

К ТРИДЦАТИЛЕТИЮ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

Г. И. Сканава

Техническая физика в целом возникла и сложилась у нас только после Великой Октябрьской социалистической революции, когда бурно растущая социалистическая промышленность потребовала изыскания новых и самостоятельных путей развития. Это в полной мере относится и к молодой отрасли физики, тесно связанной с техникой электрической изоляции, — физике диэлектриков.

В царской России электроизоляционная техника находилась на весьма низком уровне. Заводы электропромышленности работали полностью по иностранным инструкциям и с изоляционными материалами, ввозимыми из-за границы.

Естественно, что и теория электрических свойств диэлектриков, не имея до революции практических стимулов для своего развития, не привлекала к себе серьёзного внимания, тем более что электро-техника в то время не предъявляла особо жёстких требований к электрической изоляции. Изоляционные материалы подбирались грубо эмпирическим путём без каких бы то ни было попыток расчёта. В лучшем случае рабочие напряжения того или иного вида изоляции определялись на основании измерения пробивных напряжений путём введения более или менее произвольного запаса прочности.

Заслугой советских физиков является то, что они первые начали глубокое изучение процессов, протекающих в диэлектриках под действием электрического поля. Такое изучение имеет не только чисто научный интерес, но и совершенно необходимо для сознательного выбора и синтеза электроизолирующих материалов.

В настоящее время результаты работ советских учёных в области физики диэлектриков дают возможность, во-первых, в ряде случаев разобраться в механизме сложных процессов, протекающих в диэлектрике, помещённом в электрическое поле, во-вторых, подсчитывать некоторые важнейшие константы диэлектрика по другим константам его, связывая основные электрические свойства диэлектриков с их молекулярным строением и, в-третьих, зачастую направлять работу химиков и технологов по созданию новых диэлектриков высокого качества, обладающих нужными специальными свойствами.

Достижения советской физики диэлектриков значительно облегчили развитие изоляционной техники как в отношении выбора и синтеза изоляционных материалов, так и в отношении конструирования и расчёта технической изоляции и конденсаторов, и позволили находить новые самостоятельные пути решения практических вопросов.

1. ИОННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

К 1922—1923 гг. — началу работы советских учёных в области физики диэлектриков — в мировой литературе были опубликованы лишь немногие относящиеся к ней исследования. Были освещены вопросы диэлектрической поляризации, электропроводности и пробоя газообразных диэлектриков, диэлектрической поляризации и диэлектрических потерь полярных жидкостей и некоторые другие. Электрические свойства твёрдых диэлектриков, наиболее важных с точки зрения изоляционной техники, были изучены крайне мало. Известны были отдельные экспериментальные факты, касающиеся в основном так называемой «диэлектрической аномалии» — спадания тока в твёрдом диэлектрике с течением времени при постоянном напряжении и, в связи с этим, кажущегося невыполнения закона Ома.

Советские физики под руководством А. Ф. Иоффе, начавшего эту работу, занялись прежде всего изучением электропроводности твёрдых диэлектриков. Был установлен ряд новых опытных фактов и закономерностей, которые позволили уяснить в общих чертах природу электропроводности твёрдых диэлектриков и причины кажущегося невыполнения закона Ома. В дальнейшем эти работы интенсивно развивались, и в настоящее время природа электропроводности диэлектриков стала значительно яснее.

Электропроводность огромного большинства диэлектриков в области, не близкой к пробоя, носит преимущественно ионный характер. Это убедительно доказывает ряд исследований, посвящённых проверке закона Фарадея. Для ионных кристаллов, стёкол, лаковых плёнок и т. п. было показано (Пружинина), что закон Фарадея хорошо оправдывается. При этом классическая методика проверки закона Фарадея, установленная Тубандом для кристаллов, была развита и видоизменена для применения к техническим изоляционным материалам (стёкла, лаковые плёнки, слюда). Механизм ионной электропроводности негазообразных диэлектриков благодаря работам Иоффе, Френкеля и др. теперь можно трактовать с единой общей точки зрения.

Слабо закреплённые ионы, имеющиеся в диэлектрике (в кристалле, например, ионы в междурешёточном пространстве, в стекле — ионы, находящиеся в местах неплотной структурной упаковки и т. п.), участвуя в тепловом движении, могут поступательно перемещаться из одной «потенциальной ямы» в другую. Каждый ион при таком перемещении преодолевает некий потенциальный барьер, обусловленный структурой диэлектрика. При этом кинетическая энергия иона

расходуется на работу преодоления этого барьера — работу активации. Даже в жидком диэлектрике может иметь место аналогичный механизм теплового движения ионов. Ион прилипает к молекуле, входит в общий с ней комплекс и тем самым закрепляется, находясь в «потенциальной яме». Однако, участвуя в тепловом движении, ион имеет некоторую вероятность оторваться от молекулы. При отрыве кинетическая энергия иона расходуется на работу против сил сцепления с молекулой — работу активации. Энергия активации, таким образом, присуща иону, находящемуся не только в твёрдом, но и в жидком теле. После прохождения некоторого «свободного» пути ион вновь попадает в «потенциальную яму». При наложении внешнего электрического поля «активированные» ионы сносятся в направлении поля. Средняя скорость иона в направлении поля при малых полях прямо пропорциональна напряжённости поля.

Поэтому электропроводность любого негазообразного диэлектрика легко связывается при помощи выражения для подвижности с константами, характеризующими молекулярную структуру диэлектрика, и может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = nq\chi = \frac{nq^2\delta^2\nu}{6kT} e^{-\frac{U}{kT}},$$

где n — число ионов-носителей тока в см^3 , q — заряд иона, χ — подвижность иона, δ — длина «свободного» пробега, ν — частота собственных колебаний иона в месте закрепления, U — энергия активации, kT — энергия теплового движения. Для жидких диэлектриков, пользуясь изложенным толкованием, легко связать электропроводность с макроскопической характеристикой жидкости — вязкостью. Внутреннее трение в жидкости обусловлено движением молекул жидкости, которое можно трактовать так же, как и движение ионов. При течении — движении слоёв жидкости — молекулы подвержены действию некоторой силы. Упорядоченное движение молекул под действием этой силы и обуславливает внутреннее трение жидкости. Эта аналогия позволяет установить связь между электропроводностью и вязкостью жидкости, т. е. объяснить давно известный экспериментальный закон Вальдена, по которому произведение из электропроводности на вязкость постоянно для данного жидкого диэлектрика и не зависит от температуры. Зависимость ионной электропроводности негазообразного диэлектрика от температуры, согласно изложенному, должна иметь следующий общий вид:

$$\gamma = Ae^{-B/T}.$$

Величина A от температуры зависит сравнительно мало. Если в диэлектрике могут двигаться разные ионы, или одни и те же ионы, но закреплённые в разной степени, то

$$\gamma = \sum_{i=1}^{i=N} A_i e^{-B_i/T}.$$

Эта зависимость была экспериментально установлена (работы Кобеко, Кувшинского, Шишкина, Лазарева и др.) для очень многих негазообразных диэлектриков (правая часть равенства состоит иногда из двух членов, а иногда из одного).

Таким образом, механизм ионной электропроводности негазообразного диэлектрика в общих чертах достаточно выяснен.

Вопрос о том, какие именно ионы движутся в диэлектрике при прохождении тока, также служил предметом исследований советских физиков. Установлено, что в жидких неполярных диэлектриках, применяемых для целей изоляции (трансформаторное масло, растительное масло, растворители для изоляционных лаков — бензол, толуол, ксилол и т. п.), основными носителями тока являются ионы примесей — загрязнений. В кристаллических диэлектриках движутся в первую очередь лёгкие и относительно слабо закреплённые ионы щелочных металлов. Излом кривой $\lg \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$, наблюдающийся для простей-

ших ионных кристаллов (типа NaCl), служил долгое время предметом оживлённых дискуссий. Школа, руководимая Смекалем, выдвинула положение о том, что электропроводность этих кристаллов можно разделить на две части: дефектную электропроводность, доминирующую при низких температурах, и собственную электропроводность, имеющую место только при высоких температурах. Дефектная электропроводность обуславливается движением ионов в дефектных местах — искажениях кристаллической решётки, которые, повидимому, должны существовать в каждом кристалле. При этом дефектной электропроводности Смекалем приписывалась решающая роль.

Однако советскими физиками (Гохберг и др.) было экспериментально доказано, что в работах, посвящённых выяснению механизма электропроводности кристаллов, решающее влияние было приписано дефектам решётки лишь потому, что кристаллы были плохо очищены и электропроводность их обуславливалась ионами примеси.

Работой Френкеля в 1926 г. было положено начало теоретическому исследованию собственной электропроводности кристаллов.

В настоящее время можно считать установленным, что возможны два основных механизма перемещения ионов в кристалле, а именно: переход иона в междузелье с дальнейшим движением его в междоузельном пространстве и переброс иона из одного узла в соседний, занятый узел (движение «дырок»).

Преобладание того или иного вида движения выясняется на основании оценочных подсчётов соответствующих энергетических разностей. Для щелочно-галогидных кристаллов установлено, что наиболее вероятен «дырочный» механизм электропроводности.

Электропроводность кристаллов при низких температурах в сильной степени зависит от наличия и характера примесей. Ионы примеси обычно закреплены слабее, чем основные ионы решётки, так как они располагаются, главным образом, либо в междоузельном простран-

ве, либо в дефектных местах. Только при «дырочном» характере проводимости небольшое количество ионов примеси может разместиться в незанятых узлах решётки и (вследствие большой степени закрепления) не вызвать заметного увеличения электропроводности.

Движение примесных ионов отделить от движения основных ионов решётки в её дефектных местах экспериментальным путём очень трудно. В связи с этим механизм электропроводности, предложенный Смекалем, хотя и может иметь место, но далеко не является единственно возможным.

Немало сделано советскими физиками и в области изучения электропроводности стёкол (Шукарёв, Мюллер, Маркин и др.). В чистых стёклах, содержащих только один стеклообразующий окисел, нет никаких ионов, перемещение которых обуславливало бы электропроводность. И действительно, электропроводность таких чистых стёкол исчезающе мала. Технические стёкла имеют сложный состав: они содержат, кроме стеклообразующего окисла, ещё окислы щелочных и щелочно-земельных металлов, наличие которых определяет нужные физико-химические и технологические свойства стекла. Электропроводность технических стёкол в первую очередь определяется присутствием в них щелочных металлов.

Если в шихту стекла внести окисел одновалентного металла (Na_2O , K_2O), то при образовании стекла атом кислорода окисла связывается с атомом кремния или бора и занимает одну из вершин элементарной ячейки. Атом щелочного металла, имея одну валентную связь, связывается только с одним атомом кислорода. В результате этого в месте расположения атома одновалентного металла образуется разрыхление структуры, так как он не имеет возможности связаться с другим атомом кислорода и продолжить сетку. Разрыхление структуры выражается в том, что около атома одновалентного металла образуется область повышенной потенциальной энергии. Таким образом введение окисла одновалентного металла, во-первых, создаёт разрыхление структуры стекла и, во-вторых, приводит к наличию слабо связанных атомов (или ионов) одновалентного металла. Оба эти фактора сильно повышают электропроводность стекла.

Введение окислов двухвалентных металлов, например CaO , BaO и т. п., не только не повышает, но даже может уменьшить электропроводность стекла. Атом двухвалентного металла за счёт второй связи может связаться одновременно с двумя атомами кислорода. В структурной сетке стекла поэтому не наступит разрыва. Может случиться даже, что атом двухвалентного металла свяжет концы разорванной сетки, устранив неплотность структуры чистого стекла. Систематическое исследование влияния состава стекла на его электропроводность было начато и проведено советскими физиками. В результате их работ были не только установлены вышеизложенные точки зрения, но и получен ряд интересных экспериментальных дан-

ных, позволяющих сознательно подходить к выбору рецептуры электротехнических стёкол.

Особое внимание советских физиков ещё в первые годы после Октябрьской революции привлекли те вторичные явления, которые связаны с прохождением тока через твёрдый диэлектрик при низких температурах и которые долгое время казались особенно загадочными. Речь идёт о спадании тока, проходящего через диэлектрик, с течением времени при постоянном приложенном напряжении и об отступлениях от закона Ома. Это явление было открыто более 50 лет назад Пьером Кюри; работы советских физиков в значительной мере помогли выяснить его природу.

Ещё 25 лет назад А. Ф. Иоффе своим исследованием кварца положил начало работам по физике диэлектриков, в частности, в области изучения спадания тока со временем в твёрдых диэлектриках и связанных с ним явлений. В этом исследовании он впервые ввёл понятие о высоковольтной поляризации твёрдых диэлектриков и привлёк к объяснению её возможность накопления объёмного заряда в твёрдом теле.

В настоящее время имеется возможность благодаря работам Гохберга, В. А. Иоффе, Синельникова, Вендеровича и др. разбить твёрдые диэлектрики по характеру спадания тока со временем на ряд типов.

Первый тип — кристаллы с высокой степенью симметрии: в чистых кристаллах при отсутствии дефектов в кристаллической решётке спадания тока со временем нет, распределение потенциала прямолинейно.

Второй тип — кристаллы типа кальцита и селитры: резкое спадание тока со временем; объёмный заряд распределён концентрированно в тонком слое у катода.

Третий тип — кристаллы с низкой степенью симметрии (кварц, слюда): значительное спадание тока со временем при весьма сложном распределении объёмного заряда, возможна формовка.

Четвёртый тип — аморфные и керамические диэлектрики: спадание тока имеется при очень малых временах (установление диэлектрической поляризации), а также при высоких температурах (формовка): падение потенциала сосредоточено в основном в отформованном слое.

Пятый тип — неоднородные диэлектрики (технические слоистые изоляционные материалы): спадание тока связано с накоплением заряда на поверхностях раздела неоднородностей (классический, максвелловский случай).

Работами Иоффе было показано, что если учитывать электродвижущую силу поляризации, возникающей вследствие накопления объёмного заряда, то сопротивление диэлектрика в области невысоких полей оказывается не зависящим от напряжения.

Действительные отступления от закона Ома в твёрдых диэлектриках начинаются в очень сильных полях.

Применяя рассуждения о механизме движения ионов в диэлектрике, которые были приведены выше, нетрудно получить выражение для плотности тока в негазообразном диэлектрике в сильных полях, т. е. в тех случаях, когда работа поля на пути «свободного» пробега иона сравнима с энергией теплового движения:

$$j = \frac{n}{6kT} v q^2 \delta^2 e^{-U/kT} \left(E + \frac{q^2 \delta^2 E^2}{24k^2 T^2} + \dots \right)$$

(обозначения те же, что и выше).

Плотность тока уже не пропорциональна напряжённости поля, а зависит от неё по сложному закону; электропроводность же увеличивается с ростом напряжённости поля, что качественно согласуется с известным экспериментальным законом Пуля.

В сильных полях (для стекла, например, выше $2 \cdot 10^6 \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$) на ионную электропроводность накладывается электронная, которая при малых полях для большинства диэлектриков исчезающе мала.

Температурный коэффициент электропроводности в сильных полях изменяется. Это следует прежде всего из выражения для ионной электропроводности

$$\gamma = j/E = \frac{n}{6kT} v q^2 \delta^2 e^{-U/kT} \left(1 + \frac{q^2 \delta^2 E}{24k^2 T^2} + \dots \right);$$

как видно из этого выражения, электропроводность при увеличении напряжённости поля начинает слабее зависеть от температуры.

Кроме того, появляющаяся в сильных полях электронная электропроводность имеет иной температурный коэффициент, чем ионная.

Вопрос об электронной электропроводности диэлектриков в сильных полях тесно связан с электрическим пробоем диэлектриков (см. ниже).

Зависимость электронной электропроводности от напряжённости поля впервые разобрана в теоретической работе Я. И. Френкеля.

2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Обширный ряд работ советских физиков в области диэлектрической поляризации и диэлектрических потерь можно разделить на: а) исследования аномальной поляризации сегнетовой соли и сегнетоэлектриков; б) исследования диэлектрической поляризации и потерь поликристаллических диэлектриков; открытие нового вида поляризации титаната бария; в) исследования диэлектрической поляризации и диэлектрических потерь аморфных диэлектриков и высокомолекулярных соединений, развившиеся впоследствии в целый большой комплекс работ, посвящённых изучению аморфного состояния; г) исследования диэлектрических потерь и диэлектрической

поляризации стёкол и керамических материалов с практическим выходом в виде получения новых высококачественных изоляционных материалов; к этим же работам тесно примыкают работы советских химиков, технологов и инженеров по исследованию диэлектрических потерь множества технических изоляционных материалов (масла, лаки, компаунды, волокнистые материалы, пластмассы), позволившие как разработать новые материалы, так и улучшить изоляционные свойства уже известных материалов; д) изучение диэлектрических свойств нового класса изоляционных материалов, состоящих из кремне-органических соединений, и создание изоляционных материалов с повышенной теплостойкостью.

а) фундаментальные работы Курчатова, Кобеко и др., посвящённые подробному изучению сегнетовой соли, позволили установить ряд закономерностей, в значительной мере выясняющих природу её аномальной поляризации, и открыть группу диэлектриков—изоморфных кристаллов, содержащих сегнетову соль — обладающих, подобно сегнетовой соли, свойством спонтанной поляризации и диэлектрического гистерезиса. Эти вещества были названы сегнетоэлектриками.

Курчатов первый дал теорию поляризации сегнетоэлектриков, качественно объясняющую установленные закономерности. Теории сегнетоэлектричества пока ещё не являются вполне удовлетворительными.

Однако точка зрения Курчатова и др., по которой в твёрдом веществе возможно вращение полярных молекул, оказалась весьма плодотворной и получила своё дальнейшее развитие при объяснении ряда закономерностей, наблюдающихся для технических диэлектриков (волокнистые материалы, олеовакс, галовакс и т. п.).

б) Большая группа работ, проведённых за последние годы советскими учёными (Вул, Сканави, Гольдман, Барзаковский, Богородицкий и др.), посвящена исследованию диэлектрической поляризации и диэлектрических потерь поликристаллических диэлектриков, образующихся в результате реакций в твёрдом состоянии, протекающих при высокой температуре. Наиболее интересные из этих работ относятся к диэлектрикам, содержащим в своём составе двуокись титана в кристаллической форме рутила или титанаты металлов второй группы периодической системы Менделеева.

Причина высокой диэлектрической проницаемости рутила (TiO_2), известной с 1902 г., и перовскита (CaTiO_3), впервые установленной советскими физиками, разъяснена их теоретическими работами (Сканави).

К сложным кристаллам, каковыми являются рутил и перовскит, неприменимы ни формула Борна для вычисления диэлектрической проницаемости, основанная на том предположении, что локальное поле равно среднему макроскопическому, ни формула Клаузиуса-Мосотти, при выводе которой внутреннее поле полагается равным лорентцову полю $\left(\frac{4\pi I}{3}\right)$, где I — электрический момент единицы

объёма). Учёт внутреннего поля в кристаллической решётке может быть произведён в первом приближении, если основываться на так называемой «точечной» модели ионного кристалла (точечные ионы, приобретающие дипольные моменты под действием поля). Способ учёта внутреннего поля, основанный на методе Лорентца, приводит в конечном итоге к следующему уравнению общего вида для электронной поляризации взамен уравнения Клаузиуса-Мосотти:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{\sum_{j=1}^m n_j \alpha_j + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^m \alpha_j \alpha_k (n_k c_{kj} + n_j c_{jk} - n_k c_{jj} - n_j c_{kk}) + O(\alpha^3)}{1 - \sum_{i=1}^m \alpha_i c_{ij} + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^m \alpha_j \alpha_k (c_{jj} c_{kk} - c_{jk} c_{kj}) + O(\alpha^3)}, \quad (1)$$

где ε — квадрат показателя преломления, N — число молекул в 1 см^3 кристалла, α_j — электронная поляризуемость j -го иона, n_j — число j -х ионов в молекуле, m — число ионов разного геометрического расположения в решётке, c_{jj} , c_{jk} и c_{kj} — так называемые структурные коэффициенты внутреннего поля, зависящие только от геометрии решётки и определяющие при данной поляризуемости ионов и данном внешнем поле добавочное к лорентцову внутреннее поле, создаваемое поляризованными ионами, которые окружают рассматриваемый ион. Через $O(\alpha^3)$ обозначены малые члены, содержащие трёх- и более кратные произведения поляризуемостей. Если все структурные коэффициенты равны нулю, то вышеуказанная формула переходит в формулу Клаузиуса-Мосотти

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4}{3} \pi N \sum n_j \alpha_j. \quad (2)$$

Вычисление структурных коэффициентов для решёток рутила и перовскита показывает, что формула (1), в противоположность формуле Клаузиуса-Мосотти, даёт вполне удовлетворительное согласие с опытом. При инфракрасных и более низких частотах следует, кроме электронной поляризации ионов, учесть ещё и смещение положительных ионов относительно отрицательных. В этом случае формула (1) для рутила приобретает следующий вид, если пренебречь малыми членами:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \approx \frac{4\pi N}{3} \cdot \frac{\alpha_1 + 2\alpha_2 + \alpha_i}{1 + |c_{22}| \alpha_2 - c_{12} \alpha_i}, \quad (3)$$

где α_i — поляризуемость ионного смещения, отнесённая к иону титана. Из (3) видно, что введение даже небольшой α_i резко увеличивает ε , так как не только увеличивает числитель, но и умень-

шает знаменатель. Физическая природа этого эффекта заключается в том, что при ионном смещении возникает большое добавочное внутреннее поле того же направления, что и внешнее поле, благоприятствующее поляризации. Поэтому уже небольшая поляризуемость ионного смещения (α_i) приводит к высоким значениям диэлектрической проницаемости.

Можно считать, что высокая диэлектрическая проницаемость кристаллов типа рутила и перовскита обусловлена в первую очередь большой электронной поляризуемостью ионов кислорода, которая при большой плотности влечёт за собой высокий показатель преломления в сочетании с большим добавочным внутренним полем «чужого окружения», направленным по направлению внешнего поля и резко увеличивающим диэлектрическую проницаемость при переходе от световых частот к инфракрасным (от 7,3 до 173 для рутила) даже при малом ионном смещении.

Выдающимся достижением советских физиков (Вул и Гольдман) явилось открытие исключительно высокой диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 1000 \div 2000$), переходящей через острый максимум при повышении температуры, и диэлектрического гистерезиса метатитаната бария (BaTiO_3). Подробные исследования свойств диэлектриков этого рода вскрыли новый и весьма интересный тип диэлектрической поляризации, близкой к сегнетоэлектрической, однако отличающейся от неё высоким значением ϵ в весьма широком диапазоне температур (от температуры жидкого гелия до $+(250 \div 300)^\circ \text{C}$). Исключительно высокая диэлектрическая проницаемость метатитаната бария, а также резкая зависимость её от температуры и напряжённости электрического поля открывают широкие перспективы для применения его в разных областях электро- и радиотехники. Теоретическая трактовка механизма поляризации метатитаната бария и сегнетоэлектриков развита в последнее время Гинзбургом. Им показано, что фазовый переход второго рода, происходящий при определённой температуре (точка Кюри), может привести к стремлению диэлектрической проницаемости к бесконечности при этой температуре, если при этом переходе исчезает спонтанная поляризация. Рентгеновские исследования структуры метатитаната бария при температурах ниже и выше точки Кюри и измерение зависимости теплоёмкости от температуры показали, что в метатитанате бария при температуре, соответствующей острому максимуму ϵ (около 80°C), фазовый переход второго рода может иметь место.

Исследование материалов системы $\text{TiO}_2\text{--BaO}$ (Сканави) показало, что изменение соотношения TiO_2/BaO сдвигает точку Кюри и понижает диэлектрическую проницаемость. Тетратитанат бария ($4\text{TiO}_2 \cdot \text{BaO}$) обладает $\epsilon = 30$, весьма мало изменяющейся с температурой, что даёт возможность применения его для температурно-стабильных конденсаторов. Комплекс работ по диэлектрическим

свойствам рутила и титанатов открыл широкие практические выходы, которые частично были реализованы во время войны и реализуются в настоящее время. Получение керамических конденсаторов с заданными характеристиками было осуществлено путем комбинирования титанатов разных кристаллических структур, обладающих различными диэлектрическими проницаемостями и температурными коэффициентами. Были установлены и подтверждены рентгеновскими и другими исследованиями закономерности, определяющие свойства комбинированного поликристаллического материала (Вул, Сканави).

Диэлектрические потери в поликристаллических диэлектриках, которые также изучались весьма интенсивно, обуславливаются составом и количеством стекловидной прослойки.

в) Работы советских физиков (Кобеко, Кувшинский, Журков, Шишкин, Г. Михайлов и др.) в области диэлектрических свойств аморфных тел оказались плодотворными как в отношении теоретического истолкования процессов, протекающих в аморфном теле, так и в отношении практических выходов.

Исследования зависимости угла потерь и диэлектрической проницаемости, проведенные в весьма большом интервале температур для целого ряда переохлажденных жидкостей, содержащих полярные молекулы (глицерин, фенолфталеин, изобутиловый спирт и т. п.), показали, что угол потерь переходит через явно выраженный температурный максимум, а диэлектрическая проницаемость изменяется с температурой, подобно тому как в полярных жидкостях. Это наблюдалось при таких температурах, при которых вещество находилось в твердо-аморфном состоянии. Увеличение частоты сдвигает температурный максимум в сторону высоких температур, как это имеет место и для полярных жидкостей. В последнее время показано (Г. Михайлов), что в твердо-аморфных полимерах, содержащих полярные группы, угол потерь имеет и второй более слабый температурный максимум в области низких температур.

Всё это с несомненностью подтверждает возможность вращения полярных групп в твердом веществе.

Дальнейшие работы показали, что главным и основным источником диэлектрических потерь в полимерах являются полярные молекулы, полярные радикалы или полярные комплексы. Если полимер их не содержит, то диэлектрические потери в нём весьма и весьма малы. Ярким примером этого является полистирол в чистом виде, обладающий ничтожными потерями. Малейшие загрязнения полистирола полярными веществами резким образом повышают угол потерь и придают всему процессу явный характер дипольных потерь.

Работы по изучению механических свойств и вязкости аморфных тел привели к установлению интересных закономерностей. Удалось показать, что кривые температурной зависимости электропроводности, вязкости и времени диэлектрической релаксации подобны

между собой. (Постоянная времени диэлектрической поляризации оценивалась приблизительно как $1/2\pi\nu$, где ν — частота, соответствующая максимуму произведения $\epsilon \operatorname{tg} \delta$ при данной температуре.) Соответствие между указанными зависимостями навело на мысль о существовании глубокой связи между диэлектрической и механической релаксациями аморфного тела.

Наличие этой связи подтвердилось параллельными измерениями диэлектрической проницаемости и пластической деформации для аморфных тел (Кобеко, Кувшинский и др.).

Таким образом, можно думать, что смещения и повороты дипольных групп связаны со смещениями и поворотами целых молекулярных комплексов, обуславливающих пластическую деформацию.

Работа по изучению аморфного состояния позволила получить новые изоляционные материалы высокого качества. Одним из первых таких материалов явился советский полистирол, обладающий весьма малыми диэлектрическими потерями (угол потерь $0,5 - 1'$ при высоких частотах), очень высоким объёмным сопротивлением и другими ценными свойствами, в частности лёгкостью обработки.

Исследование диэлектрических и механических свойств каучука (Кобеко, Пономарёв) привело к разработке исключительного по качеству, бессернистого эбонита-эскапона, который является продуктом полимеризации каучука и обладает одновременно большой теплоустойчивостью, лёгкой обрабатываемостью и сравнительно очень малым углом потерь ($1 - 2'$ при высоких частотах). Этот материал во всех отношениях превосходит обычный эбонит, который содержит серу. Каждый атом серы связан с двумя атомами углерода и при этом под действием атомов углерода и водорода сильно поляризуется, образуя перманентный электрический момент. Подвижность углеводородной цепочки в каучуке даёт возможность образованному таким образом полярному «серному мостику» совершать вращательные колебания, участвуя в тепловом движении. Электрическое поле ориентирует «серные диполи». Процесс установления этой ориентации при высоких частотах приводит к ярко выраженным дипольным потерям. Отсутствие серы в эскапоне и высокая степень его полимеризации являются основной причиной малых диэлектрических потерь эскапона.

В области теории диэлектрических потерь советские учёные начали работать уже давно. Широкими и систематическими исследованиями было установлено (Лазарев и др.), что классическая теория дипольных потерь Дебая качественно применима к большому числу аморфных технических диэлектриков выше температуры их затвердевания (например, к маслам, лакам, компаундам), но что количественного соответствия с опытными данными для указанных диэлектриков эта теория не даёт. Наряду с этим был разработан ряд точек зрения на механизм диэлектрических потерь в различных классах диэлектри-

ков, что сильно помогает при разработке новых диэлектриков с малыми потерями.

Большинство работ, касающихся теории диэлектрических потерь в твёрдых диэлектриках, опубликованных в иностранной литературе, носит чисто феноменологический характер. Автор задаётся тем или иным видом функции спадания тока со временем и, применяя известный принцип суперпозиции токов в диэлектрике, путём более или менее точных и громоздких выкладок получает выражение для ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика в зависимости от частоты.

Советскими учёными были сделаны попытки построения таких теорий диэлектрических потерь, которые основываются на специфических особенностях структуры рассматриваемого класса диэлектриков.

г) Измерения диэлектрических потерь в кристаллических диэлектриках (Богородицкий и Малышев) позволили установить, что в кристаллах диэлектрические потери имеют характер чисто омический (потери проводимости). Наоборот, в ряде аморфных диэлектриков, не содержащих полярных групп и молекул, при высоких частотах были обнаружены потери, не имеющие характера проводимости (работы Кобеко, Александрова, Сканави, Богородицкого, Малышева, Фридберга). Наличие этих потерь имеет большое практическое значение, так как весьма ограничивает применение целого ряда аморфных диэлектриков (прежде всего стёкол) для целей высокочастотной изоляции. Работы советских физиков (Кобеко, Сканави) по изучению механизма диэлектрических потерь в стёклах позволили открыть новую группу явлений в твёрдо-аморфных диэлектриках, аналогичную явлениям, которые вызываются вращением полярных молекул. Эта новая группа явлений имеет механизм, обусловленный поступательным перемещением слабо связанных ионов или заряженных групп.

Движение таких заряженных частиц при постоянном напряжении вызывает падающий со временем абсорбционный ток, а при переменном напряжении вызывает диэлектрические потери релаксационного типа.

Абсорбционный ток в твёрдом диэлектрике при указанном механизме движения ионов должен, как показывают вычисления, спадать со временем по простому экспоненциальному закону, причём постоянная времени спадания тока пропорциональна времени релаксации слабо связанных ионов, равному $\tau \cong \frac{e^{U/kT}}{2\nu}$, где U — энергия активации, ν — частота собственных колебаний ионов в месте закрепления и kT — энергия теплового движения. Однако для описания опытных данных более подходящей является степенная функция вида $I = A(t + \Theta)^{-n}$, которая отражает процесс в ограниченном интервале времени (A , Θ и n — постоянные).

Это расхождение связано, повидимому, с тем, что в реальном диэлектрике имеется ряд групп ионов с различной энергией активации, т. е. с различным временем релаксации. Кроме того, про-

исходит ряд других процессов (например, накопление объёмного заряда), совокупность которых приводит к усложнению закона спада абсорбционного тока.

Пользование степенной функцией спада тока приводит к громоздким математическим выкладкам и мало помогает выяснению механизма диэлектрических потерь. Экспоненциальная функция спада отражает один из процессов (во многих случаях превалирующий над другими) в диэлектрике. Теория потерь, построенная на основании применения этой функции, хотя и не может претендовать на строгость и полноту, но связывает, подобно теории Дебая для полярных жидкостей, величину диэлектрических потерь в твёрдо-аморфном диэлектрике с молекулярными константами его.

Работы советских физиков, посвящённые применению и развитию теории потерь в твёрдо-аморфных диэлектриках (в первую очередь — в стёклах), помогли созданию новых точек зрения на механизм их и в большой степени содействовали открытию новых путей для получения стёкол с малыми диэлектрическими потерями.

Установлен ряд интересных фактов (работы Кобеко, Сканава, Мартюшова, Гладких и др.), касающихся влияния состава стекла на его диэлектрические потери. К этим фактам относятся: 1) «нейтрализационный» эффект, заключающийся в том, что вредное действие ионов одного щелочного металла можно нейтрализовать введением окисла другого щелочного металла (наблюдающаяся при этом нейтрализация так велика, что щелочное стекло может иметь столь же малый угол потерь, что и чистое, не содержащее посторонних ионов стекло); 2) «кристаллизационный» эффект, заключающийся в том, что кристаллизация аморфного диэлектрика (сахара, стекла) резко понижает его угол потерь при высоких частотах и т. п.

Эти же работы позволили классифицировать диэлектрические потери в стёклах, которые можно рассматривать состоящими из трёх частей: 1) потери проводимости, проявляющиеся при низких частотах и высоких температурах, 2) релаксационные потери, проявляющиеся при высоких частотах, и 3) структурные потери, угол потерь для которых не зависит от температуры. Эти последние проявляются при высоких частотах и низких температурах. Механизм их ещё недостаточно ясен.

3. НОВЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Работа советских физиков, химиков и технологов в области изучения диэлектрических свойств разного рода материалов послужила теоретической базой для получения новых изоляционных материалов с высокими изоляционными свойствами.

Это прежде всего относится к разработке новых неорганических материалов (стёкол и керамики), применение которых играет

особо важную роль в технике высоких частот, так как они обладают значительно меньшими диэлектрическими потерями, чем многие органические материалы, и весьма высокой теплостойкостью.

Условия исследовательской работы, созданные в нашей стране, исключительно благоприятны для проведения комплексных работ, в которых деятельность физиков тесно кооперируется с деятельностью химиков и технологов. Электрическая изоляция является как раз такой областью науки и техники, где подобного рода кооперация совершенно необходима.

Керамические материалы состоят из кристаллической и аморфной фаз. Можно считать, что в первом приближении диэлектрические потери в керамических материалах аддитивно складываются из потерь в каждой из фаз.

Как было указано выше, потери в кристаллических диэлектриках имеют характер проводимости и поэтому при высоких частотах весьма малы. Следовательно, основным источником диэлектрических потерь в керамическом материале является стекловидная прослойка.

Ряд закономерностей, установленных для диэлектрических потерь в стеклах, позволил сознательно подойти к выбору состава и структуры керамического материала с малыми диэлектрическими потерями. Принципы получения такого материала заключаются в следующем: 1) материал должен обладать мелкокристаллической структурой с минимальной прослойкой стекла; 2) стекловидная прослойка, по возможности, не должна иметь в своём составе щелочей или же действие этих щелочей должно быть нейтрализовано присутствием тяжёлых окислов.

Согласно этим общим принципам, был разработан ряд специальных высокочастотных керамических материалов с малыми диэлектрическими потерями. Первым материалом этой группы, разработанным в Союзе и получившим широкое применение, явился керамический материал на основе минерала пиропиллита (Ванеев, Попов). Композиция из пиропиллита и глины обладает рядом весьма важных производственных качеств: большой пластичностью до обжига, дающей возможность изготавливать изделия всеми принятыми в керамической технологии способами (формовкой на станке, протяжкой через мундштук, прессовкой), большим интервалом обжига. При этом керамические материалы на основе пиропиллита обладают, сравнительно с обычным изоляторным фарфором, малым углом потерь при высоких частотах (8-12 минут при частоте $\sim 10^6$ гц).

Введением тяжёлых окислов взамен полевого шпата в изоляторный фарфор удалось его значительно «облагородить» и получить так называемый радиофарфор, по диэлектрическим свойствам не уступающий пиропиллиту и технологически близкий к обычному фарфору (работа Богородицкого и Фридберга).

Работа по получению керамических материалов с весьма малыми потерями и прочими специальными свойствами (например, большая

диэлектрическая проницаемость и стабильность её при изменении температуры—конденсаторная керамика) велась весьма интенсивно.

Был разработан ряд малопотерных высокочастотных материалов на основе окиси алюминия (Богородицкий, Оделевский и др.). Эти материалы обладают очень малым углом потерь при высоких частотах ($\delta = 1 \div 3'$).

Особое внимание было уделено разработке керамических материалов для высокочастотных конденсаторов. Был разработан (Богородицкий и др.) керамический материал на основе двуокиси титана и глины—тиконд, обладающий высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 60 \div 70$ и сравнительно большим отрицательным температурным коэффициентом её изменения:

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} \cong -6 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/\text{град.}$$

Этот материал является подходящим диэлектриком для специальных конденсаторов, компенсирующих уход частоты при изменении температуры в радиоконтурх благодаря отрицательному знаку температурного коэффициента ёмкости.

Во время войны значение высокочастотных кристаллических керамических материалов ещё более возросло вследствие дешевизны и недефицитности сырья, идущего для их изготовления, а также вследствие возможности регулирования диэлектрической проницаемости и её температурного коэффициента путём изменения состава и структуры кристаллической фазы этих материалов.

Получен на основе титанатов кальция и титанатов магния новый керамический материал для компенсирующих радиоcondensаторов—тидол (Сканави), обладающий ещё более высоким отрицательным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости, чем тиконд ($\frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} = -10 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/\text{град.}$), и высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 70 \div 80$). Угол потерь тидола составляет $2 \div 3'$. Разработан ряд материалов на основе титанатов магния (Вул, Сканави, Барзаковский, Бочкарёв). Эти керамические материалы предназначены для изготовления контурных радиоcondensаторов больших и малых реактивных мощностей. Они обладают весьма малым углом потерь ($\delta = 0,5 \div 1'$ при высоких частотах), весьма малой зависимостью его от частоты и температуры, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 14 \div 16$ и, что особенно важно, высокой температурной стабильностью диэлектрической проницаемости:

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} = + (0,4 \div 1,3) \cdot 10^{-4} \text{ } 1/\text{град.}$$

Разработан материал на основе двуокиси титана и глины с глинозёмом—тигдин (Смоленский), также вполне пригодный для изго-

товления контурных радиоконденсаторов. Большое значение имеет открытие возможности регулирования диэлектрической проницаемости и её температурного коэффициента титанатовых керамических материалов путём применения логарифмического закона Лихтенекера (Вул, Сканави); при комбинировании кристаллических материалов различной структуры можно особыми приёмами избежать образования новых структур в процессе спекания. В этих случаях можно предвычислить диэлектрическую проницаемость комбинационного материала по диэлектрическим проницаемостям компонентов:

$$\lg \varepsilon = x \lg \varepsilon_1 + (1 - x) \lg \varepsilon_2,$$

где ε_1 и ε_2 — диэлектрические проницаемости компонентов и x — объёмная концентрация первого компонента. Дифференцирование этого уравнения по температуре даёт

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} = x \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{d\varepsilon_1}{dt} + (1 - x) \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon_2}{dt},$$

т. е. температурный коэффициент линейно изменяется с концентрацией.

Комбинируя материалы с отрицательным и положительным температурными коэффициентами ε , можно с большой степенью точности получать заданную диэлектрическую проницаемость и, что особенно важно, температурный коэффициент диэлектрической проницаемости.

На основе этого метода разработаны многочисленные конденсаторные керамические материалы с различными температурными коэффициентами ε от $+1 \cdot 10^{-4}$ до $-12 \cdot 10^{-4}$, включая и температурные коэффициенты ε , близкие к нулю (Сканави, Степанов, Воронков, Богородицкий, Смоленский, Оделевский, Некрасова и др.).

Вслед за открытием исключительно высокой диэлектрической проницаемости метатитаната бария (Вул и Гольдман) разработаны керамические кристаллические диэлектрики на основе метатитаната бария со сверхвысокой диэлектрической проницаемостью: от 700 до 1500 при комнатной температуре (Сканави, Воронков, Оделевский). Ведётся работа по применению этих материалов в различных областях электро- и радиотехники. Разработаны кристаллические керамические диэлектрики на основе тетратитаната бария ($4 \text{TiO}_2 \cdot \text{BaO}$) и близких к нему соединений (Сканави), имеющие весьма малый угол потерь при высоких частотах, диэлектрическую проницаемость около 30, температурный коэффициент, близкий к нулю, и весьма высокое удельное объёмное сопротивление (10^{15} — 10^{16} ом/см). Эти диэлектрики дали возможность изготавливать термостабильные керамические радиоконденсаторы повышенной удельной ёмкости.

Ряд достижений имеется в Союзе и в области применения стекла в качестве изолирующего материала.

Сюда относятся прежде всего специальные стёкла, применяемые в радиотехнике (например, для мощных радиоламп). Стёкла №№ 23,

46 имеют, наряду с нужными технологическими свойствами, малые диэлектрические потери. Разработан калийный пирекс (Богородицкий и Фридберг), имеющий, наряду с высокой теплостойкостью, очень малый угол потерь при высоких частотах.

Разрешена в основном задача получения стеклянного волокна и стеклянной ткани для теплостойкой электрической изоляции (Черняк, Асланова и др.). В этой области необходима ещё дальнейшая работа, в частности — по подбору более подходящего состава стекла.

Широкие исследования велись советскими учёными в области теплостойкой и теплопроводной изоляции (Андрианов, Тареев, Черняк и др.), а также в области гигроскопичности диэлектриков (Михайлов, Богородицкий и др.). Большое внимание было уделено созданию электроизолирующих лаков.

Вошли в производство и широко применяются глифталевые лаки, плёнка которых имеет более высокую теплостойкость, чем плёнки шеллачных и асфальтовых лаков. Наряду с этим, диэлектрические свойства глифталевых лаков сравнительно очень высоки. Окончательно освоены в производстве и применении (особенно для электрических машин) асфальтовые лаки, вытеснившие дефицитный шеллак.

Из новых пластмасс большого внимания заслуживают упомянутые уже выше полистирол и эскапон. Большим достижением является разработка принципиально новых электроизоляционных материалов на основе кремне-органических соединений (Андрианов, Грибанова). Эти материалы (жидкие и твёрдые) сочетают в себе свойства органических соединений (пластичность, гибкость и т. п.) с повышенной теплостойкостью (до 300° С). Указанные материалы разработаны в результате глубокого изучения новой отрасли науки — химии кремне-органических соединений (Андрианов). Этим перечнем далеко не исчерпывается список разработанных за последние годы новых изоляционных материалов.

4. ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Перейдём теперь к рассмотрению результатов работ советских физиков в области изучения пробоя диэлектриков. Пробивное напряжение изоляции зависит от электрической прочности изолирующего вещества и в равной мере от её конструкции, определяющей распределение поля в изоляции и условия теплоотдачи. Поэтому практическое значение исследования пробоя диэлектриков приобретают лишь тогда, когда диэлектрик исследуется не только на образцах, но и в практических условиях его эксплуатации.

Теорией пробоя диэлектриков в Союзе начали заниматься более 20 лет назад (Семёнов, Фок, Брагин и др.).

Обширными экспериментальными исследованиями был установлен ряд факторов, характеризующих тепловой и электрический пробой изоляции, были установлены критерии, позволяющие судить о харак-

тере пробоя в каждом отдельном случае, был исследован характер пробоя ряда диэлектриков (Брагин и др.).

Наряду с этим, Фоком, Семёновым и др. впервые была дана строгая теория теплового пробоя, которая с успехом применяется к большому числу различных практических случаев.

Достаточно интенсивно развивалось также изучение электрического пробоя диэлектриков.

а) Тепловой пробой

При изучении теплового пробоя диэлектриков обычно рассматривают две группы задач, интересных с точки зрения применения этой теории. Задачи первой группы сводятся к определению «пробивного напряжения», которое в случае теплового пробоя можно трактовать как то максимальное напряжение (критическое напряжение), начиная с которого стационарное состояние делается невозможным. При достижении критического напряжения начинается непрерывный разогрев диэлектрика, который при достаточной длительности эксплуатации приводит к тепловому пробую. Задачи второй группы сводятся к определению «времени пробоя», т. е. такого времени, по истечении которого диэлектрик, находящийся под напряжением, превышающим критическое, пробьётся. Обе группы задач представляют весьма большой технический интерес по следующим причинам:

- 1) Вычисление критического напряжения теплового пробоя даёт возможность правильно выбрать качество и конструкцию изоляции, обеспечивающие длительную работу её в эксплуатационных условиях.
- 2) Вычисление «времени пробоя» при напряжениях выше критического позволяет при выборе изоляции учесть стойкость её против кратковременных перенапряжений. Задачи первой группы разрешены и результаты их применяются уже в течение ряда лет. Задачи второй группы за последние годы в основном также решены.

Тепловой пробой диэлектрика вызывается тем, что выделение тепла в диэлектрике за счёт диэлектрических потерь (или проводимости при постоянном напряжении) растёт по мере того, как диэлектрик нагревается. Для большинства диэлектриков тепловыделение в ограниченном интервале зависит от температуры по экспоненциальному закону

$$Q = Q_0 e^{a(T - T_0)},$$

где T и T_0 — температуры, a — температурный коэффициент проводимости или тангенса угла потерь.

Решение задачи о тепловом пробое заключается в интегрировании известных уравнений теплопроводности вида

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = K \Delta T + Q,$$

где c — удельная теплоёмкость среды, ρ — плотность, K — теплопро-

водность и $Q = \gamma E^2$ — удельное тепловыделение (γ — активная проводимость, E — напряжённость поля) или для одномерного случая, часто встречающегося в практике:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q.$$

При решении первой группы задач (нахождение критического пробивного напряжения) рассматривается случай равновесного состояния ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$), и время тем самым из рассмотрения исключается.

Дифференциальное уравнение

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = 0$$

служит основой для вычисления критического напряжения.

Переход диэлектрика при повышении приложенного напряжения из равновесного теплового состояния в неравновесное, который является началом теплового пробоя, характеризуется тем, что $\frac{\partial E}{\partial T_m} = 0$, где E — напряжённость поля, T_m — максимальная температура нагрева диэлектрика при данном напряжении.

При $\frac{\partial E}{\partial T_m} > 0$ имеем равновесное состояние, $\frac{\partial E}{\partial T_m} < 0$ — неравновесное состояние диэлектрика. Равенство $\frac{\partial E}{\partial T_m} = 0$ является, таким образом, условием пробоя.

Решая приведённое выше дифференциальное уравнение с учётом граничных условий и применяя сформулированное выше условие пробоя, можно найти выражение для пробивного (критического) напряжения теплового пробоя. Например, для одномерного переменного поля

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{60,5K}{f \epsilon \operatorname{tg} \delta}} \cdot 10^6 \varphi(C),$$

где ϵ и δ — диэлектрическая проницаемость и угол потерь диэлектрика при температуре окружающей среды, f — частота, $\varphi(C)$ — довольно сложная функция, численное значение которой находится приближённо по значению $C = \frac{K_1 \lambda h}{K(K + \lambda d)}$ (K и K_1 — теплопроводности диэлектрика и электрода, h — полутолщина диэлектрика, d — толщина электрода и λ — коэффициент внешней теплопроводности), a — см. выше.

Эта формула, как и остальные, ей подобные (случай одностороннего охлаждения, цилиндрический конденсатор и т. п.), имеет то большое преимущество, что все входящие в её правую часть величины могут быть точно известны. Поэтому применение её к любому

практическому случаю не вызывает никаких принципиальных трудностей. Нужно только правильно учесть условия охлаждения.

Обширный ряд исследований позволил установить, что если характер пробоя тепловой, то при достаточно медленном повышении напряжения экспериментальное значение пробивного напряжения хорошо совпадает с теоретическим. При быстром повышении напряжения экспериментальное значение пробивного напряжения превышает теоретическое.

Для большинства диэлектриков существует некая область теплового пробоя, определяемая внешними факторами, главным образом, частотой и температурой.

При высоких частотах пробой огромного большинства диэлектриков имеет ярко выраженный тепловой характер. Только некоторые диэлектрики (кварц, лучшие сорта слюды, специальные керамические материалы), обладающие исключительно малым углом потерь при высоких частотах, имеют, повидимому, смешанный характер пробоя.

При высоких температурах многие диэлектрики пробиваются тепловым образом и на низких частотах (стёкла, фарфор).

Наконец, целый ряд диэлектриков имеет тепловой характер пробоя даже при невысоких температурах и низких частотах. Сюда относятся почти все лаки, компаунды, волокнистые материалы, многие пластмассы.

Таким образом, разработка теории теплового пробоя и получение практически применимых формул для пробивного напряжения послужили сильным толчком к сознательному выбору изоляции и к разработке технически обоснованных норм на изоляционные материалы.

Ряд специальных работ был посвящён расчёту изоляции крупных машин, антенных изоляторов, кабельной изоляции, конденсаторов на основе теории теплового пробоя. Результаты этих работ позволили видоизменить и уточнить нормы на электрические свойства лаков и компаундов (изоляция электрических машин — Сканави), керамических материалов (антенные изоляторы — Гайлиш), масла и бумаги (кабельная изоляция — Брагин) и т. п.

В некоторых из этих работ теория теплового пробоя подверглась дальнейшему развитию (работы Гайлиша).

Во всех этих работах, однако, оставался нерешённым вопрос о протекании теплового пробоя во времени. Все расчёты велись для случая длительного нахождения изоляции под напряжением. Коэффициенты запаса изоляции, которые определяются не только возможностью теплового пробоя при длительной работе изоляции под действием рабочего напряжения, но и, в первую очередь, стойкостью её против перенапряжений, не могут быть достаточно точно обоснованы при помощи теории теплового пробоя, исходящей из той предпосылки, что напряжение приложено сколь угодно долгое время.

За последние годы Гринбёргом, Канторовичем и Лебедевым разработан метод расчёта теплового пробоя с учётом фактора времени (вторая группа задач, указанная выше).

Дифференциальные уравнения, определяющие процесс разогрева диэлектрика, находящегося под напряжением, чрезвычайно сложны и не поддаются точному интегрированию. Даже в простейшем одномерном случае приходится интегрировать два совокупных дифференциальных уравнения с частными производными второго порядка, из которых одно не является линейным. Сначала была решена приближённым численным интегрированием задача для конкретных случаев.

Однако численное интегрирование для каждого отдельного случая занимает очень продолжительное время, так как требует весьма громоздких выкладок.

Ввиду этого была разработана приближённая теория, которая при небольшой затрате времени позволяет получить основные зависимости с достаточной для практических целей точностью. Идея метода заключается в том, что на основании определённых физических соображений задаётся закон распределения температуры в толще диэлектрика и в электродах. Если принять параболический закон распределения температуры в диэлектрике и достаточно массивных электродах, то система уравнений значительно упрощается по сравнению с исходной (получается система обыкновенных совокупных дифференциальных уравнений первого порядка), работа вычислителя сильно сокращается, но интегрирование всё-таки не может быть доведено до конца и, в конце концов, опять приходится прибегать к численному интегрированию. Задача решается аналитически в том случае, если допустить, что в толще электродов (внешней тепловой изоляции) температура распределена не по параболическому, а по линейному закону. Можно думать, что указанный закон сохраняется в течение большей части процесса, по крайней мере, если электроды обладают не слишком большой толщиной. Длительность же остальной части процесса является малой частью полного времени, необходимого для развития пробоя.

Расчёт времени пробоя, проведённый указанным приближённым способом, приводит к достаточно хорошему согласию с опытом. Время пробоя находится из того условия, что температура диэлектрика равна бесконечности. Это условие может быть выполнено только в том случае, если приложенное напряжение больше критического напряжения теплового пробоя, т. е. стационарное состояние диэлектрика не может существовать.

Результат расчёта для плоского конденсатора может быть записан в следующей простой форме:

$$t_{пр} = \frac{C_1 \rho_1}{0,24 \cdot a \sigma_0 E^2} \varphi(b),$$

где C_1 — теплоёмкость и ρ_1 — плотность диэлектрика, а

$$\varphi(b) = \int_0^{\infty} \frac{d\zeta}{e^{\zeta} - b\zeta} = 1 + \frac{1}{4}b + \frac{2}{27}b^2 + \frac{3}{128}b^3 + \frac{24}{3125}b^4 + \dots$$

и

$$b = \frac{6\beta}{3 - \beta} \cdot \frac{1}{Bn^2}$$

$$\left(\beta = \frac{\mu}{2 + \mu} \text{ при } \mu = \frac{\lambda h K_1}{K(K_1 + \lambda d)} \text{ и } B = \frac{0,24 a \sigma_0}{K} E^2 \right).$$

σ_0 — проводимость диэлектрика при окружающей температуре, прочие обозначения те же, что и выше.

б) Электрический пробой твёрдых диэлектриков

Большое число работ советских физиков посвящено электрическому пробую.

Механизм электрического пробоя диэлектриков до конца ещё не ясен. Высказанное первоначально предположение о том, что развитие токов при электрическом пробое твёрдого диэлектрика обусловлено ударной ионизацией ионами, оказалось несостоятельным.

В развитии наших последующих представлений о механизме электрического пробоя явно различаются два периода: доквантовый и квантовомеханический.

Старые (доквантовые) теории приводят к величинам пробивного напряжения, превышающим данные эксперимента. Современные (квантовомеханические) теории дают правильный порядок величины пробивных напряжений, но достаточно хорошего совпадения с экспериментальными данными не даёт ни одна из них. Поэтому трудно выбрать среди них наиболее близкую к действительности.

Неудовлетворительность старых теорий объясняется не неправильностью идей, положенных в их основу, а, повидимому, тем, что разработка этих идей велась классически, а не квантовомеханическим путём.

Во всех теориях электрический пробой рассматривается как расплавление диэлектрика (в простейшем случае, который обычно рассматривается в теории, — кристаллического диэлектрика).

Таким образом, можно считать, что оба типа пробоя — тепловой и электрический — приводят к одному и тому же — к термическому разрушению диэлектрика. Однако процессы, приводящие к этому результату, резко различны.

При тепловом пробое диэлектрик термически разрушается вследствие возрастания тока с увеличением температуры, которое вызывается нагревом диэлектрика под действием этого же тока. Определяющую роль в этом процессе играет ионный ток, резко растущий с температурой и сравнительно мало растущий при увеличении поля.

При электрическом пробое термическое разрушение диэлектрика вызывается ростом тока с увеличением напряжённости поля.

Определяющую роль в этом процессе играет уже не ионный, а электронный ток, который при невысоких полях исчезающе мал и резко возрастает с увеличением поля в сильных полях. Электронный ток в диэлектрике сравнительно мало зависит от температуры, и поэтому развитие электрического пробоя зависит только от силы поля.

Электронный ток в кристаллической решётке может быть трёх типов: чисто электронный, дырочный и смешанный. Энергетический спектр кристаллической решётки диэлектрика характеризуется, во-первых, большой шириной запрещённого участка, разделяющего зону проводимости и нормальную зону, и, во-вторых, практически полным отсутствием электронов в зоне проводимости. В нормальных условиях поэтому электронный ток в диэлектрике исчезающе мал.

Между нормальной зоной и зоной проводимости во всяком реальном диэлектрике размещаются локализованные дискретные уровни, наличие которых может быть обусловлено: а) посторонними атомами, вкрапленными в решётку, б) незаполненными узлами решётки, в) механическими разрывами в решётке и т. п.

Электроны, сидящие на этих уровнях, в противоположность электронам, сидящим на собственных уровнях (сливающихся в зоны), ограничены в своём движении весьма узкими областями в кристалле. Для того чтобы вызвать электронный ток в кристаллическом диэлектрике, необходимо: 1) обогатить электронами зону проводимости, 2) объединить электронами нормальную зону. Эти условия при наличии локализованных дискретных промежуточных уровней в запрещённом участке могут быть выполнены не только одновременно, но и каждое в отдельности. Переход электронов с локализованных уровней в зону проводимости обеспечивает наличие чисто электронного тока.

Переход электронов из нормальной зоны на локализованные уровни запрещённого участка является необходимым условием возникновения дырочного тока.

Наконец, переход электрона из нормальной зоны в зону проводимости порождает смешанный электронно-дырочный ток.

Таким образом, для того чтобы возбудить в диэлектрике электронный ток, необходимо воздействовать на него ионизирующими агентами, обеспечивающими хотя бы один из вышеуказанных электронных переходов. Такими агентами могут быть высокая температура и сильное поле. Первый из этих агентов — высокая температура — оказывается действенным только при малой ширине запрещённого участка, т. е. в случае полупроводников. Диэлектрик же нужно было бы нагреть до очень высокой температуры, значительно превышающей его температуру плавления, с тем, чтобы получить в нём заметный электронный ток в слабых полях.

Ионизирующая способность сильного поля, наоборот, достаточно действенна для диэлектрика. Она обусловлена деформацией энергетического спектра решётки, которая вызывается наложением сильного поля и выражается в наклонении и расширении зон. В процессе

ионизации основную роль играет первый эффект. Указанная деформация уровней делает возможным вертикальные (с затратой энергии) и горизонтальные (без затраты энергии) переходы электронов.

Горизонтальный переход подобен просачиванию электрона через потенциальный барьер. Вертикальный переход аналогичен возбуждению.

В соответствии с этим следует различать два механизма ионизации: 1) ионизация столкновениями (вертикальный переход) и 2) ионизация вырыванием (горизонтальный переход).

Современные теории электрического пробоя можно разделить на две группы: 1) теории, основанные на механизме ударной ионизации, и 2) теории, основанные на туннельном эффекте.

Теории ударной ионизации не приводят, в противоположность старым взглядам, к лавинообразному нарастанию тока с расстоянием, так как учитывается не только процесс высвобождения электронов, но и процесс их связывания. В связи с этим современные теории ударной ионизации в твёрдом диэлектрике не предсказывают упрочнения в тонких слоях, не наблюдающегося на опыте.

Работы советских физиков, посвящённые раскрытию механизма электрического пробоя, за последнее время позволили выявить такие экспериментальные факты, которые, с одной стороны, подтверждают исключительную роль электронного тока при электрическом пробое диэлектрика и, с другой стороны, позволяют, в известной мере, отдать предпочтение теориям туннельного эффекта по сравнению с теориями ударной ионизации (Волькенштейн).

Для «туннельного» механизма электрического пробоя характерны почти полная независимость от температуры и внезапность его проявления. Эти особенности косвенно подтверждаются экспериментальными данными советских исследователей.

Вышеописанная схема представлений о природе диэлектриков и их электрическом пробое построена на основании применения к ним «зональной» теории, детально развитой для металлов. Применение этой теории к диэлектрикам является лишь весьма грубым приближением к действительности.

В 1936—1937 г. Я. И. Френкель разработал иные представления о природе диэлектриков. Согласно этим воззрениям кристаллический диэлектрик трактуется как сжатый газ, в котором каждый атом имеет свой нормальный комплект электронов. Частичная коллективизация наружных электронов может происходить лишь при возбуждении кристалла. При поглощении света одним из атомов возможен не только отрыв электрона — его коллективизация, но возможно и возбуждение атома. В газе возбуждённое состояние может передаваться от одного атома к другому при столкновениях. В кристалле эта передача возбуждения может происходить и без столкновений; вследствие интенсивного взаимодействия между соседними атомами. Таким образом, возбуждённое состояние оказывается способным перемещаться по атомам кристалла так же, как перемещаются коллективизированные

электроны или «дырки», и по тем же волновым законам. Следовательно, возбуждённые состояния можно трактовать как некоторые фиктивные частицы, которые Френкель назвал экситонами. Отсутствие ярко выраженного внутреннего фотоэффекта у многих кристаллов можно объяснить согласно этой концепции тем, что при поглощении света образуются не коллективизированные электроны и дырки, а электрически нейтральные экситоны.

Давыдов разработал теорию пробоя газа, основанную на представлении о том, что «ионизирующим» столкновениям атомов с электронами предшествуют столкновения «возбуждающие».

Развивая изложенную концепцию о диэлектрике, как о сжатом газе, Френкель вывел формулу, дающую зависимость электронной электропроводности кристалла от напряжённости поля

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{Vq^2E}{kT}},$$

где q — элементарный заряд, E — напряжённость поля. Возможно, что дальнейшее развитие этой концепции даст возможность построить новую теорию электрического пробоя кристаллических диэлектриков.

В действительности электрический пробой проявляется у ряда диэлектриков в соответствующих условиях. Критерием электрического пробоя (в отличие от теплового пробоя) служат: 1) независимость от температуры, 2) независимость от времени приложения напряжения, 3) разрушение диэлектрика в месте наибольшего поля (чаще всего у края электрода).

Эти условия, однако, сравнительно редко оказываются выполненными одновременно и полностью. Большинство диэлектриков, в зависимости от условий, может пробиваться как тепловым, так и электрическим способами. Поэтому, например, при длительном воздействии напряжения для одного и того же диэлектрика может иметь место тепловой пробой, а при кратковременном — электрический. При высоких температурах и высоких частотах, как указывалось выше, все диэлектрики характеризуются тепловым пробоем и т. п. Весьма существенно поэтому установить не только критерии электрического пробоя, но и те условия, в которых он развивается в каждом отдельном диэлектрике. Работы советских физиков в этой области сыграли большую роль.

Весьма важным (как теоретически, так и практически) явилось открытие советскими учёными (Вул и др.) особых форм электрического пробоя: неполного пробоя и последовательного пробоя. Было показано, что если диэлектрик (каменная соль, стекло, слюда и т. п.) подвергать ударам импульсного напряжения, несколько меньшего чем пробивное, то диэлектрик начинает разрушаться, однако это разрушение не идёт до конца: образуется неполный пробой диэлектрика, ведущий к образованию микроскопических, а иногда и заметных простым глазом трещинок и других следов разряда в толще диэлектрика.

Последовательный ряд неполных пробоев может привести к окончательному пробую при напряжении, почти в два раза меньшем, чем нормальное пробивное напряжение. Такой последовательный пробой наблюдался для кабельной бумаги, бакелито-бумажных досок, миканита.

Развитие последовательного пробоя тесно связано с постепенным разрушением диэлектрика под действием не только неполных пробоев, но и краевых разрядов. При наличии краевых разрядов последовательный пробой возможен при переменном напряжении низкой частоты.

С опасностью последовательного пробоя изоляции необходимо считаться при конструировании, эксплуатации и испытании высоковольтных установок, трансформаторов, электрических машин, кабелей, линий передачи. Пробой изоляции во всех этих установках при принятых в настоящее время запасах прочности имеет характер последовательного (за исключением прямых грозовых ударов).

При нерационально поставленном испытании изоляции импульсами может возникнуть неполный пробой изоляции, что будет сказываться при эксплуатации установки.

в) Пробой жидких диэлектриков и газов

Советские физики занимались изучением не только пробоя твёрдых диэлектриков, но также и пробоя жидких диэлектриков и, в особенности, газов.

Работы, проведённые в области изучения пробоя жидких диэлектриков, хотя и не позволяют ещё решить вопрос о его механизме, но разъяснили ряд вторичных явлений (роль газа, роль воды и т. д.), необычайно запутывающих картину пробоя жидкостей, дали возможность наметить строгую методику исследования и подвели вплотную к решению вопроса о механизме пробоя жидкостей.

Большие достижения имеет советская физика в области изучения пробоя газов. Здесь физика диэлектриков вплотную подходит к физике газового разряда.

В настоящее время особенно повысились требования электропромышленности в отношении получения нестареющей и теплостойкой высоковольтной изоляции. В качестве такой изоляции стал находить себе применение сжатый газ (газонаполненный кабель, конденсатор со сжатым газом и т. п.). Вполне понятно, что работы по исследованию пробоя газов получили большое практическое значение.

Было подробно и систематически изучено влияние различных факторов на пробой инертного газа (в частности азота). Исследовалось влияние давления и температуры, формы электродов, расстояния между электродами, облучения и т. п. (работы Вула, Гольдман, Коваленко, Парнаса).

Интенсивно изучалась также электрическая прочность разных газов, в частности, с целью изыскания газа с повышенной электрической прочностью, применение которого не требовало бы столь

высоких давлений, как применение азота (работы Гохберга, Зандберг, Коваленко и др.).

Оказалось, что электрическая прочность газа находится в связи с его молекулярным весом. Газы с малым молекулярным весом обладают небольшой электрической прочностью. Наоборот, тяжёлые газы, как правило, характеризуются высокой электрической прочностью. Однако непосредственной зависимости между молекулярным весом и электрической прочностью газа, повидимому, нет.

Изучение электрической прочности разнообразных газов позволило, во-первых, установить ряд закономерностей, в частности, показать, что величина первого коэффициента ионизации α (ионизация электронами), имеющая место при пробое газа, не зависит или мало зависит от индивидуальности газа и, во-вторых, открыть газ с большой электрической прочностью (в 2,5 раза больше электрической прочности воздуха), применение которого в качестве изоляции, например, для мощных конденсаторов, не встречает затруднений. Этот газ был назван элегазом (работы Гохберга и др.)

В последнее время эти работы получили дальнейшее развитие (Гохберг, Зандберг). Точными исследованиями было установлено, что первый коэффициент ионизации α в различных газах достигает одной и той же величины при резко различных напряжённостях поля. При этом напряжённости поля, при которых величина α достигает одного и того же значения, в разных газах относятся к напряжённости поля в воздухе так же, как пробивные напряжённости этих газов к пробивной напряжённости воздуха. Таким образом, однозначно установлено, что развитие пробоя газа в первую очередь и в основном определяется процессом ударной ионизации электронами, и величина пробивного напряжения обусловлена лишь тем, как зависит первый коэффициент ионизации от напряжения.

5. СТАРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ И БОРЬБА С НИМ

Весьма важной в изоляционной технике является гарантия длительной работы изоляции в эксплуатационных условиях. Такая гарантия в ряде случаев может быть дана только тогда, когда приняты специальные меры по борьбе со старением изоляции.

Систематическому изучению старения изоляционных материалов было положено начало работами Вула и Гольдман. Старение изоляционных материалов под действием высокого напряжения обуславливается следующими факторами: 1) нагрев изоляции вследствие повышенных диэлектрических потерь — главным образом, при высоких частотах (или под действием повышенной температуры, при которой работает электрический аппарат), ведущий к медленному постепенному термическому разрушению материала, 2) ионизация воздушных промежутков внутри изоляции и между изоляционным слоем и изолируемым проводником, ведущая а) к местным разогревам изоляции,

б) к механическому разрушению изоляции под действием искровых разрядов в воздушных промежутках и в) к химическому разрушению изоляции под действием озона и окислов азота, выделяющихся в ионизованных воздушных промежутках.

Первый фактор — постепенное термическое разрушение изоляции — устраняется выбором материалов, обладающих соответствующей теплоустойчивостью и достаточно малым углом потерь. Проблеме теплоустойчивой изоляции посвящено большое количество работ советских физиков и химиков за последние годы. В результате этих работ получены и частью внедрены в производство изоляционные лаки с повышенной теплоустойчивостью (в первую очередь глифталевые лаки). Разработаны различного рода асбестовые материалы (асбестовая лента, асбестовая бумага), получившие широкое распространение в технике изолирования высоковольтных электрических машин. Наряду с этим, ряд работ по применению теории теплового пробоя позволил установить и обосновать нормы на угол потерь различных материалов, применяемых в электромашиностроении, в кабельной технике, в высокочастотной технике; эти нормы дают гарантию длительной работы этих материалов без внутреннего разогрева. Начаты работы по применению стеклянной ткани в кабельной и электромашиностроительной технике, что приведёт к сильному увеличению рабочих температур и в связи с этим — мощности машин и кабелей.

К этому же кругу вопросов примыкают заводские работы по получению теплопроводной изоляции на основе битума и кварца, нашедшие уже практическое применение.

Второй фактор, вызывающий старение изоляции, — ионизация воздушных прослоек — подвергся детальному и систематическому изучению (Сканави, Канонькин, Бугель). Установлена методика обнаружения начала ионизации.

Старение изоляции вызывается не только ионизацией внутренних воздушных включений, но в значительной степени и коронированием на поверхности изоляции, которое может иметь место у краёв изолируемых проводников и не устраняется монолитностью изоляции.

Борьбе с короной посвящён ряд работ советских физиков (Иоффе, Вул, Гольдман, Сканави и др.). Сглаживание поля у краёв изолируемых проводников можно, как практически показали эти работы, осуществить весьма простыми способами: 1) покрытием краёв проводников и поверхности изоляции лаком с большой диэлектрической проницаемостью; 2) покрытием полупроводящим лаком. Ко второму способу прибегают при использовании сажных асфальтовых и сажно-бакелитовых лаков в крупном электромашиностроении, где эти последние обычно применяются в комбинации с асбестовыми полупроводящими лентами.
