К ВОПРОСУ О ТЕПЛОВОМ ПРОБОЕ КАМЕННОЙ СОЛИ

Г. А. Андреев

(Представлено профессором, доктором А. А. Воробьевым)

Многочисленными исследованиями [1—4] установлено, что при температуре от 40 до 80° С происходит резкое изменение в ходе температурной зависимости электрической прочности ($E_{пр}$) каменной соли. Вальтер и Инге указывают, что это изменение происходит в интервале температур 3—5° С, после чего с ростом температуры вступает в силу тепловой механизм пробоя, отличный от электрического, имеющего место в области более низких температур. В области теплового пробоя наблюдается зависимость $E_{пр}$ от времени приложения напряжения, с ростом которого $E_{пр}$ уменьшается [5]. При электрическом пробое и длительном времени (порядка нескольких секунд) приложения напряжения эта зависимость отсутствует или очень слабо выражена [6]. Резкое уменьшение $E_{пр}$ каменной соли с ростом температуры долгое время объяснялось на основании тепловой теории пробоя, разработанной Вагнером и Фоком.

Теория Вагнера [7], объясняющая пробой твердых диэлектриков наличием в них неоднородностей, дает только качественное представление о ходе уменьшения $E_{пр}$. Теория Фока [8], учитывая свойства реального диэлектрика, не только качественно, но и количественно выражает зависимость $E_{пр}$ от температуры.

Температурная зависимость $E_{пр}$ ряда твердых диэлектриков, в том числе и каменной соли [2, 6, 9], была исследована Вальтером и Инге. Их исследования показали хорошее совпадение экспериментальных данных с выводами теории Фока. Экспериментальные результаты Вальтера и Инге были подвергнуты критике Хиппелем [10], по предположению которого уменьшение $E_{пр}$ при больших температурах происходит из-за создания в каменной соли положительного объемного заряда и увеличения эмиссии электрическим полем с катода [3]. Однако Хиппель не дает количественного расчета $E_{пр}$ для области больших температур.

В 1947 г. Фрелих [11] предложил теорию, объясняющую уменьшение $E_{пр}$ с ростом температуры нарушением равновесия в обмене энергией между полем и электронами и между электронами и решеткой аморфного диэлектрика. Но и эта теория лишь качественно объясняет изменение электрической прочности и не может быть проверена количественно. В 1956 г. Фрелих предложил новую теорию, согласно которой температурная зависимость $E_{пр}$ объясняется в отличие от теории 1947 г. усилением взаимодействия электронов между собой. $E_{пр}$ по этой теории, разработанной для реальных кристаллов, выражается через величины, которые могут быть определены практически. Однако проверка правильности новой теории Фрелиха пока не проведена.

Исследованиями установлено [5, 12, 13], что ток, протекающий через образец каменной соли, возрастает с ростом напряжения и температуры образца.

В литературе отсутствуют данные о температурной зависимости предпробивных электрических характеристик и не освещен вопрос о количестве электрической энергии, необходимой для разрушения каменной соли при различных температурах. Единственная в этом направлении работа [14] выполнена на импульсном напряжении при комнатных температурах образца.

Настоящая работа была начата с целью получения температурной зависимости предпробивных характеристик каменной соли и оценке энергии, выделяющейся в образце от момента начала повышения напряжения до момента пробоя.

Для этого была разработана методика снятия вольт-ампер-секундных характеристик для образцов каменной соли в условиях равномерного поля и высоких температур на постоянном возрастающем напряжении.

МЕТОДИКА

А. Описание установки

Рядом авторов [2, 3, 13] показано, что при изменении температуры от 0 до 500° С $E_{пр}$ каменной соли находится в пределах от 1,5 *мв/см* до 2 500 *в/см*, а ток от 10^{-8}—10^{-9} *а* до нескольких долей ампера. Для образцов толщиной 100—200 *мк* $U_{пр}$ будет изменяться в пределах от

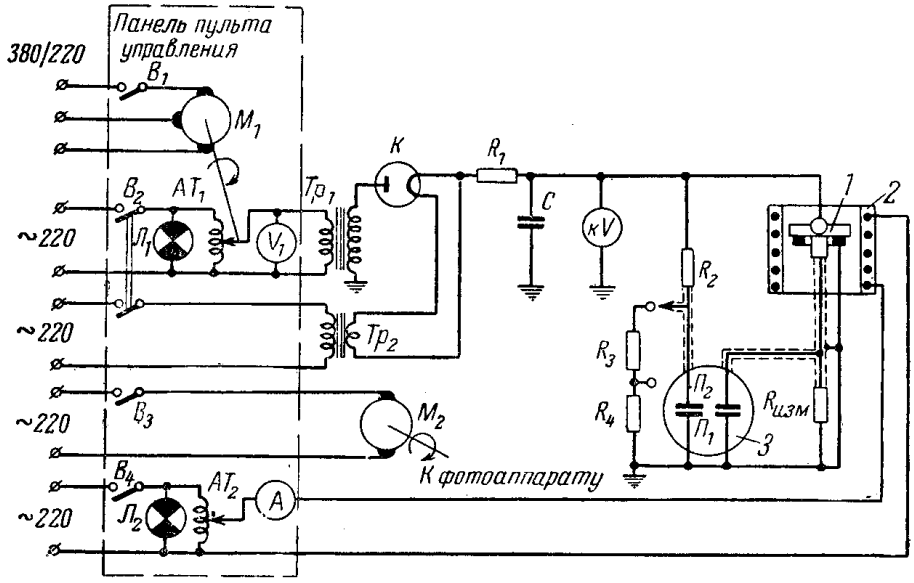

Рис. 1. Принципиальная схема установки.
1 — образец; *2* — электропечь; *3* — экран электронного осциллографа.

200—300 *в* до 35 *кв*, а ток от 10^{-9} *а* до нескольких долей ампера.

Из этого вытекают следующие требования к измерительной аппаратуре:

1. Возможность измерения напряжения от нескольких сотен вольт до 30—40 *кв*.

2. Возможность измерения токов в пределах от 10^{-1} до 10^{-9} *а*.

3. Возможность фиксирования процессов с точностью не ниже ±10% и простое сопоставление их во времени.

Этим требованиям удовлетворяет разработанная нами установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

На одну пару вертикальных пластин $П_1$ двухлучевого осциллографа типа 1551 «Орион» с сопротивления $R_{изм}$ подавалось напряжение, пропорциональное току, текущему через образец при приложении к нему высокого напряжения. Величина $R_{изм}$ выбиралась заведомо меньше со-

противления образца R_o. Основанием для выбора необходимой величины $R_{изм}$ служило максимально возможное отклонение луча на экране осциллографа перед самым пробоем образца. В этом случае напряжение на $R_{изм}$ должно быть порядка 150 *в*, в то время как напряжение на образце U_o составляет несколько киловольт. Из схемы следует, что в этом случае $R_o \gg R_{изм}$.

Особое внимание было уделено стабильности измерительных сопротивлений. Как следует из рис. 2, величины используемых сопротивлений с точностью до $\pm 2\%$ не зависят от напряжения.

Высокое до 40 *кв* постоянное напряжение, получаемое при помощи простой схемы выпрямления через омический делитель (R_2, R_3, R_4),

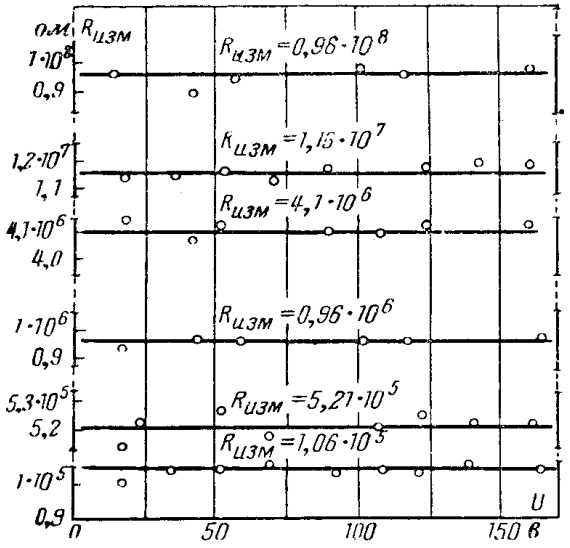

Рис. 2. Зависимость величины применяемых измерительных сопротивлений от напряжения.

подавалось на вторую пару вертикальных пластин $П_2$. Градуировка пластин $П_2$ производилась электростатическим киловольтметром типа С-96 класса точности 1,5. Пластины $П_1$ градуировались вольтметром *ЭЛВ* класса точности 0,2.

Специальная фотоприставка, состоящая из мотора $М_2$, редуктора и фотоаппарата, обеспечивала равномерное движение пленки перед объективом, чем выполнялась временная развертка.

При помощи электродвигателя $М_1$ было получено изменение высокого напряжения с практически равномерной скоростью, равной 0,63 *кв/сек*.

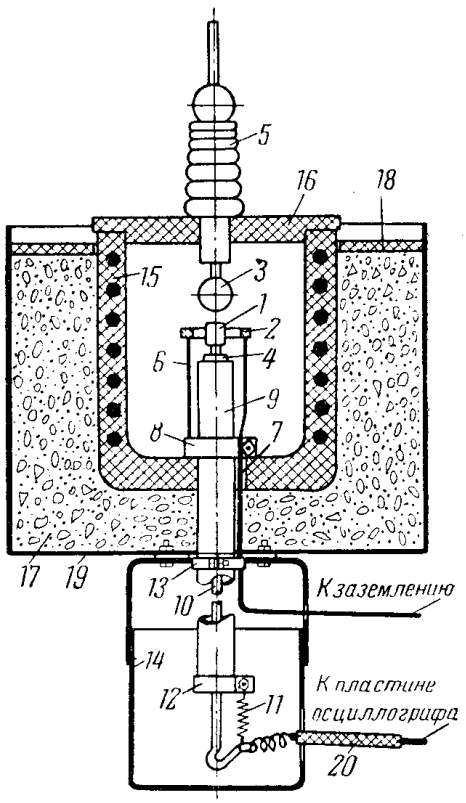

Рис. 3. Разрез электропечи с установленной в ней электродной системой.

1 — измерительный электрод; *2* — охранное кольцо; *3* — высоковольтный электрод диаметром 10 *мм*; *4* — стальная втулка; *5* — проходной изолятор; *6* — стойка; *7* — земляной провод; *8* — зажим; *9* — кварцевая трубка; *10* — вывод от измерительного электрода; *11* — пружина; *12* — зажим; *13* — крепежное кольцо; *14* — экран; *15* — корпус печи; *16* — крышка печи; *17* — теплоизоляция; *18* — крышка; *19* — кожух печи; *20* — кабель.

Разогрев и пробой образцов проводились в электропечи конструкции А. М. Трубицына [15], в которую помещались электроды, выполненные из стали ЭЯ-1-Т. Чертеж и фото электродной системы и ее расположение в электропечи приведены на рис. 3 и 4.

Образцы, имеющие плоскую форму с размерами $40 \times 40 \times 3$ *мм*, приготавливались из кристаллов природной каменной соли. На образцах высверливалась сферическая лунка диаметром 10 *мм*. Толщина образцов в тонком месте бралась равной 100 и 200 *мк*, отклонения по толщине не превышали $\pm 5\%$. После промера толщины образцы отбраковывались под микроскопом при 68-кратном увеличении.

Электроды наносились на образец путем осаждения графита из коллоидального раствора сажи в толуоле.

Измерение температуры проводилось ртутным термометром со шкалой до 800° С с точностью 1° С.

Исследовалось влияние величины $R_{изм}$ на величину тока, протекающего через образец. Используя свойство обратимости процессов в каменной соли, обнаруженное Вальтером и Инге [2, 10] и заключающееся в том, что ток через каменную соль не изменяется при неоднократном приложении напряжения, было проведено осциллографирование тока через образец толщиной 100 *мк* при 256° С и различных $R_{изм}$. При обработке осциллограмм получены результаты, представленные на рис. 5 в виде зависимости тока от напряжения.

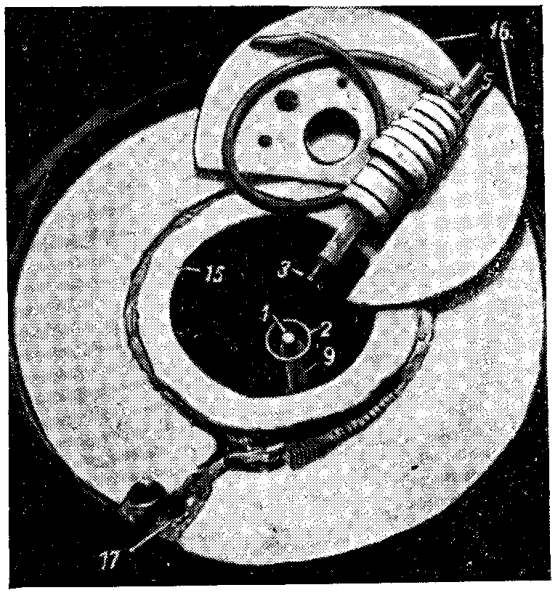

Рис. 4. Печь с установленными электродами (номера соответствуют деталям рис. 3).

Из рис. 5 следует, что при $R_{изм}$ от $1 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^7$ *ом* ток через образец в пределах точности измерений остается постоянным. При больших сопротивлениях наблюдается уменьшение тока, объясняемое приближением величины $R_{изм}$ к величине сопротивления образца R_0, которое при данных напряжениях изменяется от $6 \cdot 10^8$ до $2 \cdot 10^8$ *ом*.

Следует отметить, что при подборе $R_{изм}$ для данной температуры полное отклонение луча на экране осциллографа получается при $R_{изм} = 0{,}96 \cdot 10^6$ *ом*.

Таким образом, при подобном подборе измерительного сопротивления его величина будет значительно меньше R_0, и влияние $R_{изм}$ на величину тока через образец будет также незначительным.

Проверка точности измерения тока произведена путем сопоставления величин тока, вычисленных из осциллограмм с показаниями зеркального гальванометра типа 167301 (Goerz—Wien) класса точности 2. Гальванометр с внутренним сопротивлением в 355 *ом* через шунт с сопротивлением $1 \cdot 10^4$ *ом* включался последовательно образцу, нагретому до 252° С при $R_{изм} = 4{,}1 \cdot 10^6$ *ом*. Напряжение повышалось ступенями с 30-секундной выдержкой на ступени. Запись на пленку и измерения гальванометром производились одновременно.

Результаты измерений представлены в таблице.

Напряжение на образце, *в*	Толщина образца, *мк*	$i_{осцил}$, *а*	$i_{гальван}$, *а*	$\frac{i_{осцил}}{i_{гальван}}$
1 700	100	$13{,}6 \cdot 10^{-6}$	$13{,}8 \cdot 10^{-6}$	−1,5%
3 000	100	$28{,}35 \cdot 10^{-6}$	$27{,}83 \cdot 10^{-6}$	+1%
1 950	200	$19{,}0 \cdot 10^{-6}$	$18{,}63 \cdot 10^{-6}$	+1%

Из таблицы следует, что величины токов, измеренные осциллографом и гальванометром, хорошо совпадают.

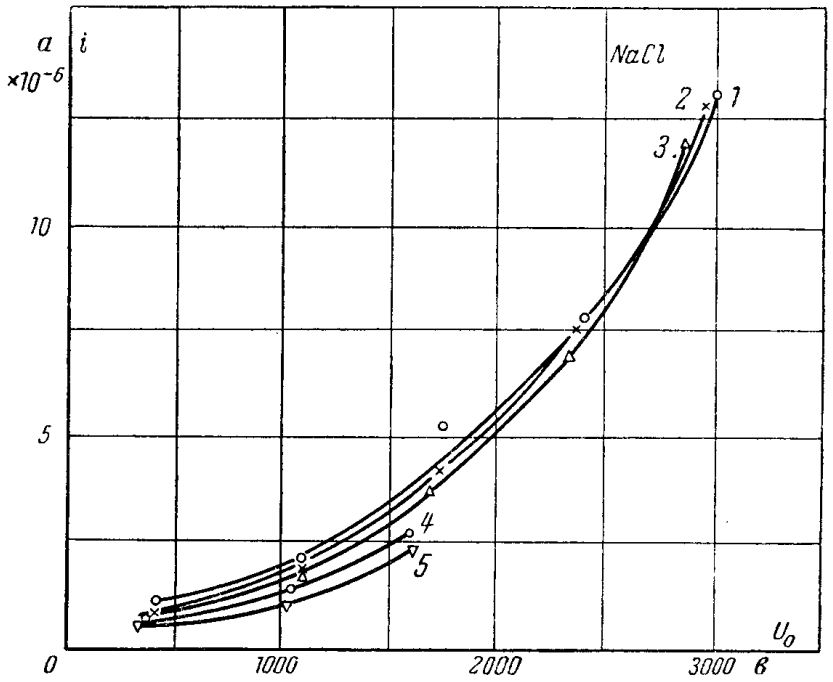

Рис. 5. Зависимость тока через образец от напряжения на нем при различных измерительных сопротивлениях.
Образец № 606 d = 100 *мк*, t = 256° С.
1 — $R_{изм}$ = 0,96·10⁸ *ом*; 2 — $R_{изм}$ = 4,1·10⁶ *ом*; 3 — $R_{изм}$ = 1,16·10⁷ *ом*; 4 — $R_{изм}$ = 5,2·10⁷ *ом*; 5 — $R_{изм}$ = 0,96·10⁸ *ом*.

Б. Обработка результатов осциллографирования

На рис. 6 приведена типичная осциллограмма пробоя, полученная при помощи описанной выше установки. Изменение напряжения на образце и $R_{изм}$ (U_n) записано верхней прямой, нижняя запись (U_i) соответствует напряжению на $R_{изм}$.

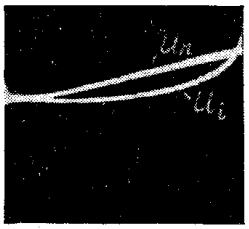

Рис. 6. Осциллограмма теплового пробоя.

Величины U_n и U_i определялись из осциллограммы под пятикратным увеличением.

Вычисление электрических характеристик образца (тока, сопротивления, мощности) проводилось по известному $R_{изм}$, исходя из закона Ома и величины падения напряжения на образце $U_o = U_n - U_i$. Энергия P, выделившаяся в образце за время от момента повышения напряжения до пробоя, определялась геометрическим интегрированием площади, ограниченной кривой мощности в координатах времени.

К недостатку методики следует отнести ограниченный предел измерения, определяемый максимальным отклонением луча на экране осциллографа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Согласно тепловой теории Фока $U_{пр}$ должно изменяться пропорционально корню квадратному из удельного сопротивления, температурная зависимость которого для каменной соли может быть выражена, как:

$$\rho = \rho_o e^{-aT}.$$

Тогда пробивное напряжение дается выражением

$$U_{пр} = \text{const} \cdot e^{-\frac{a}{2}T}.$$

Таким образом, $\lg U_{пр}=f(T)$ должен быть прямой линией с угловым коэффициентом $\frac{a}{2}$.

Высокотемпературная качественная теория Фрелиха [11], разработанная для неоднородных диэлектриков, дает зависимость электрической прочности от температуры в виде:

$$\ln E_{пр}=C+\frac{\Delta v}{2k}\cdot\frac{1}{T},$$

где C, Δv, k — постоянные, не зависящие от температуры.

На рис. 7 приведены средние из 10 — 15 точек значения электрической прочности в зависимости от температуры для образцов толщиной

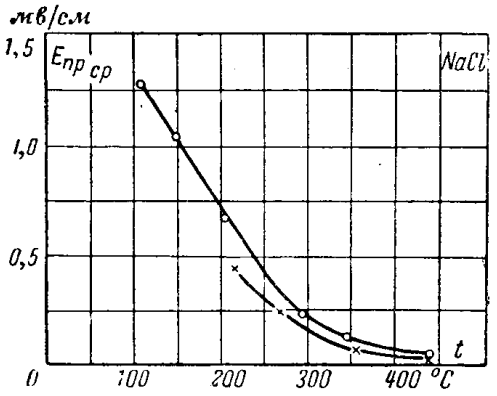

Рис. 7. Зависимость электрической прочности от температуры.
○ = 100 *мк*; × — d = 200 *мк*.

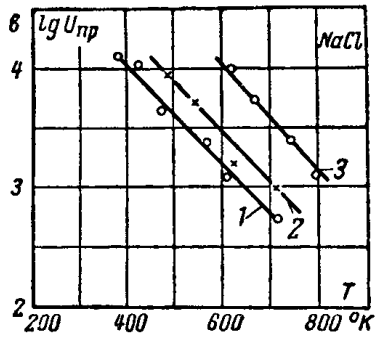

Рис. 8. Зависимость $\lg U_{пр}=f(T)$.
1 — d = 100 *мк*; *2* — d = 200 *мк*; *3* — d = 4 *мм* (по Вальтеру и Инге).

100 и 200 *мк*. Из рис. 7 следует, что в области от 110° до 440° С наблюдается резкое уменьшение электрической прочности каменной соли.

На рис. 8 приведена зависимость $\lg U_{пр}=f(T)$. Для сравнения здесь же приведены результаты Вальтера и Инге [2], полученные на постоянном напряжении при электродах в виде двух остриев и толщине образцов каменной соли $d=4$ *мм* и длительном времени приложения напряжения.

На рис. 8 следует, что полученные результаты хорошо удовлетворяют теории Фока, а совпадение наклона прямых с результатами Вальтера и Инге показывает, что коэффициент a для обоих случаев приблизительно одинаков.

Произведенная нами проверка показывает (рис. 9), что зависимость $\lg E_{пр}=f\left(\frac{1}{T}\right)$ оправдывается для температур выше 200° С. От 110° С до 200° С прямолинейной зависимости $\lg E_{пр}$ не получено.

Наблюдаемое уменьшение $E_{пр}$ для образцов с большей толщиной согласуется с тепловой теорией Фока и объясняется ухудшением условий теплоотвода при увеличении толщины.

На рис. 10 приведена температурная зависимость предпробивного тока. Из рис. 10 следует, что ток, несмотря на резкое уменьшение напряжения на образце, при увеличении температуры имеет возрастающий характер.

Полученные результаты показывают, что увеличение толщины образца в 2 раза мало сказывается на величине предпробивного тока. Этот факт, очевидно, связан с тем, что возрастание тока за счет внешнего поля компенсируется его уменьшением из-за увеличения сопротивления образца.

Рис. 11 показывает, что зависимости тока от напряженности электрического поля при различных толщинах образцов также совпадают.

На рис. 12 приведена температурная зависимость энергии P, выделившейся в образце от момента приложения напряжения до пробоя. Как следует из рис. 12, до 200° С наблюдается увеличение энергии, после 200° С—ее уменьшение. Наличие температурного максимума энергии говорит о том, что при данной температуре в образце происходят процессы, связанные с большими потерями энергии.

Тепловые теории, объясняющие пробой разогревом образца при протекании через него электрического тока, предусматривают дополнительную потерю тепла из-за теплоотвода от места разогрева в радиальном (Вагнер) и аксиальном (Фок) направлениях. Из тепловых теорий следует, что с увеличением разогрева образца

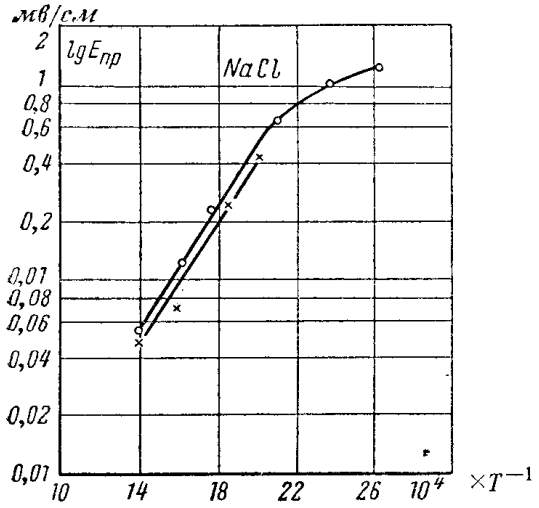

Рис. 9. Зависимость $\lg E_{пр} = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

○ — d = 100 *мк*; × — d = 200 *мк*; T — в°К.

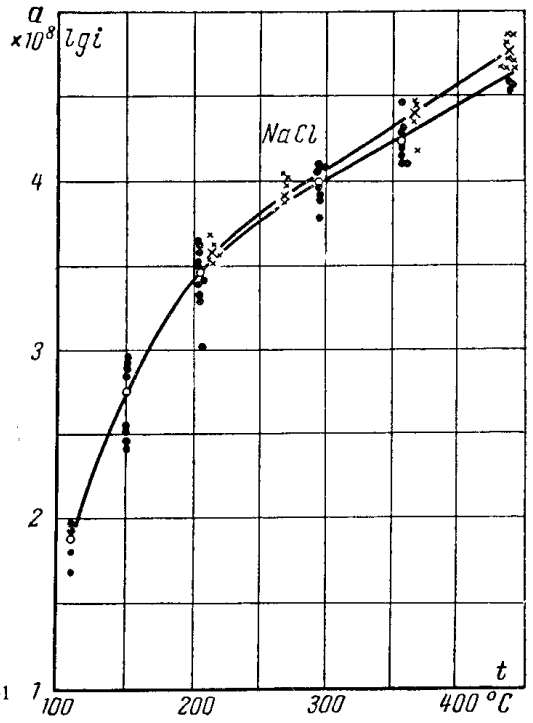

Рис. 10. Температурная зависимость предпробивного тока.

● — d = 100 *мк*; ○ — среднее значение для d = 100 *мк*; × — d = 200 *мк*; ×× — среднее значение для d = 200 *мк*.

требуется меньше энергии для его проплавления. Наличие максимума энергии тепловые теории не объясняют.

Возможное объяснение максимума энергии представляется из рассмотрения температурной зависимости тока и напряжения. Вследствие более крутого роста тока, наблюдаемого в области от 110° С до 200° С

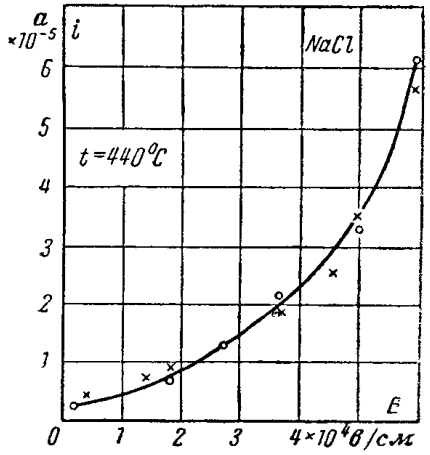

Рис. 11. Зависимость тока от напряженности электрического поля на образце.

○ — d = 100 *мк*; × — d = 200 *мк*.

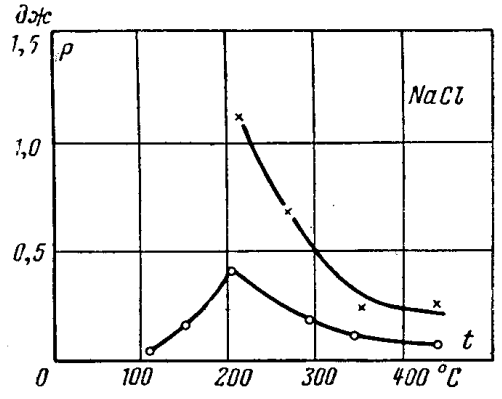

Рис. 12. Зависимость энергии, выделившейся в образце от температуры для образцов толщиной

○ — 100 *мк* и × — 200 *мк*.

(рис. 10), получается возрастающий характер энергии. Выше 200° С с ростом температуры возрастание тока замедляется, и при приблизительно одинаковом характере изменения напряжения зависимость энергии от температуры имеет уменьшение.

Из рис. 12 следует, что энергия выделяющаяся в образце, увеличивается почти пропорционально толщине. Некоторая непропорциональность в ходе кривых объясняется, очевидно, различными условиями теплоотвода.

Отметим, что значительный практический и теоретический интерес представляет изучение вопроса, на какие процессы в образце расходуется энергия.

Заключение

При помощи разработанной методики осциллографирования получены вольт-ампер-секундные характеристики природной каменной соли на постоянном возрастающем напряжении в области от 110 до 440° С.

Полученные результаты позволяют определить предпробивные электрические характеристики, рассмотрение которых показало, что:

1) зависимость электрической прочности во всем температурном интервале от 110 до 440° С качественно хорошо удовлетворяет тепловой теории Фока и лишь частично «высокотемпературной» теории Фрелиха;

2) температурная зависимость предпробивного тока имеет возрастающий характер, несмотря на резкое уменьшение напряженности электрического поля на образце с ростом температуры;

3) температурная зависимость энергии имеет максимум около 200° С, уменьшение энергии с температурой (после 200° С) подтверждается тепловой теорией Фока.

В заключение выражаю благодарность профессору, доктору техн. наук А. А. Воробьеву за внимательное руководство работой, а также кандидату техн. наук Г. А. Воробьеву и В. С. Дмитревскому за проверку и обсуждение статьи.

Литература

1. Calderwood J. H. and Cooper D. R., Proceedings of the Physical Society, London, **66** (Sec. B), 74, 1953.
2. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д., Журнал технической физики, 8, 295, 1938.
3. Hippel A. and Alger R. S., Physical Review, Lancaster (USA), **76** (Ser. II), 127, 1949.
4. Кучин В. Д., Температурная зависимость электрической прочности ионных кристаллов (настоящий сборник).
5. Физика диэлектриков, под редакцией Вальтера А. Ф., стр. 364, ГТТИ, 1932.
6. Вальтер А. Ф., Пробой твердых диэлектриков, стр. 12, ГТТИ, 1933.
7. Wagner K. W., Journal of the American Institute of Electrical Engineers, New York—Easton, **41**, 1034, 1922.
8. Фок В. А., Труды Ленинградской физико-технической лаборатории, Ленинград, 5, 52, 1928.
9. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д., Журнал прикладной физики, 5, 65, 1928.
10. Hippel A., Zeitschrift für Physik, Berlin, **98**, 580, 1935.
11. Frölich H., Simpson T. H., Electronics, **2**, 185, 1950.
12. Сканави Г. И., Физика диэлектриков, ГГТИ, 1949.
13. Hippel A., Physical Review, Lancaster (USA), **54**, 1096, 1938.
14. Воробьев А. А. и Калганов А. Ф., Изв. ТПИ, 91, 97, 1956.
15. Трубицын А. М., Диссертация, Томск, 1955.