

**Исследование некоторых микроскопических  
закономерностей электрического пробоя азида  
свинца**

Ю.Н. Сухущин, Ю.А. Захаров, Г.А. Раппопорт

(Представлена научным семинаром кафедры радиационной химии)

Исследование электрического пробоя и возбуждение детонации инициирующих ВВ представляет интерес с точки зрения выяснения элементарных актов химических реакций возбуждения и развития быстропотекающих процессов в твердых веществах [1-3]. Однако при решении задачи изучения микромеханизма указанных процессов необходимо учитывать ряд макроскопических факторов, особенно если эксперимент проводится на поликристаллических прессованных образцах. Одним из таких процессов является возникновение микрозарядов в порах таких образцов [4-6], которые может обусловить понижение электрической прочности материала, а при пробое инициирующих ВВ - вызвать загорание состава, если размеры очага будут больше критических. Другим процессом, понижающим электрическую прочность и приводящим к загоранию состава, является коронный разряд на электродах [7,8]. Экспериментальным критерием для выяснения наличия этих макроскопических факторов является непосредственное обнаружение микро- и краевых зарядов различными способами, основанными на регистрации нестационарных токовых процессов [9,10,11]. Однако и в однородных диэлектриках и полупроводниках наблюдаются явления, сопровождающиеся появлением высокочастотной составляющей тока, связанные с дискретным развитием электронных лавин [12,13], что

затруднит обнаружение явлений коррозии и перекрытия осциллографированием тока. Другим критерием наличия нестационарных разрядов, изменяющих электрическую прочность, является зависимость пробивного напряжения от толщины образца, которое может служить критерием того или иного механизма. [7, 8, 14].

Зависимость пробивного напряжения при наличии микро-разрядов от толщины должна, по-видимому, определяться и пористостью (плотностью) образца. Рассмотрим эти закономерности на основе простейшей модели поликристаллического диэлектрика и элементарной емкостной схемы его замещения (рис. 1).

Напряжение, приложенное к этой системе, распределяется по закону

$$U = n(E_1 a + E_2 b) \quad (1)$$

При большом  $n$  (число элементов схемы замещения), если электрическая прочность определяется первым разрядом в поре, пробивное напряжение образца будет:

$$U_{пр} = n E_{2пр} \left[ \frac{-\epsilon_2}{\epsilon_1} a + b \right], \quad (2)$$

где  $E_{2пр}$  — электрическая прочность воздушного промежутка.

Величины  $n$ ,  $a$  и  $b$  можно выразить через плотности монокристалла  $\gamma_1$ , воздуха  $\gamma_2$  и образца  $\gamma$ , если известны размеры составляющих образец монокристаллов:

$$b = a \left( \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma - \gamma_2} \right); \quad n = \frac{d}{a} \left( \frac{\gamma - \gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2} \right). \quad (3)$$

После чего выражение (2) примет вид:

$$E_{пр} = E_{2пр} \cdot 2 \left( \frac{\gamma - \gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2} \right) \left[ \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + \left( \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma - \gamma_2} \right) \right]. \quad (4)$$

В соответствии с (4) в случае механизма пробоя, связанного с микро-разрядами в порах, электрическая прочность не зависит от толщины образца и определяется его пористостью и величиной пор ( $E_{2пр}$ ). Зависимость пробивного на-

пряжения от межэлектродного расстояния при малых толщинах в настоящее время исследована слабо, однако в некоторых работах имеются результаты [6,15], которые можно экстраполировать в область малых толщин.

Аналогичный расчет для механизма микрозаряда в отдельном монокристалле дает следующее выражение для электрической прочности

$$E'_{np} = E_{np1} \frac{\delta - \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} \left[ \left( \frac{\delta_1 - \delta}{\delta - \delta_2} \right) \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} + 1 \right]. \quad (5)$$

Если пренебречь плотностью газа по уравнению с плотностью вещества, то (4) и (5) принимают следующий упрощенный вид

$$E_{np} = E_{np2} \frac{\delta}{\delta_1} \left[ \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + \frac{\delta_1 - \delta}{\delta} \right], \quad (6)$$

$$E'_{np} = E_{np} \frac{\delta}{\delta_1} \left[ \left( \frac{\delta_1 - \delta}{\delta} \right) \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} + 1 \right]. \quad (7)$$

На рис.1 представлены результаты расчета по формулам (6) и (7) зависимости  $E_{np}$  и  $E'_{np}$  от плотности при  $a = 10^{-5}$  см и  $\epsilon_1 = 10$ . Формальный расчет показывает, что для поликристаллических материалов зависимость электрической прочности от толщины отсутствует, однако имеется характерная зависимость электрической прочности от плотности (кривая с максимумом для пробоя по механизму микрозарядов в порах и прямая для пробоя по механизму микрозаряда в отдельных кристалликах). Из рассчитанной модели следует ещё один путь экспериментальной проверки макромеханизма электрического пробоя: если механизм пробоя не связан с ионизацией в порах, то увеличение диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon_2$  (например, при пропитке диэлектрическими средами) должно приводить к уменьшению электрической прочности образца, и, наоборот, если механизм пробоя определяется мик-

поразами в порах, то увеличение диэлектрической проницаемости среды влечет за собой увеличением электрической прочности образца; кроме того, увеличение электрической прочности должно наблюдаться также из-за более высокой по сравнению с воздухом электрической прочности среды.

Экспериментально нами электрическая прочность образцов определялась на фронте стандартной волны напряжения (1,5 мксек/40 мксек). Образцы представляли собой таблетки, напесованные на стальной полированный ролик из закаленной стали в полихлорвиниловую оболочку. Диаметр контакта — 16 мм. Внешний электрод-шарик диаметром 10 мм, который принимался в специальном устройстве к наружной поверхности образца. Исследование зависимости пробивного напряжения образца в такой системе от толщины показало, что она хорошо описывается формулой:

$$E_{пр} = \frac{A}{R} + B \quad (6)$$

что указывает на ведущую роль скользящих разрядов при пробое в такой системе, и на необходимость защиты верхнего электрода.

В качестве защитной среды был выбран глицерин, как жидкость с достаточно высокой проводимостью, которая способствует выравниванию поля, и практически не смачивает поверхность образца. Все последующие опыты проводились с защитой верхнего электрода.

Результаты исследования влияния плотности и толщины пробиваемого слоя на электрическую прочность азида свинца приведены на рис. 2 в координатах: пробивное напряжение (в) — плотность (г/см<sup>3</sup>) при различной толщине образца и полярности шарового электрода (сплошные линии — отрицательная, штрих-пунктирные — положительная полярности). Опыты проводились на не менее чем 20-ти образцах для каждой полярности. Пределы средне-арифметического отклонения показаны у каждой экспериментальной точки верти-кальной чертой. Кривые зависимости пробивного напряжения

от плотности имеют максимум при плотности  $\rho = 3 \text{ г/см}^3$ , причем возрастание пробивного напряжения в сторону большей плотности выражено более резко. Характер зависимостей для разных полярностей шарового электрода качественно подобен, лишь пробивное напряжение при положительном потенциале шара меньше. По средним значениям  $\bar{U}_{пр}$  были построены зависимости  $\bar{U}_{пр}(h)$  и  $\bar{E}_{пр}(h) = \bar{U}_{пр}(h)/h$ . Оказалось, что  $\bar{U}_{пр}$  возрастает с увеличением толщины практически линейно:

$$\bar{U}_{пр} = A + Bh \quad (9)$$

Значения А и В для различных плотностей образца - полярности шарового электрода представлены в следующей таблице:

$\rho$ г/см <sup>3</sup>	" + "		" - "	
	А	В	А	В
1,5	-	-	0,203	107,5
2	-	-	0,716	100,0
2,5	-	-	0,35	89,5
3	-0,13	106,5	-0,07	115,5
3,5	0,288	103,4	0,36	107,0
4	0,544	110,0	0,65	121,0
4,5	1,36	107,0	1,59	110,0
4,7 *	1,356	125,0	1,42	136,0

\* Результаты экстраполяции и плотности монокристалла азида свинца.

Электрическая прочность с увеличением толщины для образцов с плотностью большей г/см<sup>3</sup> уменьшается, причем зависимость эта тем ярче выражена, чем выше плотность (см. рис.3)

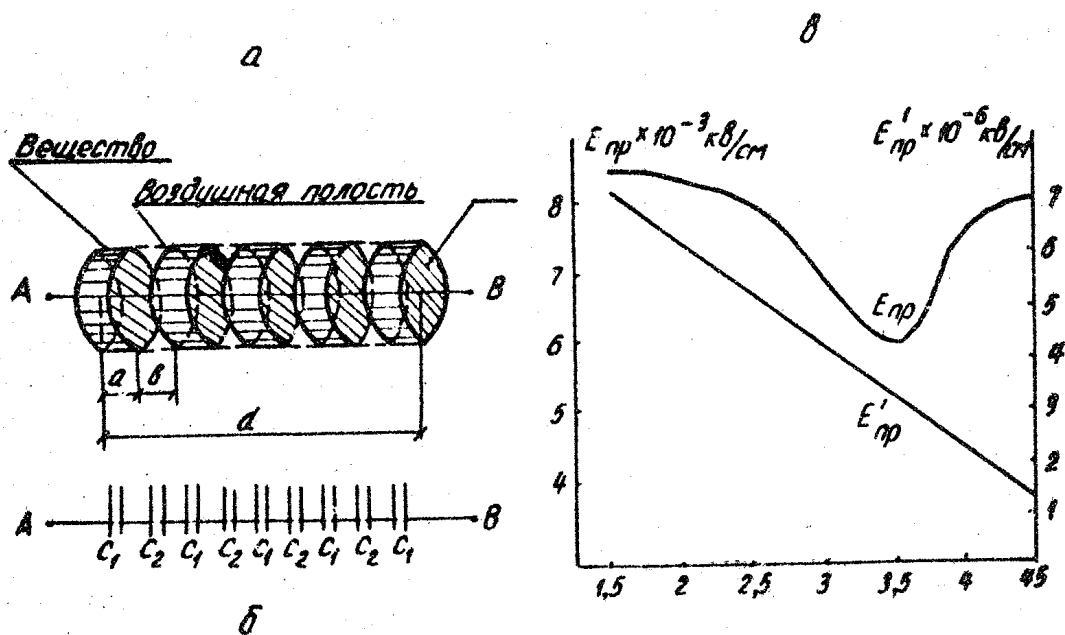


Рис. I. Модель (а), схема замещения (б) и результат расчета пробоя в послойно-пористом диэлектрике.

Полученные зависимости пробивного напряжения азид свинца от плотности качественно совпадают с результатами расчета по приближенной модели микрозарядов в порах сложного диэлектрика. Причем в области малых плотностей электрическая прочность азид свинца практически не зависит от толщины, что также согласуется с результатами расчета. Однако по мере приближения плотности образца к плотности монокристалла наблюдается и усиливается зависимость среднего пробивного градиента от толщины, что не согласуется с предположением о преобладающей роли микрозарядов в порах при пробое поликристаллических образцов, причем, если считать причиной уменьшения электрической прочности с увеличением толщины увеличение вероятности наличия слабых мест в образце, то зависимость эта должна усиливаться с увеличением толщины, что также не согласуется с полученными результатами. Естественно предположить, что при большой плотности механизм пробоя прессованного поликристаллического образца может быть подобен механизму пробоя сплошных диэлектриков. По аналогии с процессами газового пробоя увеличение плотности эквива-

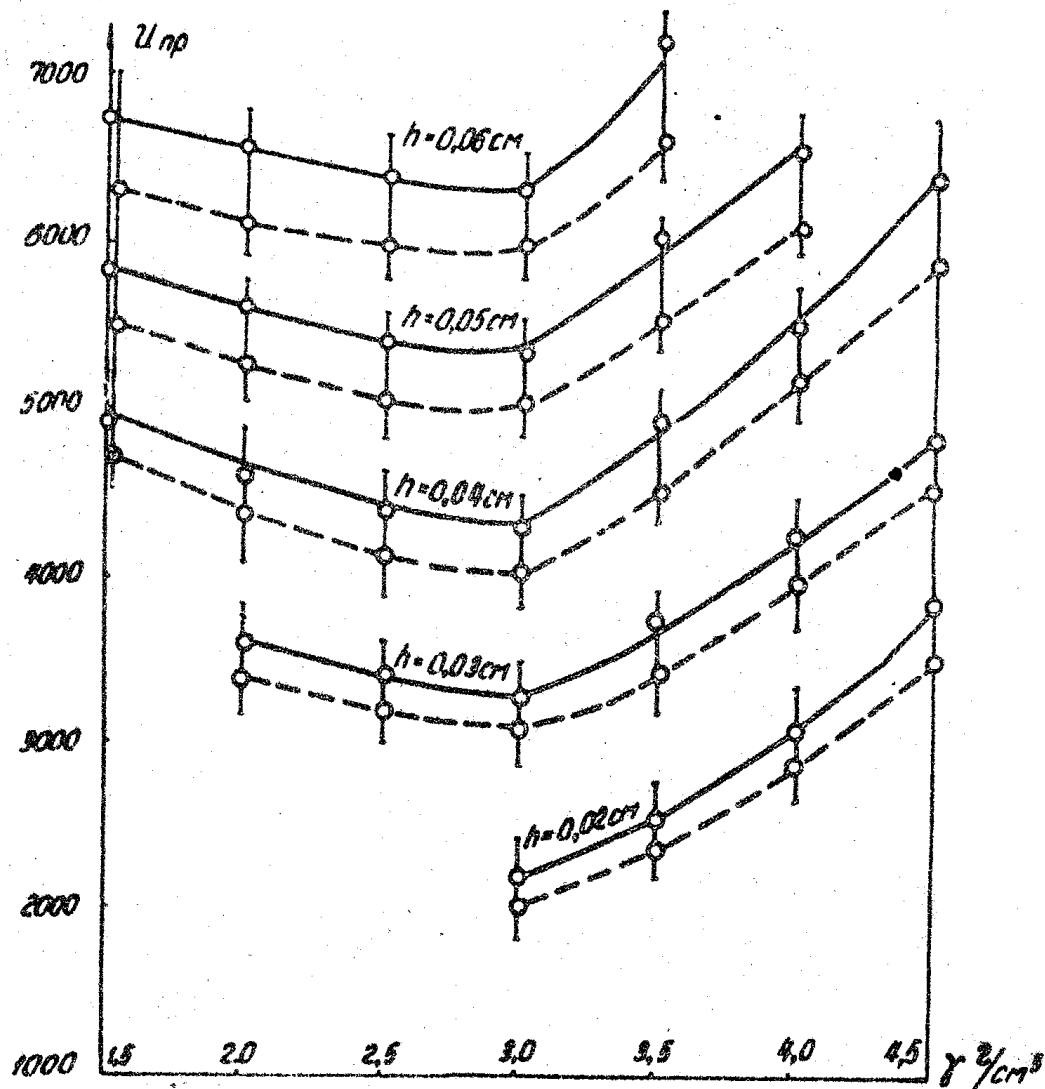


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения азид свинца от плотности и толщины пробиваемого слоя при различной полярности плоского электрода.

лентно повышению давления. Это в обоих случаях приводит к уменьшению длины пробега между актами ударной ионизации  $S_{ii}$  и, следовательно, - к увеличению  $E_{пр}$ . В целях выяснения справедливости этой гипотезы была построена зависимость  $U_{пр}$  от произведения  $\rho h$  ( $\rho h$  - аналог комплексов  $\rho h$  в газовом пробое - закон Пашина [4], что представлено на рис. 4. Оказалось, что в области  $\rho \geq 3$  г/см<sup>3</sup> значения пробивного напряжения группируются в сравнительно узкой области, то есть определяются произведением  $\rho h$ , независимо отдельно от толщины и плотности.

Была проведена также группа экспериментов по влиянию пропитки жидкостями с различными диэлектрическими свойствами на пробивное напряжение прессованных поликристаллических образцов азида свинца. Пропитка глицерином, крезолом и четыреххлористым углеродом не очень заметно изменяет характер зависимости  $U_{пр}(\gamma)$  даже максимум пробивного напряжения имеет место при той же плотности -  $\gamma = 3,0 + 3,5$  г/см<sup>3</sup>. Пропитка же трансформаторным маслом качественно изменяет ход зависимости - с уменьшением плотности пробивка напряжения монотонно возрастает. По-видимому для образцов, пропитанных глицерином,  $ССС_{ii}$  и крезолом, процесс разряда в воздушных порах частично или полностью заменяется разрядом в жидкости; трансформаторное же масло обладает высокой электрической прочностью и пробой происходит исключительно в микрокристаллах азида свинца. Расчетной модели удовлетворяет там же тот факт, что электрическая прочность пропитанных составов малой плотности возрастает по ряду жидкостей диэлектрической проницаемости в котором возрастает. При большей же плотности род противоположен. Следует отметить, что экстраполяция кривых  $U_{пр}(\gamma)$  к плотности монокристалла не сводит их в одну точку, что говорит о вмешательстве жидкостных прослоек в электронные стадии пробоя.

Таким образом, результаты исследования позволяют предположить, что при пробое образцов с плотностью, близкой



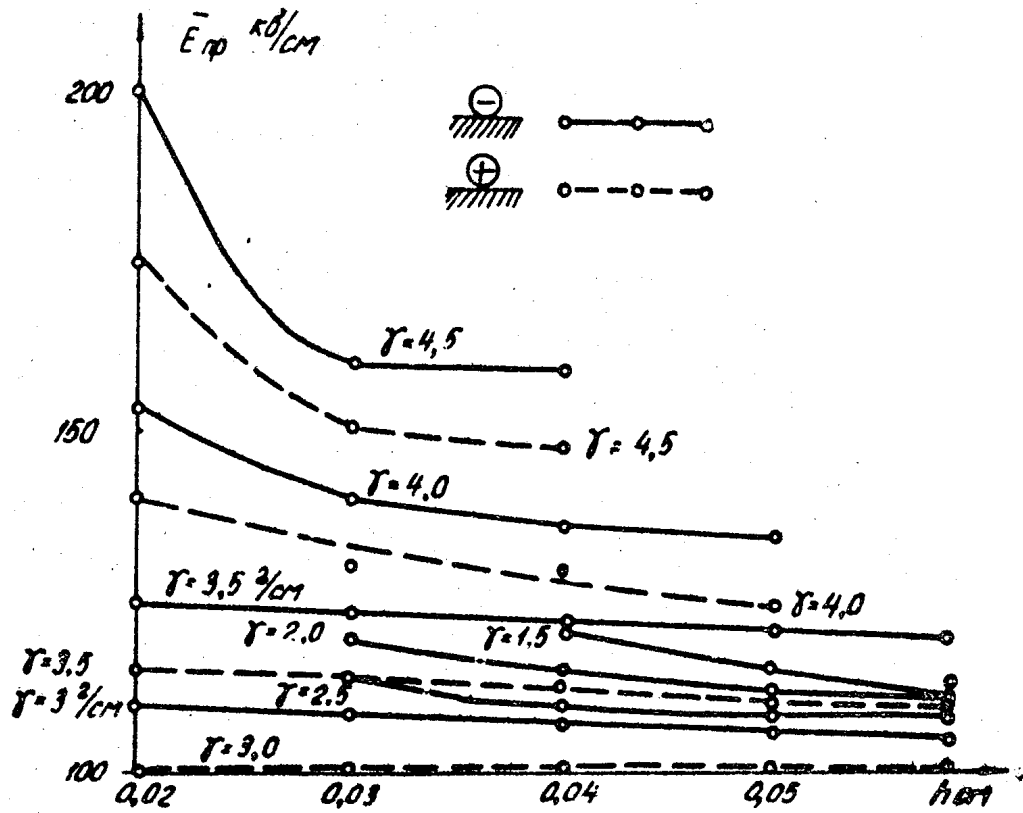
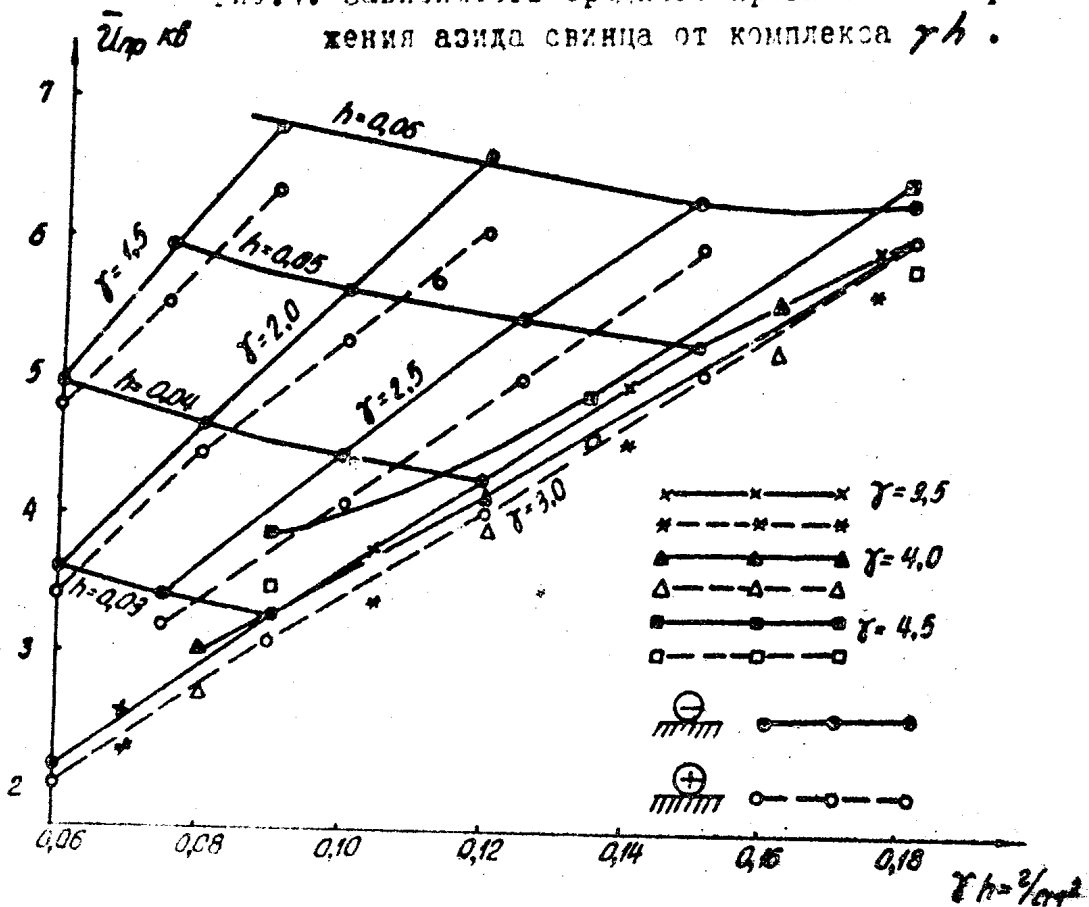


Рис. 3. Зависимость среднего пробивного градиента азида свинца от плотности и толщины.

Рис. 4. Зависимость среднего пробивного напряжения азида свинца от комплекса  $\gamma h$ .



к монокристаллической, механизм пробоя связан с развитием электронных лавин, как и предполагалось ранее [1] для образцов же с плотностью  $\approx 3$  г/см<sup>3</sup> процесс определенно обусловлен микрозарядами в порах.

При исследовании пробоя прессованных пропитанных образцов азида свинца мы обратили внимание на факт, что в образцах малой плотности, пропитанных глицерином и крезолом, детонация при пробое не возбуждается, в образцах же высокой плотности детонация имеет локальный характер и не распространяется на весь заряд. В литературе описываются опыты Уббелодде и Вудворте [16] по воспламенению взрываемых в жидкости монокристаллов азида свинца. Биркомшоу и Тейлор [16] считают, что высококипящая жидкость уменьшает саморазогрев частиц и подавляет тем самым тепловое воспламенение. Таким образом, явление подавления возбуждения детонации в образцах малой плотности может иметь чисто тепловую природу. Возникновение же тепловой детонации при пробое плотных пропитанных образцов может иметь две причины:

- 1) при больших плотностях контакт между частицами улучшается и возникают условия саморазогрева системы;
- 2) возбуждение детонации при пробое имеет не и тепловую природу, тогда как ее распространение - тепловую.

С целью установления истинной причины были поставлены опыты по возбуждению детонации в пропитанных образцах плотности 4,5 г/см<sup>3</sup> другими воздействиями - теплом и ударом. В этих случаях детонацию также возбудить не удалось. Следует отметить, что пропитка глицерином не связана с химическим взаимодействием и глицерина с азидом: отмывка глицерина водой с последующей просушкой препарата полностью возвращает чувствительность азид свинца к тепловому импульсу и удару.

Описанные явления позволяют сделать предположение, что если электрический пробой происходит по механизму микрозарядах в порах или полых дефектах, то возбуждение детонации имеет чисто тепловую природу; при электронно-лавинном механизме пробоя азид свинца механизм возбуждения де-

тонации возможно имеет и не тепловую природу. Последнее может быть связано с развитием химической реакции между продуктами ударной ионизации, как это указывалось нами ранее [1]

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.А. Захаров, Ю.Н. Сухушин. Тезисы I Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву, Москва, 1967.
2. Ю.Н. Сухушин, П.Ф. Яворов, Ю.А. Захаров, А.А. Воробьев. Тезисы II Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву, Ереван, 1969.
3. Ю.Н. Сухушин, Ю.А. Захаров. Изв. ТПИ, т.
4. Г.И. Сканова. Физика диэлектриков (область сильных полей), М., Физматгиз, 1958.
5. Дж.Б. Беркс, Д.Г. Шуллон. Прогресс в области диэлектриков, т I, ГЭИ, М-Л., 1962.
6. В.П. Вдовико. Сб. Электрические и высоковольтные характеристики эпоксидных компаундов, Новосибирск, "Наука", 1967, 89+98; II 9+ 123.
7. Г.С. Кучинский, ЖТФ, 25, 7, 1209 (1955).
8. М.И. Мантров, Электричество, №9, 54, (1940).
9. Р.М. Кесених. Методы лабораторных испытаний электроизоляционных материалов, М., "Высшая школа", 1964.
10. Ионизационное старение и короностойкость высоковольтной изоляции, ЦИНТИ электротехнической промышленности и приборостроения, М., 1960.
11. Р.Х. Крейгер. Сб. "Энергетика за рубежом, вып. 2, Кабельные линии высокого напряжения, М-Л., ГЭИ, 1954.
12. 22, 6, 516+522 (1967).
13. А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов, Лавинно-протелные аноды и их применение в технике СВЧ, М., "Сов. радио", 1968.
14. А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Электрический пробой - разрушение твердых диэлектриков, М., "Высшая школа", 1966.
15. F. Polly, D. Obrikat, K. Mayer. Z. ang. Phys. 22, 6, 516+522, 1967.
16. Ф. Боуден, А. Иоффе, Быстрые реакции в твердых веществах, М., И.И.Л., 1962.