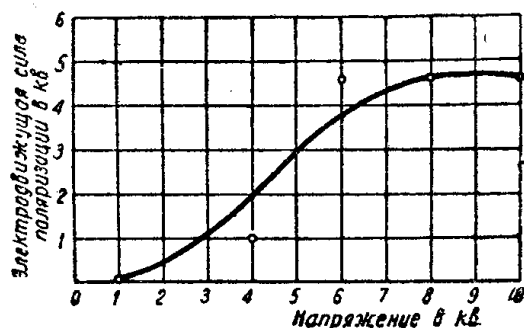




Как видно из рисунка 1, вначале, с увеличением напряжения поляризации, противоэлектродвижущая сила поляризации растет, достигает максимума, затем сохраняется постоянной. Такой ход зависимости вызывается, вероятно, тем, что при высоких полях, создаваемых в области объемных зарядов, значительно возрастает электропроводность вещества и сохранение объемного заряда большой плотности становится невозможным. В наших опытах, при толщине образца  $d = 0,38$  мм, максимальная э.д.с. поляризации составляла 4,6 кв. Полученная зависимость поляризации от напряжения совпадает с аналогичными данными других авторов (12).

В результате проведенных предварительных исследований мы остановились на следующих условиях опытов, дающих оптимальный результат: напряжение поляризации 5 кв, время поляризации 3 минуты, температура поляризации  $20^{\circ}\text{C}$ , температура опыта  $5^{\circ}\text{C}$  и продолжительность опыта 3—4 минуты.

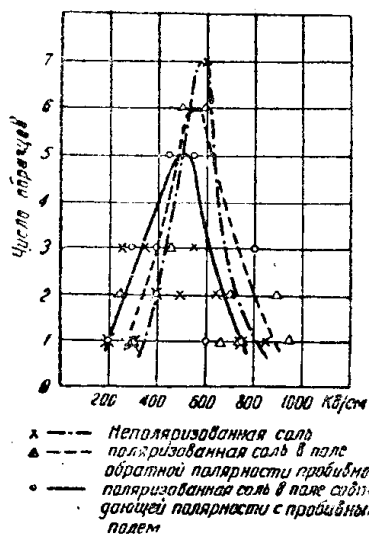


Зависимость величины электродвижущей силы поляризации от напряжения.

Рис. 1

### Пробивное напряжение диэлектрика при наличии в нем объемных зарядов

Для выяснения влияния поляризации образцов на их пробивное напряжение были поставлены сравнительные определения пробивных напряжений образцов неполяризованных и поляризованных. В последнем случае пробой производился как при напряжении, совпадающем по направлению с поляризующим, так и обратном. Испытывая образцы с помощью коротких импульсов напряжения длительностью  $10^{-4}$ — $10^{-6}$  сек, мы могли считать, что при этом в них не создается объемных зарядов. Специальные опыты показали, что под действием таких импульсов в наших условиях не происходило заметного рассасывания объемного заряда.



Распределение числа образцов по их электрическим прочностям.

Рис. 2

импульсного напряжений. наличие объемного заряда и

Полученные нами характерные результаты для каменной соли приводятся на рис. 2. На этом рисунке по оси абсцисс отложено значение пробивной прочности в кв/см, а по оси ординат—число образцов, обнаруживших при пробое на импульсах ту или иную величину электрической прочности.

Из рассмотрения приведенных результатов видно, что наибольшее число образцов обладает определенным, наиболее вероятным значением электрической прочности, причем величина этой прочности оказывается приблизительно одинаковой для неполяризованных образцов и поляризованных как при совпадающей, так и противоположной полярностях постоянного и импульсного напряжений. Поэтому приходится сделать вывод, что наличие объемного заряда и электродвижущей силы поляризации порядка

ние диэлектрика. По данным Вула и Гольдман, Вендеровича, Воробьева, наличие объемного заряда в диэлектрике понижает его пробивное напряжение. Ни одна из этих работ не дает количественных характеристик, которыми можно было бы руководствоваться при расчете изоляции и производстве испытаний.

По поводу каждой из этих работ можно привести веские возражения против методики измерений, примененной авторами [10]. Отсюда возникла необходимость в проведении специальных исследований, в чистых условиях опыта, для выяснения влияния объемного заряда в диэлектрике на его пробивное напряжение. Этот вопрос имеет практический и теоретический интерес.

### Методика эксперимента

В качестве исследуемых материалов в наших опытах были взяты каменная соль и кальцит, имеющие различное распределение объемного заряда. Объемные заряды в каменной соли создаются вблизи обоих электродов, в кальците же получается сосредоточенный объемный заряд в прикатодном слое.

Полагая, что объемный заряд в кристалле при низкой температуре через большое внутреннее сопротивление кристалла будет рассасываться медленно, мы производили поляризацию образца при высокой температуре, затем, не снимая напряжения, охлаждали его до более низкой температуры, при которой производился пробой.

Для опытов по пробоем образцов с объемным зарядом экспериментальным путем были подобраны оптимальные условия, при которых объемный заряд получался максимальным и в продолжение опыта мало изменялся. Нами исследовалось также влияние на пробивное напряжение электронного объемного заряда, который создается в рентгенизованной каменной соли.

В опытах с каменной солью и кальцитом употреблялись образцы с лунками, дающие возможность получить однородное поле. По данным А. Вендеровича и Р. Дризиной [11], поляризация сильно зависит от предварительного прокаливания образцов. Э.д.с. поляризации после прокаливания образцов уменьшается, так как прокаливание вызывает перераспределение примесей. В наших опытах, при испытании образцов целой серией необходимо было для получения сравнимых результатов образцы нормализовать. С целью нормализации образцы предварительно отжигались в течение 10 часов, при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ , затем плоская сторона образца, с помощью распыления в вакууме, покрывалась тонким слоем свинца или серебра. В качестве второго электрода служила ртуть, заливаемая в лунку, или слой металла, также наносимый в вакууме путем распыления. Разницы в результатах опытов при употреблении электродов того или иного вида мы не получали.

Измерение токов деполяризации производилось с помощью струнного электрометра Эдельмана -- Лютца по способу зарядки. Чувствительность электрометра в опытах с ионным объемным зарядом была 2 вольта/деление. Поляризуемый образец помещался в стеклянный сосуд и заливался трансформаторным маслом. В качестве источника высокого напряжения при поляризации образцов употреблялась установка, собранная по одноконтурной схеме, стабилизированная емкостью  $C = 0,02 \mu\text{F}$ . Величина объемного заряда зависит от условий, в которых он образуется, и в частности от величины приложенного напряжения, температуры, времени и других факторов.

На рис. 1 представлена зависимость э.д.с. поляризации от напряжения, при котором производилась поляризация. Эта зависимость снята для образца каменной соли толщиной  $d = 0,38$  мм при температуре  $15^{\circ}\text{C}$ .

поляризации в тонких слоях канифоли и парафинированной бумаги. Их целью было показать влияние электродвижущей силы поляризации на пробивное напряжение канифоли и парафинированной бумаги.

Авторы производили пробой указанных диэлектриков при ударной и постепенно повышающейся электрической нагрузке. В результате проведенных исследований они делают заключение о наличии влияния электродвижущей силы поляризации на пробивное напряжение диэлектриков. В основу исследования этих авторов положен известный факт о накоплении объемного заряда в диэлектрике под действием приложенной разности потенциалов и предположение о том, что электродвижущая сила поляризации должна уменьшать действующую на диэлектрик разность потенциалов, поэтому пробивное напряжение диэлектрика должно возрасти.

На основании своих опытов они делают заключение о влиянии э. д. с. поляризации на пробивное напряжение диэлектриков и считают, что электродвижущая сила поляризации противодействует пробую и повышает пробивное напряжение. При перемене знака напряжения, прикладываемого к диэлектрику, пробивное напряжение падает, так как в диэлектрике уже успела возникнуть электродвижущая сила поляризации. Эти результаты находятся в противоречии с результатами более поздних исследований.

Основной результат этих авторов состоит в том, что пробивное напряжение при кратковременном воздействии напряжения ниже, чем при более длительной экспозиции. В настоящее время твердо установлено, что благодаря статистическому запаздыванию по причине формирования разряда [7], пробивное напряжение твердых диэлектриков на импульсах выше пробивного напряжения при статическом напряжении.

Следует указать на некоторые недостатки, имевшие место в опытах цитируемых авторов. Так, при пробое пластинок твердых диэлектриков в воздухе обязательно будут иметь место поверхностные разряды; они искажают электрическое поле в диэлектрике. При наличии маломощного источника энергии, с каким имели дело экспериментаторы, будут получаться самые неопределенные результаты, так как неопределенной будет форма кривой напряжения и его максимальная величина.

Второй источник возможных ошибок в данной работе может находиться в применявшемся способе получения электрических импульсов и их измерении. Способ получения кратковременных электрических напряжений, примененный авторами, не давал возможности получить какую-либо определенную форму кривой напряжения.

Вопросом о влиянии объемного заряда на электрическую прочность диэлектриков также занимались А. М. Вендерович и А. А. Воробьев [8]. Ими было проведено исследование влияния сосредоточенного объемного заряда в кальците на его электрическую прочность и обнаружено понижение пробивного напряжения при наличии объемного заряда.

Вул и Гольдман [9], изучая пробой рентгенизованной каменной соли при внутреннем фотоэффекте, наблюдали понижение пробивного напряжения при освещении, если пробой производится при постоянном и переменном напряжении. Производя эти же опыты на импульсном напряжении, они не наблюдали снижения пробивного напряжения. Понижение пробивного напряжения они объяснили как следствие искажения электрического поля в кристалле объемными зарядами, образующимися при фототоке, на статическом напряжении.

Из этого краткого обзора известных работ по изучению влияния объемного заряда на пробивное напряжение твердых диэлектриков видно, что они дают взаимно исключающие ответы на поставленный вопрос.

По данным Кузнецова, Бардаховой и Фатькиной, Грюнвальда, Вальтера и Инге объемный заряд в диэлектрике повышает пробивное напряже-

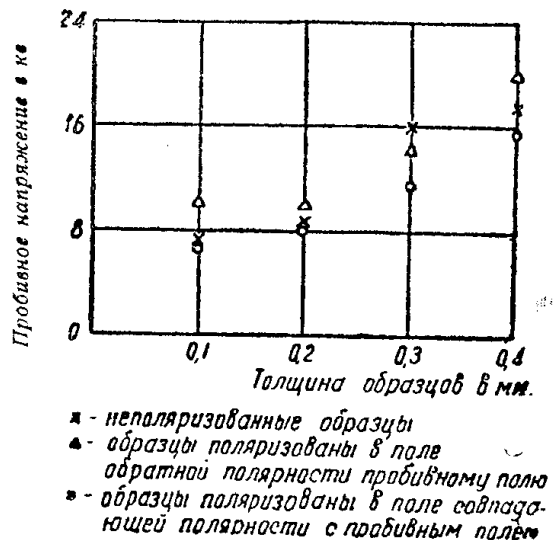
4 киловольт, не оказывает заметного влияния на величину пробивного напряжения этих образцов.

Известно, что объемный заряд в кальците сосредоточен вблизи катода в очень тонком слое, в котором возникают значительные градиенты потенциала. Подобные условия образования объемного заряда для наших целей представляли большой интерес. Прежде чем приступить к нашей основной задаче — измерению электрической прочности неполяризованного и поляризованного кальцита, нам пришлось провести также предварительные исследования по выбору оптимальных условий образования объемного заряда.

В результате предварительных исследований мы остановились на следующих условиях опытов. Для образцов толщиной 150—400 микронов напряжение, при котором поляризовались образцы, было взято равным 5 кв,

время поляризации 5 минут, температура 80°C. Во время пробоя температура поддерживалась равной 6°C. Для более тонких образцов, толщиной до 100 микронов, напряжение при поляризации употреблялось равное 3 кв.

На рис. 3 представлена зависимость пробивного напряжения кальцита от толщины — для образцов неполяризованных (обозначены крестиками), пробитых при напряжении полярности, обратной той, при которой происходила поляризация. Из рис. 3 видно, что электрическая прочность поляризованного кальцита несколько отличается от прочности для неполяризованного кальцита. Так же как в опытах Воробьева и Вендеровича, пробивная прочность поляризованного кальцита, пробитого при наложении напряжения обратной полярности, получилась выше, а пробивная прочность при наложении импульсов совпадающей полярности — ниже, чем пробивная прочность неполяризованного кальцита.



Зависимость пробивного напряжения (средние значения) кальцита от толщины образцов.

Рис. 3

Однако необходимо подчеркнуть, что полученная разница в пробивных прочностях поляризованного кальцита является незначительной. Это указывает на то, что поляризационные явления, наиболее сильно выраженные в кальците, не оказывают существенного влияния на пробой.

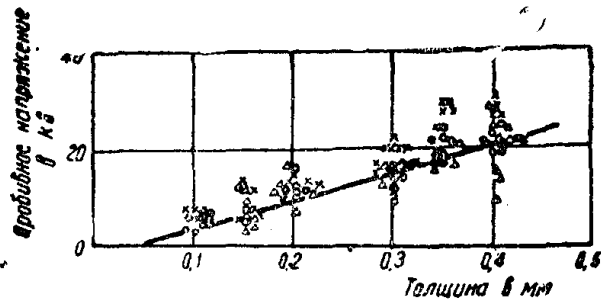
В качестве материала для опытов с электронным объемным зарядом была избрана рентгенизованная каменная соль, фотопроводимость которой хорошо изучена [13].

Окрашивание образцов производилось с помощью трубки Кулиджа. Длительное облучение рентгеновыми лучами и частое перемешивание при этом образцов давали видимую одинаковую окраску.

Сосуд, в котором производились опыты, был хорошо затемнен. Изоляция электрометрической цепи была выполнена с помощью янтаря и толстых слоев парафина. Освещение образца производилось от вольтовой дуги через фокусирующую оптическую систему.

Фотопроводимость сильно зависит от интенсивности света [14]. В наших опытах было показано, что при длительной поляризации образцов небольшие колебания интенсивности освещения имеют мало влияния на величину поляризации. Оказалось возможным подобрать такие условия опыта, при которых поляризация образцов оказывалась одинаковой.

Из рис. 4 видно, что максимальные значения электрической прочности образцов неполяризованных, поляризованных и пробитых при напряжении обратной и совпадающей полярности, совпадают. Эти опыты дают возможность сделать заключение, что заметного влияния электронного объ-



Зависимость пробивного напряжения рентгенизованной поляризованной NaCl от толщины образцов.

Рис. 4

емного заряда на электрическую прочность на импульсах рентгенизованной каменной соли не наблюдается.

### Заключение

Теоретические предположения о возможной роли объемных зарядов при пробое основываются на двух предположениях: 1—существование в области объемного заряда поля большой напряженности и 2—влияния электродвижущей силы поляризации на пробивное напряжение.

Нашими экспериментальными исследованиями было показано, что пробивное напряжение кальцита и каменной соли на импульсах, в присутствии объемного заряда, заметно не изменяется. Эти результаты имеют следующее вероятное объяснение. Даже при более или менее равномерном распределении объемного заряда по толщине кристалла наибольшее падение потенциала получается вблизи электродов в тонких слоях. Образование электрических полей высокой напряженности в области объемного заряда допустить затруднительно, так как уже при полях порядка  $10^5$  в/см начинается сильное увеличение электропроводности.

По мнению Вальтера и Инге [15] рост темновой электропроводности в сильных полях в кристаллах каменной соли может быть объяснен лишь реальным ростом ионной электропроводности или наложением на ионные токи добавочных токов, обусловленных движением свободных электронов, освобождаемых непосредственно полем.

Электропроводность кристалла, возрастающая при увеличении поля, задержит дальнейший рост поля и приведет к выравниванию распределения потенциала по образцу и к усреднению полей.

В работе Воробьева [16] было показано, что малые локальные нарушения однородности диэлектрика при введении в него примесей или деформации, не оказывают заметного влияния на пробивную прочность.

При наличии объемного заряда в диэлектрике отклонения от среднего для диэлектрика режима будут получаться в слоях толщиной порядка микронов. Мы имели дело с диэлектриками с толщиной слоя в несколько сот микронов. Можно думать, что явления, которые происходят в этих тонких слоях, не оказывают значительного влияния на пробивную прочность диэлектрика.

Если учесть различные вторичные явления, возникающие при пробое, то объемный заряд на величину пробивного напряжения твердых диэлектриков не оказывает заметного влияния. К такому выводу мы приходим на основании анализа результатов наших опытов и критического рассмотрения работ предшествующих авторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Гохберг и В. А. Иоффе. ЖЭТФ, 1, 264, 1931.
2. Акад. А. Ф. Иоффе. Физика кристаллов.
3. R. Fauler. Proc. Roy. Soc A. 141, 56, 1933.
4. А. Ф. Иоффе, К. Д. Синельников. Труды ЛФТИ, 3, 55, 1926.
5. F. Grünwald. Arch. f. El. 12, 1, 1923.
6. В. Д. Кузнецов, З. А. Бардахова и Н. М. Фаткина, ЖРФХО, LX; 1, 57, 1928.
7. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений. ГТТИ, в 1, стр. 278.
8. А. М. Вендерович и А. А. Воробьев. Труды СФТИ, 4, 15, 1936.
9. Вули Гольдман. ДАН 1, 6, 363, 1935.
10. Е. К. Завадовская. Диссертация. 1941.
11. A. Wenderowitsch und K. Drisina. Zs. f. Phys., 98, 1 и 2, 108, 1936.
12. И. С. Стекольников. Молния. Изд. АН СССР, 1940.
13. P. Tartakovsky. Zs. f. Phys. 6, 830, 1930.
14. Д. М. Каминкер. ЖЭТФ, 10, 2, 145, 1940.
15. А. Ф. Вальтер и М. Д. Инге. ЖЭТФ 10, 940, 1034, 1940.
16. А. А. Wogobjew. Journ. of Phys. USSR III, 2, 1940.