

метра при этом была практически равна нулю, в то время как на выходе ЛДИС эффективное значение напряжения шумов было равно 50 мВ (1% турбулентности). Масштаб функции для удобства был выбран в 2.25 раза крупнее, чем для предыдущей фигуры.

Корреляционные функции исследуемого процесса, полученные вычитанием графика фиг. 4 из графиков фиг. 3, представлены на фиг. 3 крестиками на кривых корреляционных функций сигналов термоанемометра.

Таким образом, приведенные результаты показывают полное совпадение статистических характеристик процесса, измеренных с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости и термоанемометра. Учитывая преимущества ЛДИС, можно ожидать, что в ближайшем будущем он станет серьезным конкурентом термоанемометра.

Авторы благодарят Ю. Е. Нестерихина за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

Поступила 29 IV 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Goldstein R. J., Kreid D. K. Measurement of laminar flow development in a square duct using a laser-Doppler flowmeter. Trans. ASME, Ser. E., J. Appl. Mech., 1967, vol. 34, No. 4, pp. 813—818.
2. Laser Doppler velocimeter for measurement of localized flow velocities in liquids. Proc. IEEE QE-2, 1966, vol. 54, No. 3, pp. 424—425.
3. Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С., Столповский А. А., Уткин Е. Н., Шмойлов Н. Ф. Измерение скорости в потоке жидкости с использованием оптического эффекта Доплера. Автометрия, 1969, № 6, стр. 115—117.
4. Great C. Measurement of turbulence statistics with a laser velocimeter. J. Phys., Ser. E, 1970, vol. 3, No. 2, pp. 158—160.
5. Грохольский А. Л., Соболев В. С., Столповский А. А., Ткачев Н. И., Уткин Е. Н. Трехканальный радиочастотный термоанемометр постоянного сопротивления. М., ГОСИНТИ, 1968.

УДК 537.226:662.413

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРЕССОВАННОГО АЗИДА СВИНЦА

В. В. Стеньгач (Москва)

Приводятся некоторые результаты экспериментального определения электрической прочности азида свинца в зависимости от ряда физических факторов: плотности, величины кристаллов, давления воздуха, поверхности электродов и др.; рассматривается определенная модель прессованного азида свинца.

Изучение пробоя твердых веществ, жидкостей и газов продолжает привлекать внимание исследователей [1—5]. Представляет интерес и изучение пробоя двухфазных систем. Представителем двухфазного диэлектрика является прессованный азид свинца, в котором часть объема занимают кристаллы азида свинца, другую часть — воздух. Изучение пробоя азида свинца и выяснение его механизма представляет интерес и для изучения чувствительности его к электрической искре.

Описание экспериментов. В опытах использовались стальные полированные электроды с радиусом закругления 1.5 мм, расстояние между которыми изменялось от 0.05 до 0.5 мм, что обеспечивало в месте наименьшей толщины диэлектрика поле, близкое к однородному [2].

Средняя напряженность электрического поля между шарами рассчитывалась по приближенной формуле [6]

$$E = 0.9 \frac{U}{d} \frac{r + 1/2d}{r} \quad (1)$$

Здесь U — приложенное к электродам напряжение, d — минимальное расстояние между шаровыми поверхностями, r — радиус шара.

Отклонение величины электрического поля между шаровыми поверхностями, которые находятся одна от другой на расстоянии d , от напряженности электрического поля между параллельными пластинками, расположенными одна от другой на том же расстоянии d , при условии, что к электродам в обоих случаях приложено одно и то же напряжение, при использовавшихся электродах и межэлектродных расстояниях не превышало 5%.

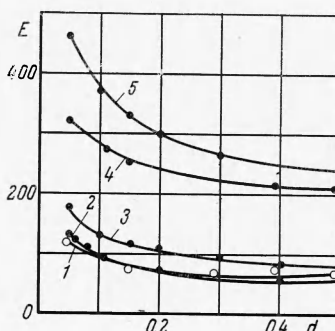
По значениям пробивного напряжения и расстояния между электродами по формуле (1) вычислялась электрическая прочность.

Пробивное напряжение образцов определялось в двух режимах: а) при подаче на электроды статического напряжения при плавном повышении напряжения примерно со скоростью 100 в/сек; б) при подаче на электроды П-образного импульса длительностью $2 \cdot 10^{-7}$ сек. Способ получения такого импульса при помощи длинной линии описан в монографии [7]. Пробивное напряжение определялось в первом режиме при помощи киловольтметра, подключенного параллельно искровому промежутку, и во втором случае — при помощи осциллографа. Расстояние между электродами определялось измерительным микроскопом.

Результаты опытов. Электрическая прочность спрессованного азид свинца при разных расстояниях между электродами не является постоянной величиной, а уменьшается с увеличением межэлектродного расстояния. На фиг. 1 приведены зависимости электрической прочности E (в кВ/см) азид свинца, запрессованного до плотности 2.4 г/см^3 , и воздуха при атмосферном давлении от расстояния d между электродами: 1 — для азид свинца при статическом напряжении; 2 и 3 — для воздуха при статическом напряжении (2 — по данным [8], 3 — по результатам данной работы); 4 — для азид свинца при импульсном напряжении; 5 — для воздуха при импульсном напряжении. Из сравнения этих зависимостей следует: электрическая прочность азид свинца как при статическом, так и при импульсном напряжении ниже электрической прочности воздуха при атмосферном давлении; электрические прочности азид свинца и воздуха при атмосферном давлении возрастают с уменьшением межэлектродного расстояния; зависимости $E = f(d)$ для воздуха и азид свинца имеют одинаковый вид; электрические прочности воздуха и спрессованного азид свинца при импульсном напряжении в 2.5 — 3 раза выше, чем при статическом напряжении.

Приводим данные по электрической прочности азид свинца, запрессованного до плотности 2.7 г/см^3 между электродами с различными радиусами (r) закругления ($d = 0.15 \text{ мм}$)

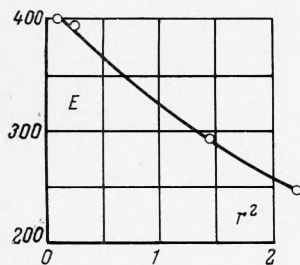
$r = 0.3$	0.5	1.2	1.5	(мм)
$E = 400$	390	290	250	(кВ/см)



Фиг. 1

Электрическая прочность спрессованного азид свинца уменьшается с увеличением радиуса закругления электродов.

На фиг. 2 представлена зависимость электрической прочности азид свинца E (кВ/см), запрессованного до плотности 2.7 г/см^3 , от квадрата радиуса закругления r^2 (мм²) при межэлектродном расстоянии 0.15 мм ; из фигуры видно, что с увеличением поверхности электродов ($S \sim r^2$), вблизи которой создается высокая напряженность электрического поля, уменьшается электрическая прочность спрессованного азид свинца.



Фиг. 2

На фиг. 3 приведена зависимость электрической прочности E (кВ/см) спрессованного азид свинца от коэффициента заполнения k (%): 1 — для импульсного напряжения, 2 — для статического напряжения, 3 — рассчитанная по формуле. Пунктирная линия соединяет точки, соответствующие электрическим прочностям воздуха и насыпного азид свинца. Из фиг. 3 видно, что электрическая прочность спрессованного азид свинца при коэффициенте заполнения меньше 70% ниже, а при коэффициенте заполнения больше 70% выше электрической прочности воздуха; с увеличением коэффициента заполнения она сначала несколько уменьшается (до $k = 38\%$), а затем растет (кривая имеет минимум); при импульсном напряжении в 2—2.5 раза выше электрической прочности при статическом напряжении.

С целью выяснения влияния размеров кристаллов на электрическую прочность были изготовлены три осаждения азид свинца с различной величиной кристаллов, определявшейся по микрофотографиям. Для этих трех осадков приводим электрические прочности азид свинца при статическом E^0 и импульсном напряжениях E^* (кВ/мм), запрессованного до плотности 2.7 г/см^3 , в зависимости от величины кристаллов δ (мм)

(1) $\delta = 0.3 \div 1.0$,	$E^0 = 160$,	$E^* = 260$
(2) $\delta = 1.0 \div 3.0$,	$E^0 = 140$,	$E^* = 240$
(3) $\delta = 4.0 \div 7.0$,	$E^0 = 110$,	$E^* = 170$

Отсюда видно, что с увеличением размеров кристаллов пробивное напряжение понижается (при одной и той же плотности).

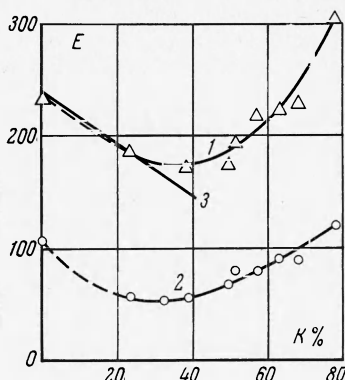
С повышением давления воздуха в интервале от $p = 1$ до $p = 30$ атм электрические прочности воздуха и азидов свинца, запрессованного до плотности 2.4 г/см^3 , увеличиваются по линейному закону как при импульсном, так и при статическом напряжении; на фиг. 4 приведены зависимости: 1 — для воздуха при импульсном напряжении, 2 — для воздуха при статическом напряжении, 3 — для азидов свинца при импульсном напряжении, 4 — для азидов свинца при статическом напряжении; электрическая прочность воздуха имеет более высокие значения, чем электрическая прочность азидов свинца при плотности 2.4 г/см^3 .

Модель прессованного азидов свинца. Прессованный азид свинца состоит из кристаллов азидов свинца различной формы, отличающихся между собой по размерам. Промежутки между кристаллами занимает воздух при давлении окружающей атмосферы. В зависимости от давления прессования, величины кристаллов и размеров навески твердая фаза прессованного азидов свинца занимает от 20 до 90% объема, а остальная часть объема занимает воздух. Тот факт, что электрическая прочность прессованного азидов свинца растет с увеличением давления воздуха, указывает на то, что пробой происходит по газовой фазе (по воздушным каналам).

Пробой, по-видимому, происходит по изломанному воздушному каналу между кристаллами различной величины, хаотически расположенными в объеме, как показано на фиг. 5, слева. Для простоты рассмотрения можно себе представить две модели, каждая из которых отражает отдельные стороны действительной картины пробоя: а) кристаллы имеют вид параллелепипедов, грани которых параллельны поверхности электродов и друг другу, между электродами есть сквозной воздушный канал (фиг. 5, а); б) в виде воздушного цилиндрического канала, стенки которого образованы кристаллами (фиг. 5, б).

С увеличением коэффициента заполнения (или плотности), достигаемого увеличением давления прессования, в модели а промежутки между кристаллами будут уменьшаться, в модели б будет происходить сужение сечения воздушного канала, образованного стенками кристаллов. Рассмотрим, как при этом будет изменяться напряженность поля в воздушных каналах в моделях а и б.

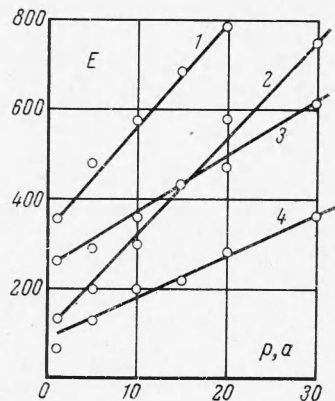
При расположении кристаллов модели а прессованный азид свинца можно рассматривать как сложный диэлектрик. При импульсном или переменном напряжении (при малых диэлектрических потерях) напряженность электрического поля E_l в l -слое сложного диэлект-



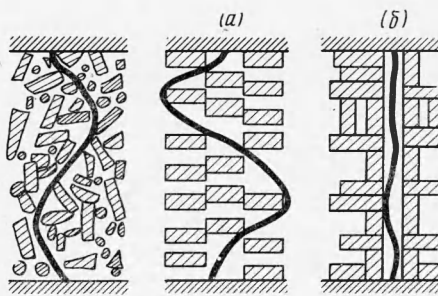
Фиг. 3

рического поля в воздушных каналах в моделях а и б.

При расположении кристаллов модели а прессованный азид свинца можно рассматривать как сложный диэлектрик. При импульсном или переменном напряжении (при малых диэлектрических потерях) напряженность электрического поля E_l в l -слое сложного диэлект-



Фиг. 4



Фиг. 5

рика, состоящего из n слоев толщиной d_1, d_2, \dots, d_n с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ соответственно равна

$$E_l^* = U \left(\epsilon_l \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\epsilon_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

где U — напряжение, приложенное к электродам.

Пусть прессованный азид свинца состоит из n слоев азидов свинца и n слоев воздуха. Обозначим воздушные слои индексом 1, слои азидов свинца — индексом 2. Тогда на-

пряженность поля в воздушном слое l равна

$$E_{1l} = \frac{U}{\varepsilon_1} \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_{1i}}{\varepsilon_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_{2i}}{\varepsilon_2} \right)^{-1} = \frac{U}{\varepsilon_1} \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)^{-1} \quad (3)$$

Здесь d_1, d_2 — суммарные толщины слоев воздуха и азида свинца соответственно. В случае плоскопараллельных слоев

$$\frac{d_1}{d_1 + d_2} = 1 - k, \quad \frac{d_2}{d_1 + d_2} = k, \quad d_1 + d_2 = d \quad (4)$$

где k — коэффициент заполнения объема азида свинца.

С учетом (4) из формулы (3) находим

$$E_{1l} = \frac{U}{\varepsilon_1 d} \left(\frac{1-k}{\varepsilon_1} + \frac{k}{\varepsilon_2} \right)^{-1} \quad (5)$$

Приняв

$$\varepsilon_1 \approx 1, \quad \varepsilon_2 \approx 20, \quad U/d = E$$

получим

$$E_{1l} = E (1 - 0.95k)^{-1} \quad (6)$$

Экспериментально определяется E . Если принять, что пробой наступает тогда, когда в воздушных порах напряженность поля достигает пробивной величины, то электрическая прочность прессованного азида свинца E будет определяться формулой

$$E = E_0 (1 - 0.95k) \quad (7)$$

где E_0 — электрическая прочность воздуха при определенном давлении, расстоянии между электродами и характере напряжения.

Исходя из модели a , электрическая прочность прессованного азида свинца должна уменьшаться с увеличением коэффициента заполнения, что в действительности наблюдается на опыте до $k = 32\%$.

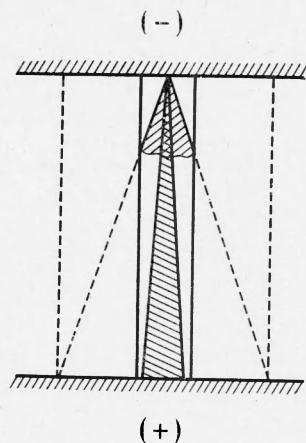
В воздушном канале модели b напряженность поля при условии, если стенки канала совпадают с направлением электрического поля, не зависит от сечения цилиндрического канала и равна $E = U/d$. Однако при уменьшении сечения воздушных каналов можно ожидать повышения электрической прочности по следующим соображениям. Пробой воздуха связан с отдельными элементарными лавинами, образующимися от отдельного электрона. Лавина электронов представляет собой конус с основанием у анода. От места появления родоначального электрона лавина расширяется вследствие диффузии электронов. Радиус сечения определяется уравнением

$$r = \sqrt{2Dt} \quad (8)$$

где D — коэффициент диффузии, t — время распространения лавины. Радиус лавины зависит от напряженности поля: он убывает по мере повышения напряженности. Если радиус канала становится меньше радиуса лавины, то непременно должно затрудниться дальнейшее развитие лавины, так как электроны полностью или частично будут отдавать свою кинетическую энергию стенкам (фиг. 6). Чтобы вызвать пробой, нужно при таких условиях повысить напряженность поля и тем самым понизить диаметр элементарной лавины. Таким образом, уменьшение сечения воздушных каналов приводит к увеличению электрической прочности. Увеличение электрической прочности при увеличении коэффициента заполнения наблюдается на опыте при $k > 35\%$.

В действительности (фиг. 5, слева) при увеличении коэффициента заполнения (или плотности) будет происходить и сужение воздушных каналов и увеличение напряженности электрического поля. Величина электрической прочности будет определяться суммарным воздействием обеих причин.

Из рассмотрения модели прессованного азида свинца и расчета напряженности электрического поля следует, что экспериментальная зависимость электрической прочности прессованного азида свинца от коэффициента заполнения (кривая с минимумом)



Фиг. 6

объясняется, во-первых, тем, что напряженность поля в воздушных порах больше той напряженности поля, которая была бы в том же искровом промежутке и при той же разности потенциалов, если бы не было вовсе кристаллов азидов свинца, и, во-вторых, влиянием сечения воздушных каналов на пробивное напряжение. При $k < 33\%$ электрическая прочность прессованного азидов свинца уменьшается с увеличением k , вследствие того что в воздушных порах увеличивается напряженность электрического поля. При $k > 33\%$ с увеличением k продолжает увеличиваться напряженность электрического поля, однако преобладающее влияние оказывает увеличение пробивного напряжения вследствие уменьшения сечения воздушных каналов, которые и приводят к росту электрической прочности прессованного азидов свинца. Увеличение пробивного напряжения с уменьшением сечения воздушных каналов наблюдал А. Гемант [8], производивший опыты с парафиновыми пластинками, в которых создавались воздушные каналы определенного сечения. Уменьшением величины воздушных каналов объясняется и рост электрической прочности прессованного азидов свинца с уменьшением величины кристаллов (при одинаковой плотности).

Электрическая прочность прессованного азидов свинца уменьшается при увеличении площади электродов или межэлектродного расстояния, увеличивающих объем диэлектрика с высокой предпробивной напряженностью электрического поля. Чем больше объем диэлектрика между электродами, тем больше вероятность появления места, слабого для пробоя, что и приводит к снижению электрической прочности прессованного азидов свинца. Слабым местом для пробоя можно считать сравнительно широкий воздушный канал при условии усиления электрического поля.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных указывает на то, что пробой прессованного азидов свинца происходит по воздушным каналам в условиях усиленного электрического поля в них.

Установленные в этой работе зависимости электрической прочности прессованного азидов свинца относятся, очевидно, и к ряду других двухфазных диэлектриков (прессованных порошков, непропитанной бумаги, пористой керамики и др.).

Поступила 24 XI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. М и к Д., К р э г с Д. Электрический пробой в газах. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. С к а н а в и Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М., Физматгиз, 1958.
3. В о р о б ъ е в А. А., В о р о б ъ е в Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М., «Высшая школа», 1966.
4. Б а л ы г и н И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.—Л., «Энергия», 1964.
5. Ф р а н ц В. Пробой диэлектриков. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
6. В о р о б ъ е в А. А. Техника высоких напряжений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1945.
7. В о р о б ъ е в Г. А., М е с я ц Г. А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М., Атомиздат, 1963.
8. Г е м а н т А. Электрофизика изолирующих материалов. Л., «Кубуч», 1932.
9. G r o s s B. Static charges on dielectrics. Brit. J. Appl. Phys., 1950, vol. 1, No. 10.

УДК 536.24:532.54

О ТЕПЛОБМЕНЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Ф. Х. Байбулатов, В. Ф. Минин, А. В. Смирнов

(Новосибирск)

Исследовалось явление теплопереноса между двумя электродами (верхним — подогреваемым и нижним), погруженными в жидкий диэлектрик. Одновременно производились киносъемки интерференционной картины межэлектродного пространства и бесконтактное измерение температуры тонкого слоя жидкости над нижним электродом. Показано, что от момента включения поля до появления скачка температуры над нижним электродом существует время задержки, совпадающее со временем продв.