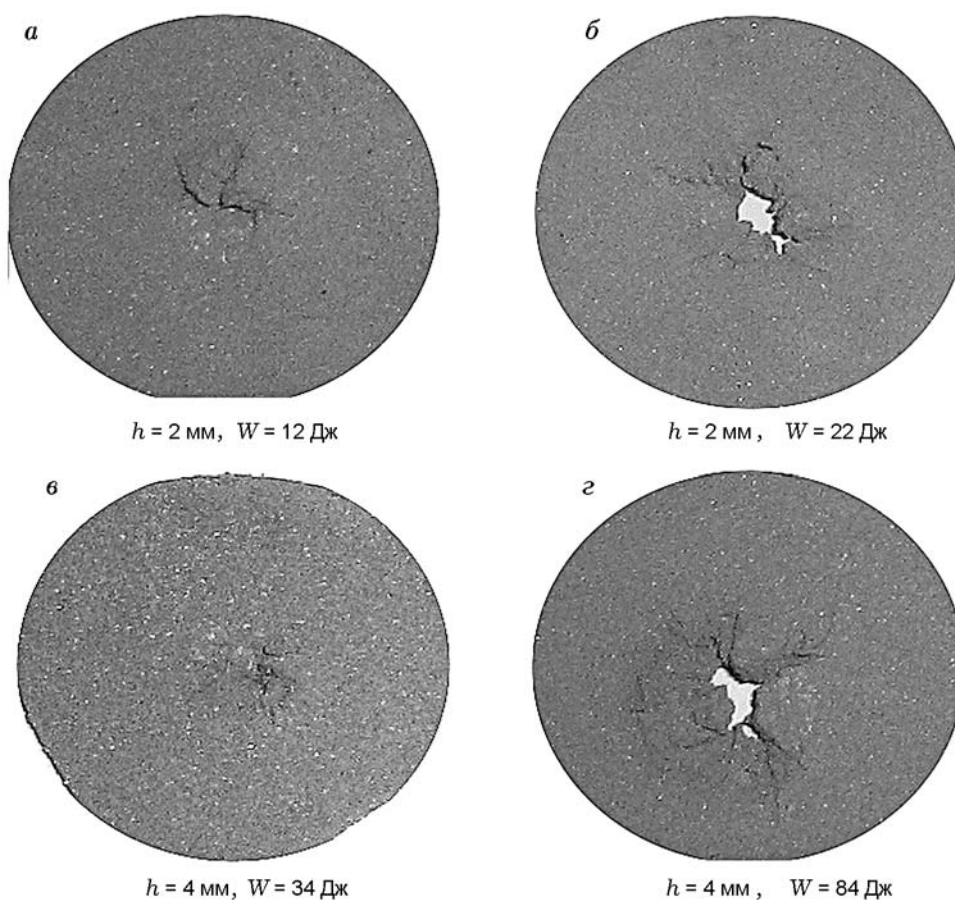


Рис. 4. Фотографии образцов ТТ после импульсного электрического пробоя (диаметр видимой части образца 35 мм)

тить, что в композициях Т1, Т2 и Т4, т. е. в тех, в которых отсутствует порошок алюминия, на фоне общей тенденции к падению сопротивления канала разряда в некоторый момент времени сопротивление заметно повышается.

Важно отметить, что характер электрического повреждения образцов энергоемких веществ различен. Так, в образцах SV и Т4 в результате электрического пробоя образовывалась фигура Лихтенберга в форме «звезды» площадью до  $\approx 0.4 \text{ см}^2$ , в образцах Т1 и Т2 — сквозное отверстие диаметром на поверхности  $< 0.5 \text{ мм}$ , а в образце Т3 — радиально расходящиеся трещины длиной до 3 мм вокруг канала разряда. Характер повреждения образцов ТТ в значительной степени определяется запасенной энергией и толщиной образца (рис. 4). Так, при нормированной на толщину образца энергии  $W/h < 5 \text{ Дж/мм}$  характер разрушения образцов ТТ не отличался от Т2 и Т3, а при

$W/h > 10 \text{ Дж/мм}$  образцы сильно разрушались и образовывался «факел» из выброшенных в окружающее пространство диспергированных частиц образца ТТ (рис. 5). Во всех проведенных экспериментах взрыва или распространения горения на весь образец не наблюдалось.

Учитывая значительные разрушения образца ТТ при электрическом пробое, можно достаточно точно определить унесенную при пробое массу ( $\Delta m$ ) путем простого взвешивания образца на аналитических весах до и после проведения эксперимента. Полученные результаты для образцов ТТ различной толщины представлены на рис. 6, а. Видно, что для «уноса» одинаковой массы при увеличении толщины образца ТТ в 2 раза требуется примерно в 2.4 раза больше энергии  $W$ . Далее по известной плотности образца ТТ, приближенно считая, что форма области разрушения близка к цилиндрической с длиной, равной толщине об-

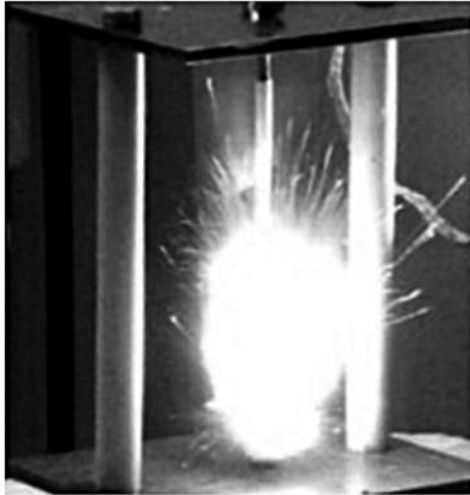


Рис. 5. Фотография «факела» при пробое образца ТТ толщиной 4 мм ( $W = 84$  Дж)

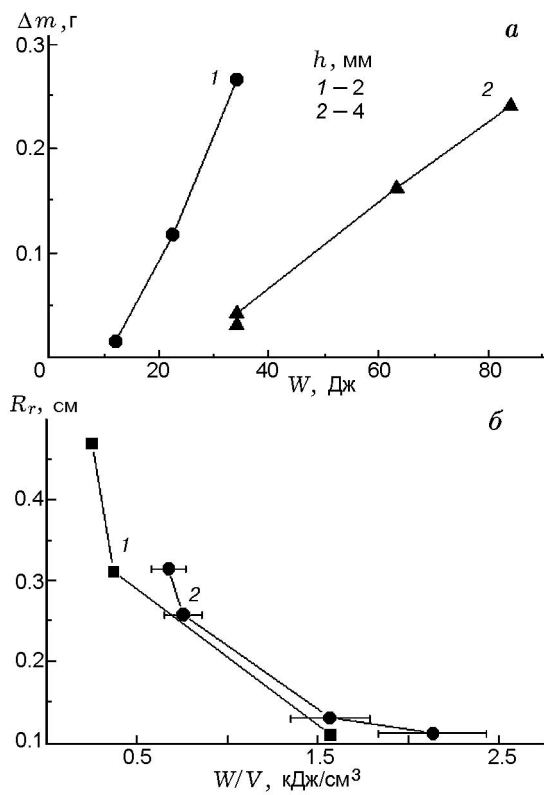


Рис. 6. Зависимость унесенной при пробое массы композиции ТТ от энергии, запасенной ГИН (а), и эффективного радиуса разрушения от удельной энергии электрического разряда (б) в образцах ТТ различной толщины

разца, можно определить эффективный радиус разрушения ( $R_r$ ). Его зависимость от энергии, отнесенной к величине унесенного объема образца ( $V$ ), близка к универсальной (рис. 6, б). Видно, что при низких энергиях и малых «уносах» полученное значение  $R_r$  несколько выше типичных значений для электрического пробоя полимерных диэлектриков ( $50 \div 100$  мкм).

Формы осциллограмм напряжения и тока при импульсном электрическом пробое в наполненных алюминиевым порошком неэнергоемких композициях N0 – N4 качественно не отличаются от рассмотренных выше для энергоемких композиций. Это отчетливо видно при сравнении осциллограмм пробоя образца N3 и N4 с образцом ТЗ (см. рис. 7 и таблицу). Однако максимальный ток, протекающий через образцы N3 и N4, почти в 2 раза больше по сравнению с ТЗ при практически одинаковом значении пробивной напряженности электрического поля. Изменение сопротивления канала пробоя образцов N0 – N4 представлено на рис. 8. Видно, что снижение сопротивления в неэнергоемких композициях, наполненных порошком алюминия, происходит за время  $\approx 2.5t_p$ , тогда как в энергоемких композициях — более быстро, за  $\approx 1.5t_p$  (см. рис. 3).

Как и ожидалось, с повышением массовой доли алюминиевого порошка электрическая прочность композиции с негорючим связующим и степень их механического повреждения снижаются. Так, если в образцах N0 и N1

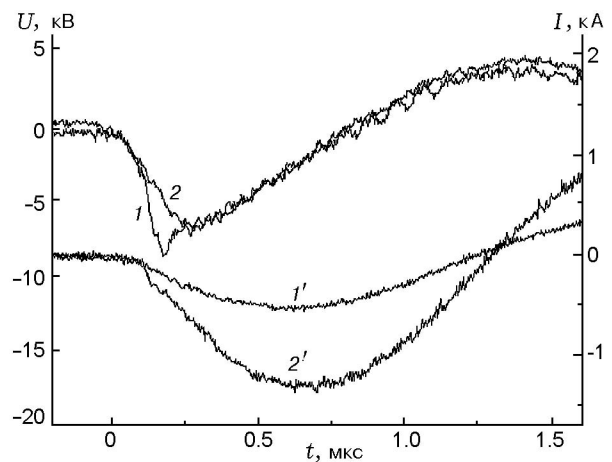


Рис. 7. Осциллограммы напряжения (1, 2) и тока (1', 2') при электрическом пробое образца ТЗ толщиной 2 мм (1, 1') и образца N3 толщиной 2.4 мм (2, 2')

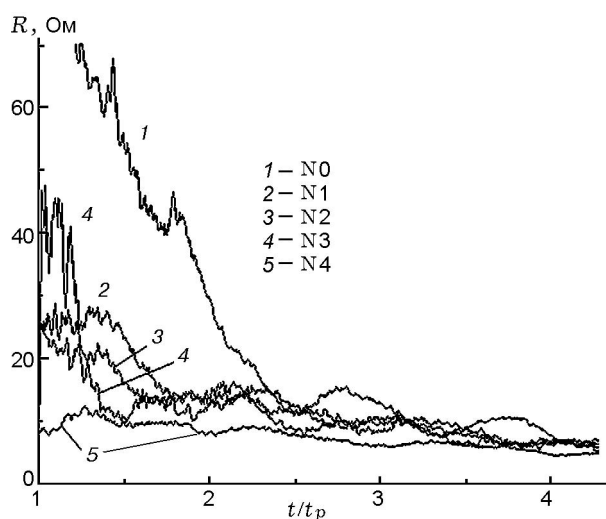


Рис. 8. Кинетика изменения сопротивления канала пробоя неэнергоемких образцов

наблюдаются отходящие от центрального канала пробоя радиальные трещины (3 ÷ 5 штук) длиной < 1 мм, то в образцах N2 и N3 — только небольшое (диаметром < 1 мм) отверстие, а в образце N4 рассмотреть место повреждения можно только при механическом растяжении места пробоя. То есть степень механических разрушений в образцах N0 – N4 существенно ниже, чем в смесевых ЭКС. Отметим, что во всех неэнергоемких полимерных композициях N0 – N4 в месте электрического пробоя хорошо видны следы сажи, которые не наблюдались при пробое исследованных смесевых ЭКС. Это, очевидно, указывает на различие химических процессов при формировании канала пробоя в композициях N0 – N4 и смесевых ЭКС. Известно, что термическое разложение или горение НМХ и используемых нитроэфиров сопровождается образованием только газообразных продуктов [1, 14], т. е. при электрическом пробое кардинального изменения процесса разложения смесевых ЭКС не происходит.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

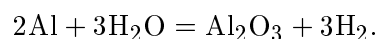
Отмеченное снижение значения пробивной напряженности электрического поля в полимерном связующем, наполненном металлическими частицами, находится в хорошем согласии с общепринятыми представлениями [15, 16]. Определяющими факторами здесь являются усиление (в 3 раза для частиц сферической формы и до 50 раз при эллипсоидной форме

включения) напряженности электрического поля вблизи поверхности металлических частиц и уменьшение общей толщины диэлектрика за счет наличия проводящих включений. В этом энергетические и негорючие композиции ведут себя одинаково.

Различия отчетливо проявляются на канальной стадии развития электрического пробоя в твердом диэлектрике, когда накопленная энергия выделяется в канале разряда, приводя к более сильным разрушениям в ЭКС по сравнению с негорючими материалами. При разрушении негорючих веществ электрическим разрядом требуется затратить энергию на ионизацию, нагрев, разрыв химических связей, испарение, работу расширения и др. В ЭКС уже имеется необходимый запас энергии для дальнейшего быстрого разложения, а наличие алюминиевого порошка повышает теплоту их взрывного превращения и метательную способность [17]. Поэтому вполне можно ожидать воспламенение энергетической композиции, вызванное электрическим пробоем.

Проведенный по теории Зельдовича — Амосова расчет энергии, необходимой для прогрева слоя стационарного горения топлива, показывает, что если вся выделенная при пробое энергия останется в канале разряда, то для воспламенения достаточно всего 3 ÷ 5 Дж [18]. Как видно из таблицы, энергия в разряде и пиковая мощность, достигаемая в наших экспериментах, достаточно высоки, однако воспламенения образцов не происходило.

Для объяснения этого факта важно учитывать, что время выделения энергии в канале разряда достаточно мало, а химические превращения с выделением тепла в ЭКС не протекают мгновенно. Так, при электрическом пробое в воде, содержащей алюминиевый порошок со средним диаметром частиц < 40 мкм, отмечено возрастание энерговыделения до 2 кДж в основном за счет реакции [19]



При этом температура составляла  $\approx 3000$  К, однако химическое превращение становилось существенным только спустя  $\approx 40$  мкс.

Как известно, в канале электрического пробоя твердых диэлектриков (диаметром  $\approx 50 \div 100$  мкм) достигается температура  $\approx 10000$  К, значительно превышающая температуру воспламенения ЭКС ( $\approx 450$  К), а давление превышает 1 ГПа. Высокие температу-

ры при электрическом разряде (длительностью  $100 \div 750$  мкс) позволяют снизить период воспламенения жидких, геле- или пастообразных энергетических конденсированных систем баллистических установок [20].

Температура продуктов сгорания образца ТТ близка к 4000 К; если далее считать, что начальный диаметр канала разряда 0.1 мм, то возникающее в нем давление составит  $\approx 2$  ГПа. Отметим, что плотность теплового потока при электрическом пробое ЭКС существенно нестационарна, а параметры воспламенения в этих условиях до сих пор не известны [21].

Для твердых диэлектриков надежно установлено, что образованные электрическим пробоем газоплазменные продукты обладают высокой скоростью истечения из образца. Для коротких импульсов высокого напряжения формирование трещин и их прорастание — более медленный процесс, чем выделение энергии в канале искрового разряда, а скорость прорастания трещин близка к скорости распространения звука и слабо зависит от скорости нагружения [10]. Поэтому ближайшие к каналу разряда слои материала подвергаются воздействию мощных волн напряжения, как радиальных, так и тангенциальных. Это может привести к образованию радиальных трещин, если тангенциальные напряжения превышают предел прочности на растяжение. При снижении давления газов в канале разряда могут наблюдаться перемещение среды в центр нагружения и формирование в образце кольцевых трещин (типа откола) [9]. Весьма важно, что вследствие очень малой области энерговыделения при электрическом пробое импульс высокого давления быстро затухает по мере удаления от канала пробоя.

В смесевых ЭКС скорость звука составляет  $\approx 2$  км/с, плотность  $\approx 1.8$  г/см<sup>3</sup>, акустическая жесткость не превышает  $5 \cdot 10^5$  г/(см<sup>2</sup> · с), а откольная прочность достаточно мала и находится на уровне 23 МПа [22]. Низкая акустическая жесткость указывает на то, что разрушение образцов смесевых ЭКС в решающей мере происходит под действием газов, образующихся при пробое. Считая, что скорость прорастания трещины в ЭКС  $\approx 1$  км/с, находим, что трещина прорастет на 2 мм приблизительно за 2 мкс. В поставленных экспериментах область дробления или выброса ЭКС из образца оказывается больше толщины прогретого слоя. Эти обстоятельства отличают закономерности вос-

пламенения ЭКС при электрическом пробое от их зажигания нагретой проволокой [23], металлической частицей [24] или от закономерностей воспламенения газообразных сред [25].

Из анализа характера разрушения смесевых ЭКС в сравнении с неэнергоемкими композициями N1 – N4 можно сделать следующие выводы. Во-первых, при импульсном пробое порошок алюминия с характерным размером  $\approx 6 \div 8$  мкм способен участвовать в реакциях с нитроэфирными полимерными связующими. Во-вторых, порошок НМХ с минимальным размером  $\approx 15$  мкм и максимальным  $25 \div 50$  мкм за время развития разряда практически не успевает реагировать в канале разряда, а сам характер разрушения позволяет рассматривать процесс электрического пробоя композиций Т1 и Т2 как последовательный электрический пробой полимерного связующего и НМХ. Если это справедливо, то напряженность электрического поля, вызывающая пробой смеси, должна зависеть от объемной доли каждого из компонентов. Для такой оценки имеются все необходимые данные: электрическая прочность связующего  $\approx 110$  кВ/см, его объемные доли в смесях Т1 и Т2 соответственно 0.77 и 0.38, электрические прочности рассматриваемых композиций 220 и 300 кВ/см соответственно. Таким образом, получаем оценку электрической прочности НМХ, равную 597 и 610 кВ/см соответственно в композициях Т1 и Т2. Близость полученных значений подтверждает приведенные выше рассуждения, а полученная оценка достаточно близка к величине электрической прочности перхлората аммония [13] и других кристаллических соединений [15, 26]. По всей видимости, для вовлечения частиц НМХ в реакцию разложения за время развития пробоя образца следует использовать нанодисперсные частицы либо значительно увеличить длину канала разряда или время выделения энергии в канале разряда путем изменения параметров ГИН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрическая прочность и повреждаемость смесевой энергетической композиции, изготовленной на полимерной основе, способной к самостоятельному горению, при длительности фронта импульса высокого напряжения 0.2 мкс зависит от природы используемых наполнителей. Такие наполнители, как аэросил и НМХ,

повышают, а порошок алюминия понижает импульсную электрическую прочность смесевых композиций. Особенности разрушения смесевых энергетических композиций объясняются тем, что за время, характеризующее распространение трещины в образце, в канале электрического пробоя возможно химическое реагирование алюминиевого порошка с размером частиц  $6 \div 8$  мкм, тогда как порошок НМХ со средним размером  $25 \div 50$  мкм выступает в качестве инертной добавки.

В заключение авторы выражают признательность за содействие в работе и помощь в проведении экспериментов Н. И. Шишову, А. Н. Осавчуку, М. Ю. Журкову и С. В. Дацкевичу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Энергетические** конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
2. **Теория** и практика взрывобезопасности энергоемких материалов / Г. А. Нишпал, Ю. М. Милехин, Л. А. Смирнова, А. Н. Осавчук, Э. Г. Гусаковская. — М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002.
3. **Базелян Э. М., Райзер Ю. П.** Физика молнии и молниезащита. — М.: Физматлит, 2001.
4. **Ерыгин А. Т.** Воспламенение взрывчатых смесей от электрического разряда и обеспечение искробезопасности электрических цепей. — М.: Наука, 1980.
5. **Вилюнов В. Н.** К теории искрового воспламенения // Докл. АН СССР. — 1973. — Т. 208, № 1. — С. 66–69.
6. **Амосов А. П.** Об условиях распространения горения за пределы очага воспламенения // Докл. АН СССР. — 1978. — Т. 243, № 3. — С. 278–282.
7. **Гаврилин А. И., Мельников М. А., Шнейдер В. Б.** О зажигании инициирующих взрывчатых веществ электрической искрой // Горение и взрыв: материалы III Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. — М.: Наука, 1972. — С. 44–48.
8. **Тонконогов М. П.** Диэлектрическая релаксация, электрическая пробой и разрушение горных пород. — М.: Недра, 1975.
9. **Гаврилов Г. Н., Горовенко Г. Г., Малюшевский П. П., Рябинин А. Г.** Разрядоимпульсная технология обработки минеральных сред. — Киев: Наук. думка, 1979.
10. **Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т.** Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. — Л.: Наука, 1987.
11. **Encyclopedia of explosives and related items** / В. Т. Fedoroff, О. Е. Sheffield (Eds). — 1972. — P. 2700. — V. 5. — P. E38–E55.
12. **Berger B., Hass B., Mathieu J., Tanner M., Gyseler J.** Improved method for the determination of the sensitivity of explosives to ESD // Energetic Materials: Proc. 36th Intern. Annu. Conf. of ICT and 32th Intern. Pyrotechnics Seminar. — Karlsruhe, 2005. — P. 120–133.
13. **Ханефт И. Г., Ханефт А. В.** Влияние межэлектродного расстояния на электрический пробой монокристаллов перхлората аммония // Журн. техн. физики. — 1995. — Т. 65, вып. 6. — С. 200–203.
14. **Манелис Г. Б., Назин Г. М., Рубцов Ю. И., Струнин В. А.** Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. — М.: Наука, 1996.
15. **Сканави Г. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958.
16. **Duxbury P. M., Beale H. D., Vak H., Schroeder P. A.** Capacitance and dielectric breakdown of metal loaded dielectrics // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1990. — V. 23. — P. 1546–1553.
17. **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.
18. **Милехин Ю. М., Садовничий Д. Н., Гусев С. А.** Электризация твердотопливных энергетических установок при воздействии ионизирующего излучения // Хим. физика и мезоскопия. — 2006. — Т. 8, № 1. — С. 59–73.
19. **Lee W. M.** Metal/water chemical reaction coupled to a pulsed electrical discharge // J. Appl. Phys. — 1991. — V. 69, N 10. — P. 6945–6951.
20. **Буркин В. В., Буркина Р. С.** Сравнение параметров зажигания конденсированных зарядов термохимическим и электроплазменным воздействием // Хим. физика и мезоскопия. — 2006. — Т. 8, № 1. — С. 104–113.
21. **Внутренняя баллистика РДТТ** / под ред. А. М. Липанова и Ю. М. Милехина. — М.: Машиностроение, 2007.
22. **Гафаров Б. Р., Уткин А. В., Разоренов С. В. и др.** Структура фронта слабой ударной волны в высоконаполненных композитах // ПМТФ. — 1999. — Т. 40, № 3. — С. 161–167.
23. **Голдаев С. В., Козлов Е. А., Муленок Е. В.** Расчет параметров зажигания конденсированного вещества накаливаемой проволокой // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 4. — С. 58–62.
24. **Захаревич А. В., Кузнецов В. Т., Кузнецов Г. В., Максимов В. И.** Зажигание модельных смесей топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 54–57.



25. **Губин Е. И., Дик И. Г.** О зажигании пылевого облака искрой // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 2. — С. 10–17.
26. **Вершинин Ю. Н.** Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. — Екатеринбург: УрО РАН, 2000.

*Поступила в редакцию 15/VIII 2009 г.*

---