



ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

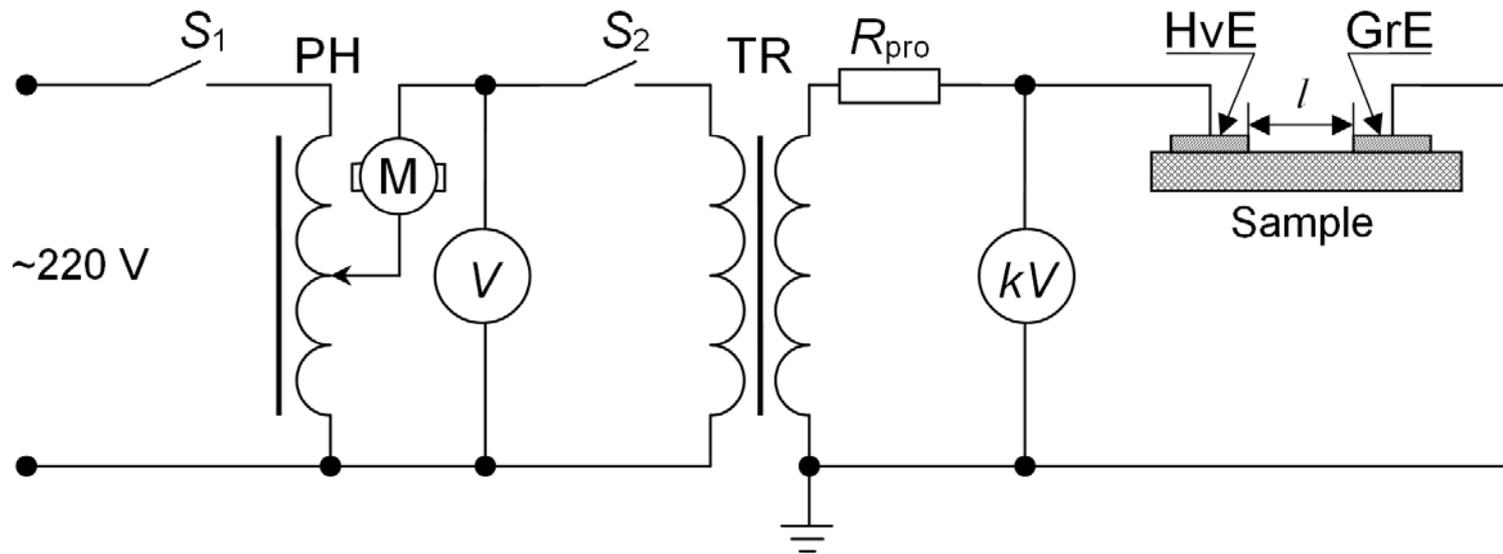
Д. Н. Садовничий ¹, Ю. М. Милёхин ¹, С. А. Лопаткин ², Т. С. Скрипина ²,
С. А. Малинин ¹, И. Н. Гросс ¹

¹ ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз»,
140090 г. Дзержинский, Московская обл., Академика Жукова д.42, E-mail: soyuz@fcdt.ru

² ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050 г. Томск, проспект Ленина д.30, E-mail: tpu@tpu.ru

XIV международная конференция «Забабахинские научные чтения»
18-22 марта 2019

Схема эксперимента



В экспериментах использовали (TR) однофазный трансформатор ИОМ-100/25, который позволял получить переменное напряжение с частотой 50 Гц и амплитудой до $U=140$ кВ. Зарядное напряжение регулировали с помощью автотрансформаторного регулятора напряжения (PH). Подвижный контакт регулятора перемещался электродвигателем, что позволяло изменять напряжение на образце с заданной постоянной скоростью. Защитное сопротивление ограничивало ток при пробое между электродами до безопасного для обмоток трансформатора значения. Зарядное напряжение на низковольтной обмотке контролировали с помощью щитового вольтметра Э377, напряжение на образце киловольтметром КВЦ-120.

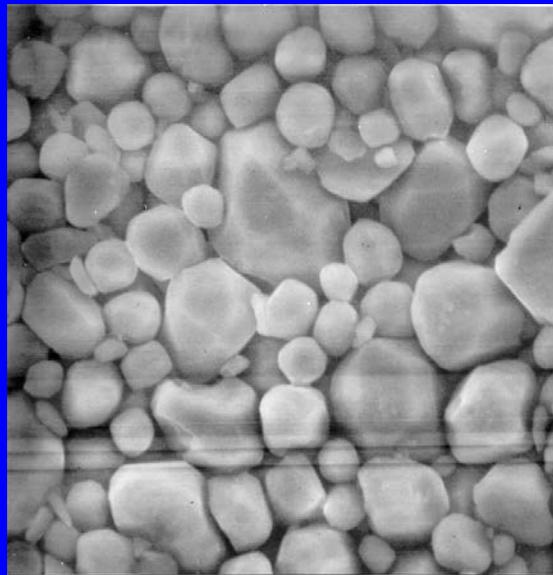
В экспериментах использовали образцы

SV – эфируретановый сополимер и тринитрат глицерина в соотношении 15.3/83.7 – остальное добавки)

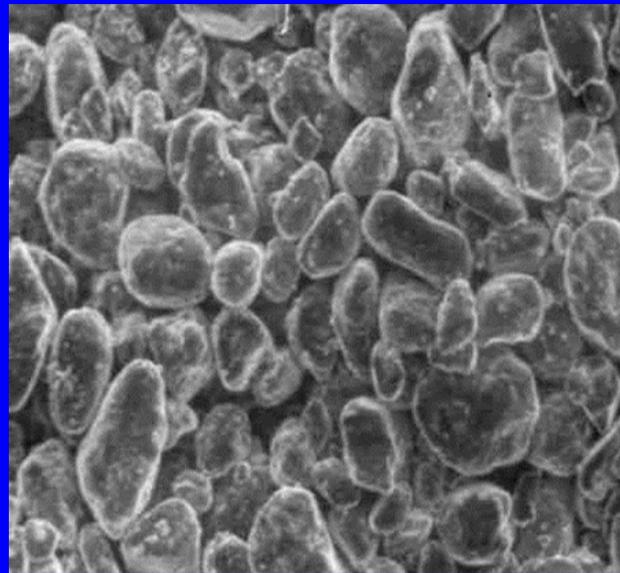
SV_Al – эластомер SV и порошок алюминия в соотношении 81/19 (% масс.)

SV_TT – эластомер SV, порошок перхлората аммония (AP), октоген и порошок алюминия в соотношении 45/18/18/19 (% масс.)

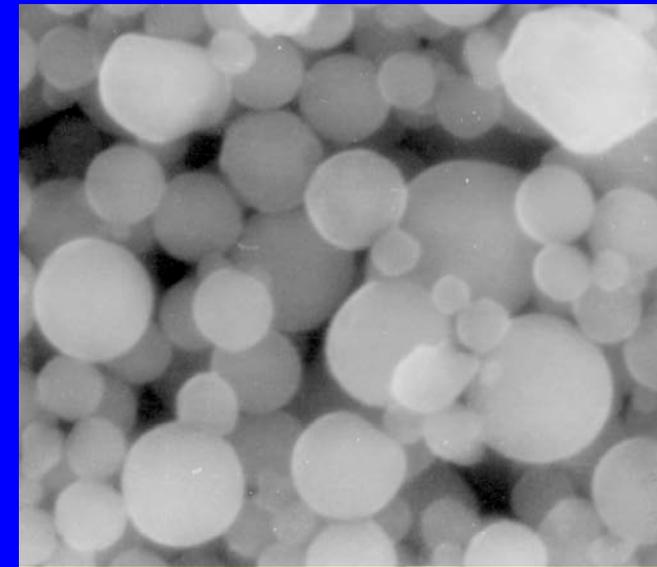
Микрофотографии дисперсных компонентов



ПХА, $d_{cp} \sim 25$ мкм



НМХ, $d_{cp} \sim 40$ мкм



Al, $d_{cp} \sim 5$ мкм

Образец SV_Al опыт 2_1, толщина 4.5 мм, напряжение плавно повышали до $U=7\text{кВ}$, время до воспламенения 16-18с.



0,00 сек



2,87 сек



3,23 сек



3,50 сек



4,37 сек



5,07 сек



5,37 сек



6,47 сек



13,43 сек



13,47 сек



13,50 сек



14,50 сек

Образец SV опыт 1_1, толщина $h=5$ мм, $l=2$ см, напряжение плавно повышали до $U=15$ кВ, время до воспламенения 12-14с.



0,00 сек



0,23 сек



0,27 сек



0,30 сек



0,47 сек



0,50 сек



0,60 сек



0,70 сек



0,80 сек



0,93 сек



1,10 сек



2,00 сек

Образец SV_A1 опыт 2_3 толщина $h=4.5$ мм , $l= 2$ см, при напряжении $U=2$ кВ выдержка 120 с, а при повышении U до 5 кВ сразу начинаются газообразование.



0,00 сек



2,80 сек



4,20 сек



4,97 сек



6,73 сек



7,70 сек



7,80 сек



7,90 сек



7,97 сек



8,03 сек

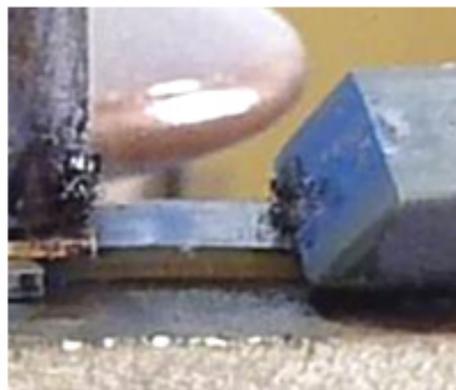


8,17 сек

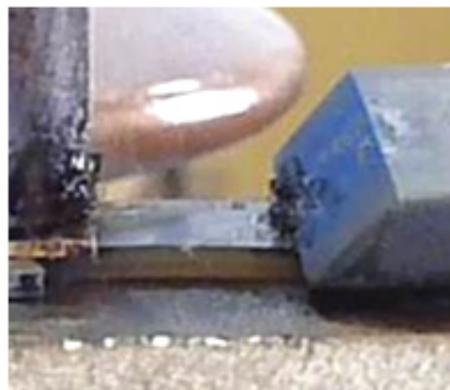


8,37 сек

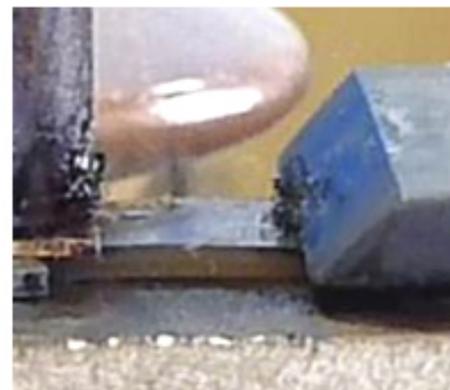
Образец SV_Al опыт 2_4 толщина $h=4.5$ мм, $l = 2$ см, при напряжении $U=2.6$ кВ выдержка 180 с, далее повышение U до 3,8 кВ и при выдержки в течение 120 с наблюдается воспламенение.



0,00 сек



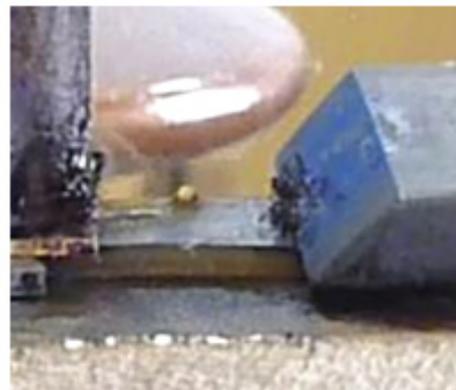
5,13 сек



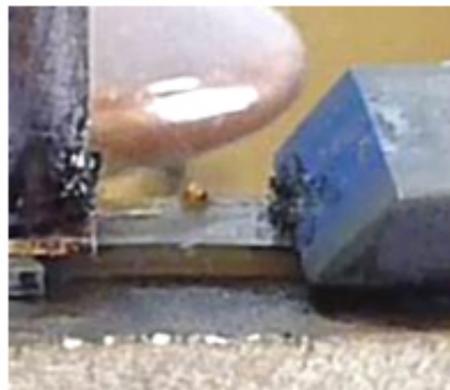
7,00 сек



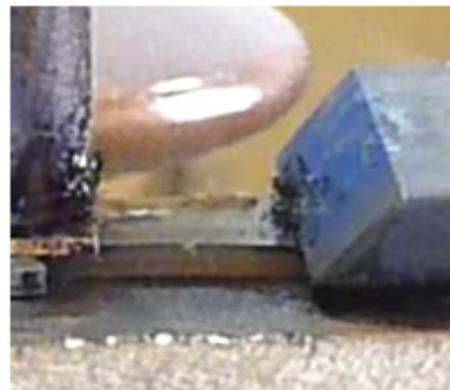
8,77 сек



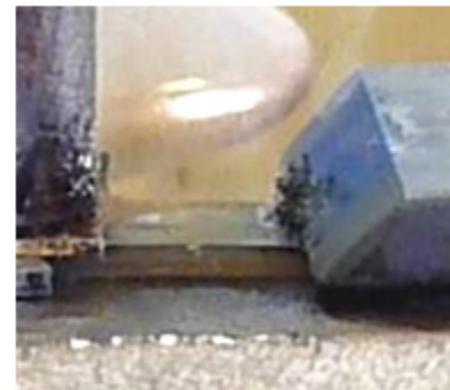
9,10 сек



9,80 сек



10,83 сек



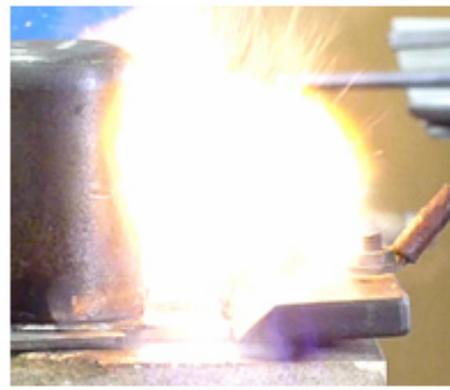
15,23 сек



17,30 сек



17,47 сек



17,50 сек



17,80 сек

Образец SV опыт 1_4, толщина $h=5$ мм , $l=2$ см, при напряжении $U=5$ кВ выдержка 60 с, а при повышении U до 6 кВ сразу воспламенение.



0,00 сек



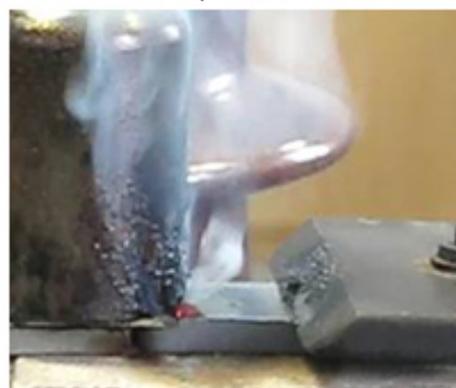
1,10 сек



2,90 сек



3,23 сек



3,57 сек



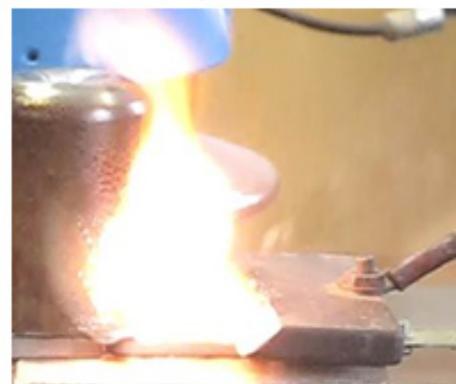
3,90 сек



3,93 сек



3,97 сек



4,23 сек



4,27 сек



4,30 сек

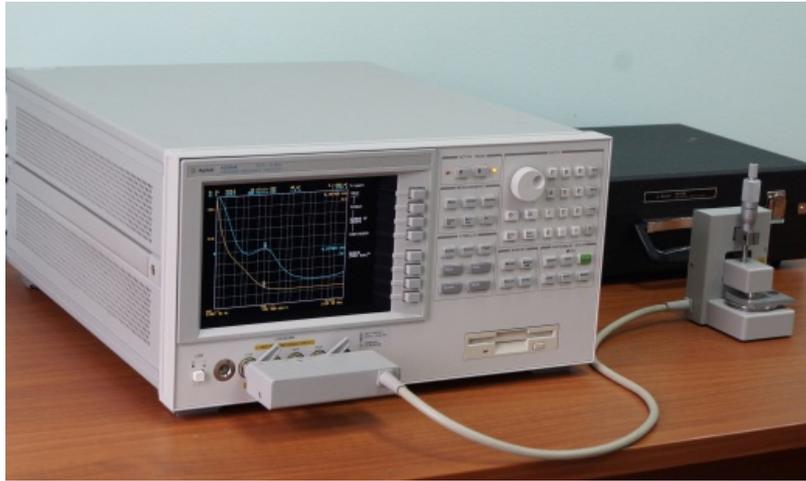


4,57 сек

Образец SV_ТТ с толщиной 7,8 мм,
напряжение $U=2$ кВ, расстояние между электродами по поверхности 3 см,
воспламенение происходит за время менее, чем 2 с.



Определение комплексной диэлектрической проницаемости

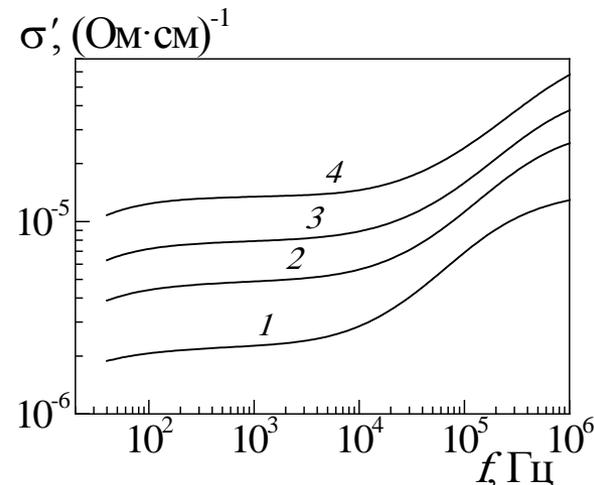
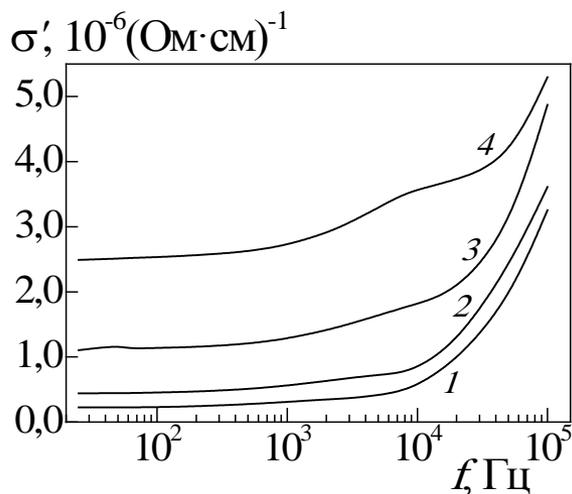
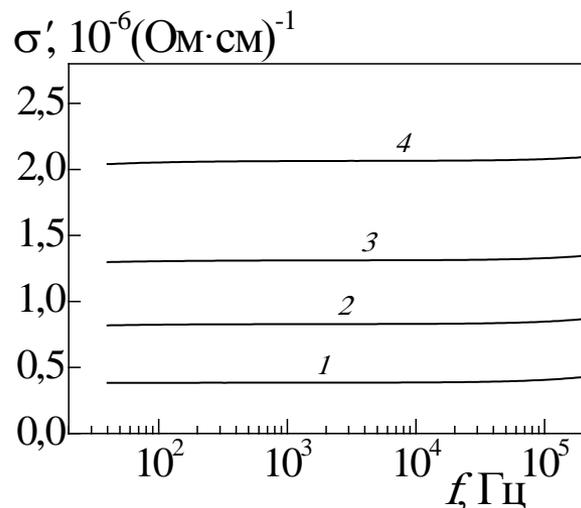
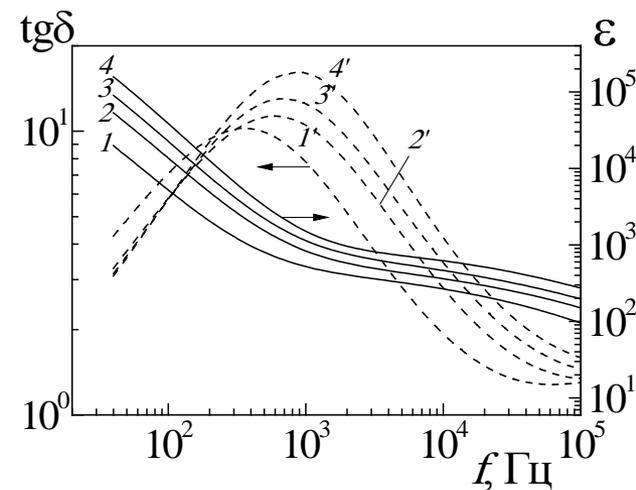
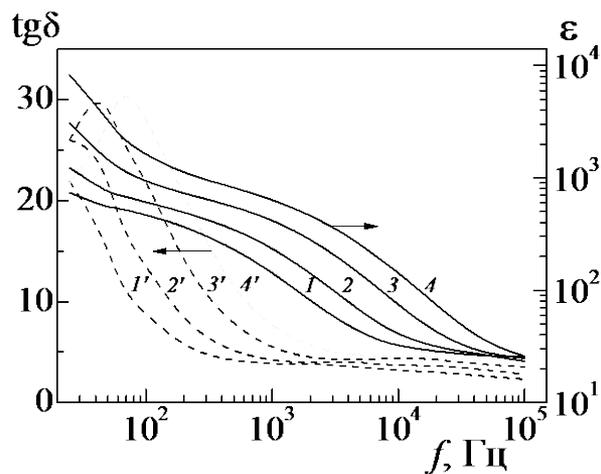
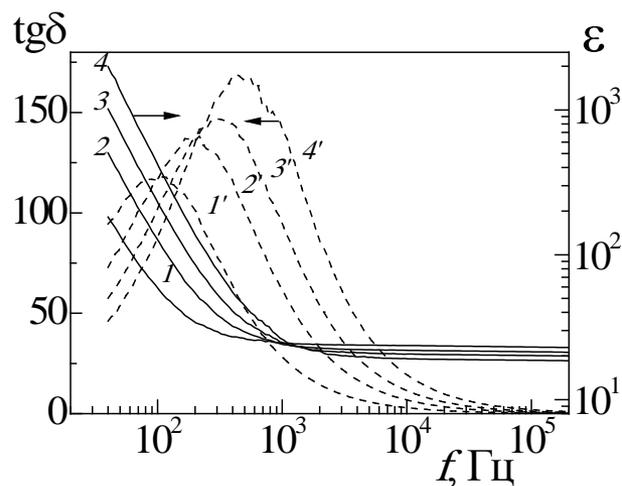


Для определения комплексной диэлектрической проницаемости в области частот электрического поля от 40 до 10^6 Гц применяли автобалансируемый мост Agilent 4294A с ячейкой для измерения параметров твердых диэлектриков 16451В. , а также измеритель иммитанса E7-20 для диапазона частот от 20 до $5 \cdot 10^5$ Гц. Амплитуда подаваемого синусоидального напряжения составляла 1 В. При толщине образца $\sim 2-3$ мм переменное электрическое поле достигает напряженности $E=500-330$ В/м.

Измерения диэлектрической проницаемости проведены не менее чем при 80 значениях частот электрического поля (f) с почти равномерным логарифмическим шагом. Действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon\varepsilon_0 = \varepsilon'\varepsilon_0 - i\varepsilon''\varepsilon_0$ рассчитывали по формулам $\varepsilon' = 4C \cdot h / (\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot d^2)$ и $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$ соответственно (ε_0 – электрическая постоянная, d – диаметр электрода). Действительную часть электропроводности рассчитывали по формуле $\sigma' = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''$.

Для исследования температурных зависимостей диэлектрических характеристик измерительную ячейку размещали в термостате, соединенном при помощи теплоизолированных шлангов с контурами жидкостного термостата типа ВТ10-2 или криотермостата FT-311-80. Контроль температуры вели с использованием измерителя температуры Testo 925 и откалиброванной термопары типа К, расположенной на поверхности образца. Для обеспечения равномерного прогрева образец выдерживался при температуре измерения не менее 15 минут.

Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь, относительной диэлектрической проницаемости и действительной части электропроводности

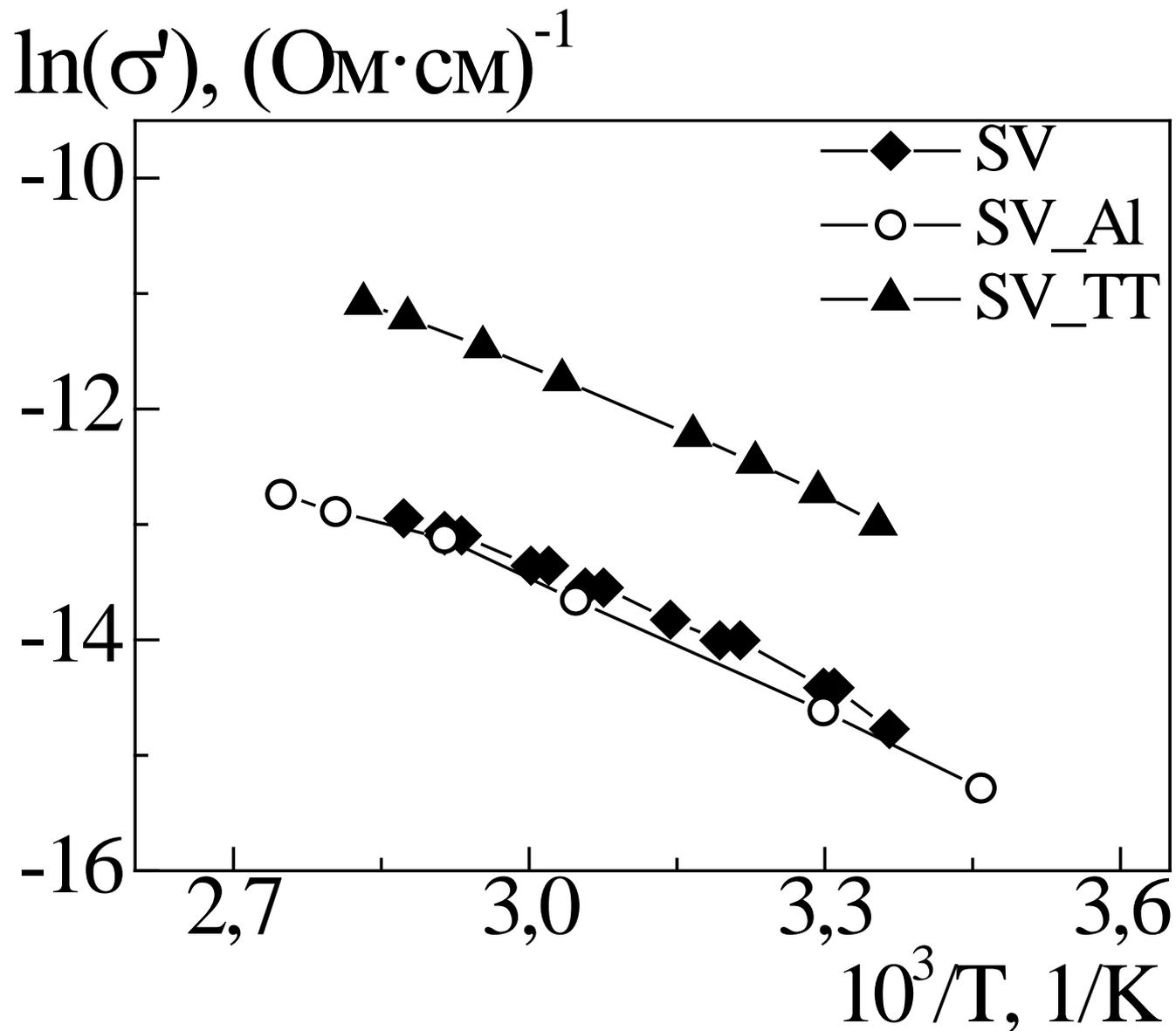


Образец SV при температурах 297 (1), 313 (2), 327 (3) и 343 К (4).

Образец SV_Al при температурах 289 (1), 303 (2), 328 (3) и 357 К (4).

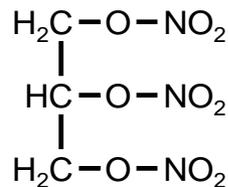
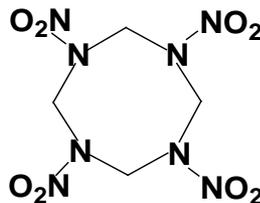
Образец SV_TT при температурах 298 (1), 316 (2), 330 (3) и 348 К (4).

Температурная зависимость действительной части комплексной электропроводности
ЭКС в координатах уравнения Аррениуса



Некоторые свойства использованных веществ

№	Компонент	ΔН, ккал/кг	Скорость детонации, км/с	ρ, г/см ³	Температура НИР, °С
1	Перхлорат аммония NH ₄ ClO ₄	-601	Горение может переходить в детонацию 3,0 км/с	1,95	+150 ⁰ , при T>370 ⁰ быстрый распад со вспышкой
2	Циклотетраметилентетранитрамин (HMX)	70,2	9,1 (при ρ=1,85 г/см ³)	1,9	+281-284, при 350 ⁰ вспыхивает через 1,7 с
3	Уретановый сополимер	-830	нет	1,16	Начало разложения от 250 ⁰ , разложение половины навески при 380 ⁰
4	Нитроглицерин (мощное бризантное вещество) d _{кр} ~ 2 мм	-390	1,1-2,0 (жидкий) 8,0-8,5 (в стальн. трубе 25 мм)	1,6	При T>50 ⁰ разлагается и возможен взрыв, Т вспышки 210 ⁰



Минимальная энергия зажигания пороша алюминия при электрическом разряде 1,4-8 мДж.

Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический справочник. Под ред. акад. Б.П. Жукова – М, 1999.
 Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. -Л.: Химия, 1973.
 Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. –М.: Физматлит, 2008.
 Нишпал Г.А., Милехин Ю.М., Смирнов Л.А., Осавчук А.Н., Гусаковская Э.Г. Теория и практика взрывобезопасности энергоемких материалов. –М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002.

Для стационарного режима имеется аналитическое выражение, позволяющее рассчитать напряжение U_{dis} (кВ), вызывающее тепловой пробой за счет резкого превышения тепловыделения над теплоотводом

$$U_{dis} = 3.79 \times 10^3 \times \varphi \left(\frac{l\lambda}{2\kappa} \right) \sqrt{\frac{\kappa}{a \times f \times \varepsilon \times \operatorname{tg}\delta}}$$

где a – температурный коэффициент, 1/К; $\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь при температуре T_0 ; κ – коэффициент теплопроводности ЭКС, принят 0.004 Вт/(см·К); λ – коэффициент теплоотдачи, для свободной конвекции с жидкостью его принимали 0.01 Вт/(см²·К); f – частота электрического поля, Гц; φ – табулированная функция; l – межэлектродное расстояние, см.

Важно учесть, что выражение в знаменателе с точностью до коэффициента совпадает с электропроводностью на переменном токе $\sigma' \sim 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg}\delta$.

Учитывая немонотонную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры температурный коэффициент приняли из

$$\sigma'(T) = \sigma_0 \exp[a(T - T_0)]$$

Для системы SV температурный коэффициент $a=0.0307$ 1/К, а для систем SV_A1 и SV_TT он составляет 0.0271 1/К и 0.0315 1/К соответственно. Теплоемкость SV и SV_A1 составляли 1300 Дж/(кг К) и 1171 Дж/(кг К).

Для SV расчет дает напряжение теплового пробоя ~0.8 кВ, что ниже чем в условиях эксперимента 3.6 кВ - 7 кВ, а аналогично для SV_TT ~0.4 кВ и 2 кВ соответственно.

Если пренебрегать оттоком тепла на электроды и окружающую среду, то время воздействия переменного напряжения до температуры разложения ЭКС T_d легко рассчитать по формуле

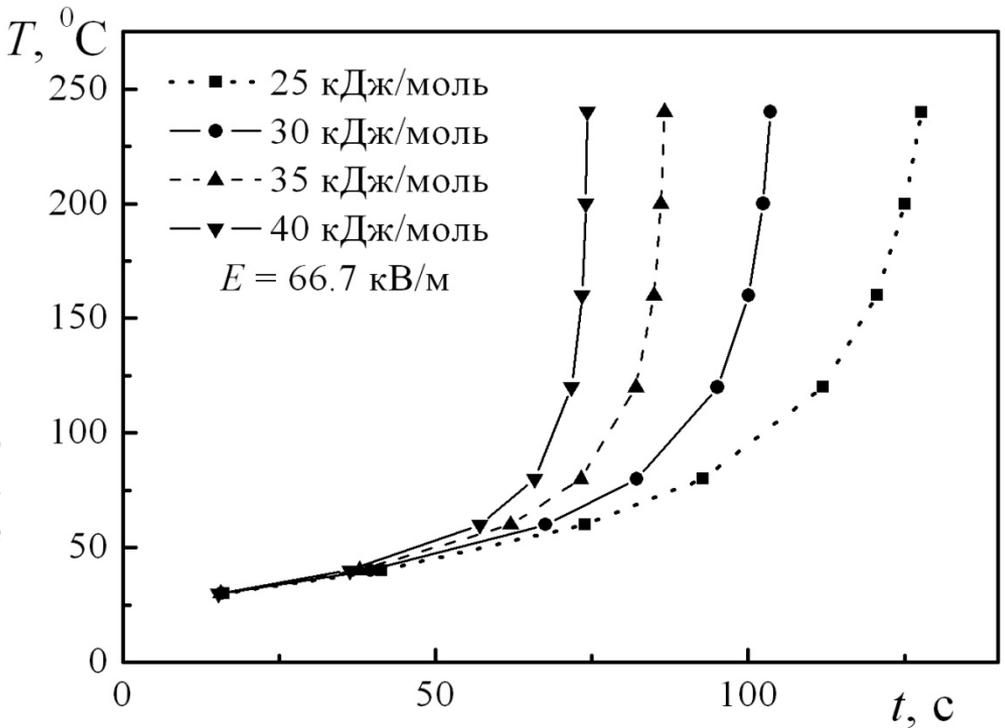
$$t_d = \int_{T_0}^{T_d} \frac{c_p \rho}{E^2 \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} dT$$

где c_p – теплоемкость, ρ – плотность, E напряженность электрического поля, равная U/l , также экспериментально полученная температурная зависимость электропроводности ЭКС

Для образца SV при $U=3.8$ кВ и $l=2$ см для достижения температуры $t_d=433$ К необходимо время действия электрического поля 36 с, что в 2.5 раза **меньше**, чем экспериментальное значение 110 с.

Для образца SV_Al при $U=5$ кВ и $l=2$ см время до достижения температуры разложения $t_d=433$ К всего ~23.8 с, тогда как в эксперименте за 60 с действия электрического поля разложения и возгорания не произошло.

Для образца SV_ТТ при напряжении $U=2$ кВ и $l=3$ см для достижения $t_d=433$ К требуется ~95 с, тогда как **возгорание произошло за ~2 с.**



Результаты расчетов повышения температуры во время действия переменного электрического поля при E_a равных 25, 30, 35 и 40 кДж/моль и одинаковой электропроводности (σ'_0) при $T_0=23^\circ\text{C}$

Что бы снять противоречие следует принять что поле сосредоточено у электродов в слое $h=4,3$ мм, и тогда оно достигнет $\sim 4.6 \cdot 10^5$ В/м, что необходимо для достижения температуры воспламенения.

Выводы

1. Энергетические конденсированные системы на основе полиэфируретана и тринитрата глицерина способны воспламеняться в переменном электрическом поле с частотой 50 Гц. Воспламенению предшествует процесс термического разложения полимерного горючего связующего вблизи электрода, который может сопровождаться взрывным разложением с характерным «хлопком».
2. Процесс воспламенения достаточно сложен и включает: нестационарный джоулев нагрев образца в переменном электрическом поле, а также процессы газификации и формирования теплового потока к поверхности образца от «дугового» разряда в межэлектродном промежутке и воспламенения газообразных продуктов над поверхностью образца.
3. Наличие в энергетической конденсированной системе перхлората аммония вызывает аномально быстрое воспламенение энергетических конденсированных систем на основе тринитрата глицерина.
4. В переменном электрическом поле с частотой 50 Гц обнаружена электролюминесценция полимерного связующего, которая реализуется при плотности тока более 12 A/m^2 .
5. Проведенные оценки показали, что высокая электропроводность энергетической конденсированной системы, содержащей перхлорат аммония, может служить причиной аномально низких величин напряжения, вызывающей ее воспламенение за счет формирования двойного электрического слоя вблизи электродов.

БЛАГОДАРЮ

ЗА

ВНИМАНИЕ!