

## ИОНИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ЖИЛАМИ\*

М. Н. ТРЕСКИНА

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной и кабельной  
техники)

В настоящее время в качестве изоляции силовых кабелей широкое применение находит полиэтилен. Электрическая прочность листового полиэтилена составляет 600—800 кВ/мм, в то время, как максимальная пробивная напряженность полиэтиленовой изоляции кабелей равна 20—90 кВ/мм. Одним из факторов, приводящих к такому значительному снижению электрической прочности полиэтилена, наложенного в качестве изоляции на червячных прессах, является наличие в слое изоляции газовых включений.

Полиэтилену присущ высокий коэффициент теплового расширения, в 9 и 13 раз превышающий коэффициенты теплового расширения алюминия и меди соответственно. Охлаждение наложенной на червячном прессе полиэтиленовой изоляции происходит с наружной поверхности слоя. Граница затвердевания перемещается от внешней поверхности изоляции к внутренним слоям, где при охлаждении вследствие усадки образуются поры. Причем, основное количество включений расположено на границе токопроводящая жила — изоляция. Размеры газовых пор различны и могут составлять от  $10^{-3}$  мм до 1 мм. Спустя некоторое время после опрессования давление в порах выравнивается с атмосферным [1].

При работе кабеля возникающие в газовых включениях напряженности электрического поля могут быть достаточными для ионизации газа во включениях. При этом на поверхности полиэтилена возникают необратимые изменения — разрушение полимера, сопровождающееся образованием газообразных и твердых веществ. Твердые вещества содержат повышенное количество углерода и поверхность газовой поры становится электропроводящей. Дальнейшее развитие ионизации может привести к «закорачиванию» некоторых пор, появлению глубоких раковин, в результате чего снижается электрическая прочность изоляции кабеля [2].

Поэтому в связи с малой короностойкостью и значительной пористостью полиэтиленовой изоляции для оценки надежности кабелей необходимо знание их ионизационных характеристик.

Трехжильные кабели с полиэтиленовой изоляцией на напряжения 1—6 кВ выполняются с секторными жилами без наличия экрана по жиле. В последние годы наметился переход от многопроволочных (М) к од-

\*) В работе принимали участие студенты ТПИ Омельченко Д. С., Шандра З. А.

нопроволочным (О) секторным жилам, что позволяет сократить в 4—5 раз потребность в оборудовании, в 9 раз в производственных площадях и в 10 раз повысить производительность труда при производстве кабелей [3].

Целью данной работы явилось исследование и сравнение ионизационных характеристик полиэтиленовой изоляции многопроволочных и однопроволочных неэкранированных секторных жил.

Для практически применяемых конструкций кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 6, 10 и 35 кВ в работе проведены расчеты по определению размеров минимальных газовых включений, в которых при приложении к изоляции линейного напряжения наступит ионизация (рис. 1). В работе приняты плоские поры, как наиболее опасные

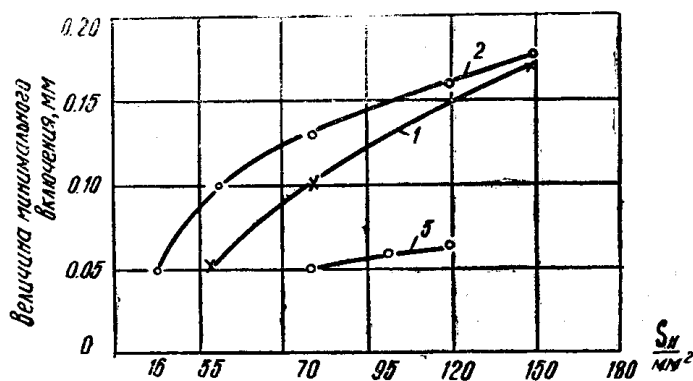


Рис. 1. Зависимость величины минимального включения от сечения токопроводящих жил для кабелей с полиэтиленовой изоляцией напряжением: 1—6 кВ, кабель с секторными жилами, 2—10 кВ и 3—35 кВ кабели с круглыми жилами

из возможных форм пор. Слой полиэтиленовой изоляции, содержащий газовое включение, можно рассмотреть как неоднородный двухслойный диэлектрик, если пора находится у жилы или у оболочки, и трехслойный диэлектрик, если пора находится в толще изоляции.

В радиальном электрическом поле напряженность в газовом включении толщиной  $\Delta$ , расположенном по радиусу  $r$ , определена по формуле

$$E_r = \frac{U}{r \epsilon_r \left[ \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{r}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{r + \Delta}{r} + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{r_2}{r + \Delta} \right]} \frac{\text{кВ}}{\text{мм}},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы по жиле и изоляции,

$\epsilon_r$  и  $\epsilon_n$  — диэлектрические проницаемости газа и полиэтилена.

Сравнение возникающих в порах  $E_r$  при различных  $\Delta$  с пробивной прочностью воздуха позволяет определить величину минимального включения [4]. Учитывая, что максимальные напряженности поля в изоляции возникают на поверхности жилы, где наибольшая вероятность образования газовых включений, необходимо дать анализ опасных пор, расположенных у токопроводящей жилы. Как видно из рис. 1, для кабелей с наименьшими допустимыми сечениями жил опасными с точки зрения возникновения в них ионизации являются поры толщиной 0,05 мм и выше. С увеличением сечения жил размер  $\Delta_{\text{мин}}$  возрастает. За счет секторных жил поры в изоляции кабеля на напряжение 6 кВ являются более опасными, чем в кабеле на 10 кВ.

Для исследования ионизационных характеристик использованы изолированные полиэтиленом толщиной 2 мм алюминиевые жилы сечением 70 мм<sup>2</sup>, выполненные на заводе «Камкабель». Из изолированных многопроволочной и однопроволочной жил нарезано по 20 образцов. На образцы длиной 1,8 м наносился в качестве электрода слой полупроводящей резины одинакового сопротивления.

Для устранения краевых эффектов на краях электродов делалась подмотка из невулканизированной изоляционной резины в виде муфты.

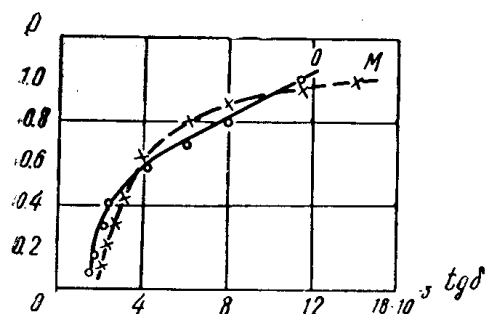


Рис. 2. Интегральная кривая распределения значений  $\operatorname{tg} \delta$  полиэтиленовой изоляции многопроволочных (М) и однопроволочных (о) секторных жил

Для сравнения однородности полиэтиленовой изоляции образцов проведено измерение  $\operatorname{tg} \delta$ . Как видно из рис. 2, в данной партии образцов имеет место значительный разброс  $\operatorname{tg} \delta$ . Для исследования выбраны образцы с небольшим разбросом значений  $\operatorname{tg} \delta$  ( $2 \cdot 10^{-3} \div 6 \cdot 10^{-3}$ ).

Измерения  $\operatorname{tg} \delta$ ,  $\operatorname{tg} \delta = f(U, t^\circ \text{C})$  проведены на мосте Р—525. Напряжение начала ионизации  $U_{\text{и}}$  и интенсивность ионизации  $J_{\text{и}}$  определены по мостовой схеме с помощью дифференциального метода [5]. Погрешность при определении напряжения начала ионизации составляла в среднем 10%.

Интенсивность ионизации  $J_{\text{и}}$  выражена в относительных единицах.

Для исследования температурной зависимости ионизационных характеристик, учитывая незначительную толщину изоляции, образцы, изогнутые в кольца диаметром 40 см, помещались в термостат. Ионизационные характеристики образцов до и после изгиба не изменялись. Выдержка образцов при заданной температуре перед измерением составляла 0,5 часа. На рис. 3 приведены зависимости  $\operatorname{tg} \delta$ ,  $E_{\text{и}}$  и  $J_{\text{и}}$  от температуры. Для всей партии образцов напряженность начала ионизации  $E_{\text{и}}$  при 20°С многопроволочных жил на 30—60% ниже  $E_{\text{и}}$  однопроволочных жил. Расчеты (табл. 1) показали, что при возникновении на изоляции 6-киловольтного кабеля линейного напряжения (аварийный

Таблица 1

Расчетные значения максимальных напряженностей поля в изоляции ( $E_{\text{макс}}$ ) в поре ( $E_{\Gamma}$ ), размера опасной поры ( $\Delta_{\text{мин}}$ ) в изоляции кабеля на напряжение 6 кв при сечении секторной жилы 70 мм<sup>2</sup>

| Параметры                                       | $U_{\text{рас}} = U_{\text{ф}} \cdot 1,15$ | $U_{\text{рас}} = U_{\text{л}}$ |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| $E_{\text{макс}}, \text{кв/мм}$                 | 1,98                                       | 2,97                            |
| $E_{\Gamma} = 2,3E_{\text{макс}}, \text{кв/мм}$ | 4,56                                       | 6,85                            |
| $\Delta_{\text{мин}}, \text{мм}$                | 0,32                                       | 0,10                            |

режим) будут ионизированы все поры толщиной 0,1 мм и выше. Для этих кабелей такие размеры пор не могут быть допущены.

Согласно полученным данным напряженность начала ионизации в изоляции многопроволочных жил составляет 1,5—2,4 кВ/мм, что соответствует размерам ионизируемых пор 0,14—0,09 мм по [2], а для однопроволочных жил  $E_{\text{н}} = 3,5—4,5$  кВ/мм, что соответствует размерам пор 0,06—0,045 мм. Следовательно, проволочность поверхности жилы приводит к появлению более крупных пор в полиэтиленовой изоляции жил М по сравнению с О. Большая интенсивность ионизации в изоляции жил М по сравнению с О, возможно, определяется большим количеством пор по сравнению с жилами О.

С повышением температуры замечено уменьшение  $E_{\text{н}}$  и увеличение  $J_{\text{и}}$  (рис. 3). В работах [4, 6] показано возрастание напряжения начала ионизации при нагреве полиэтиленовой изоляции кабелей, имеющих по жилам экраны, что объяснено уменьшением величины газовых включений, увеличением давления в них при температурном расширении полиэтилена. Уменьшение  $E_{\text{н}}$  при нагреве изолированных секторных жил без экрана по жиле можно объяснить более значительным тепловым расширением полиэтилена по сравнению с алюминием и увеличением размеров и количества пор на границе жила—изоляция. С этим согласуется увеличение интенсивности ионизации с повышением температуры, более значительное для жил М (рис. 3).

Для исследования влияния длительного воздействия электрического поля на ионизационные характеристики изолированных М и О жилы были подвергнуты ионизационному старению. Образцы в течение 500 часов находились под напряжением промышленной частоты, на 15% превышающим напряжение начала ионизации. По истечении определенного времени производились измерения  $\text{tg} \delta = f(U)$ ,  $U_{\text{н}}$ ,  $J_{\text{и}}$  (рис. 4).

С увеличением длительности ионизационного старения происходит возрастание  $\text{tg} \delta$  изоляции, более значительное для М. Ионизация газовых включений в полиэтилене может вызвать окислительные процессы, деструкцию цепей полиэтилена, образование карбонильных групп и радикалов. Указанные процессы явились причиной увеличения емкости образцов в процессе ионизационного старения: емкость жил М увеличилась на 10—16%, жил О — на 5—8%. Следовательно, в процессе ионизационного старения происходит увеличение диэлектриче-

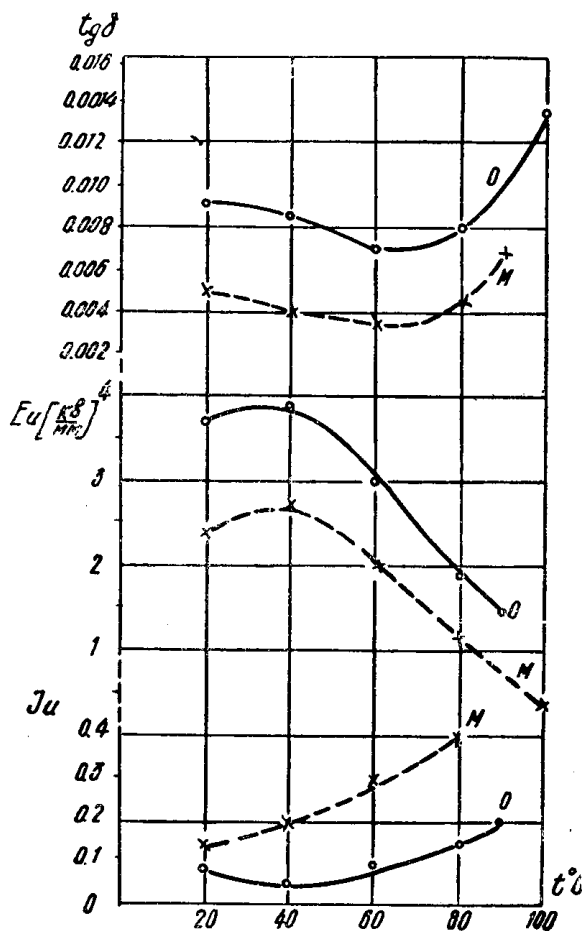


Рис. 3. Температурная зависимость  $\text{tg} \delta$ ,  $E_{\text{н}}$ ,  $J_{\text{и}}$  полиэтиленовой изоляции многопроволочных (М) и однопроволочных (О) секторных жил

ской проницаемости и  $\operatorname{tg} \delta$  полиэтиленовой изоляции, более значительное для жил М по сравнению с жилами О.

В течение 125 часов ионизационного старения замечено увеличение  $E_u$  и уменьшение  $J_u$  (рис. 4), что возможно связано с увеличением давления в порах в начальной стадии ионизации. Наблюдается некоторое ухудшение ионизационных характеристик жил О в течение 60 часов старения. Для жил О характерны высокие значения  $E_u$ , малые размеры пор, а, следовательно, значительные интенсивности ионизации в этих порах [2]. Последнее, возможно, является причиной бы-

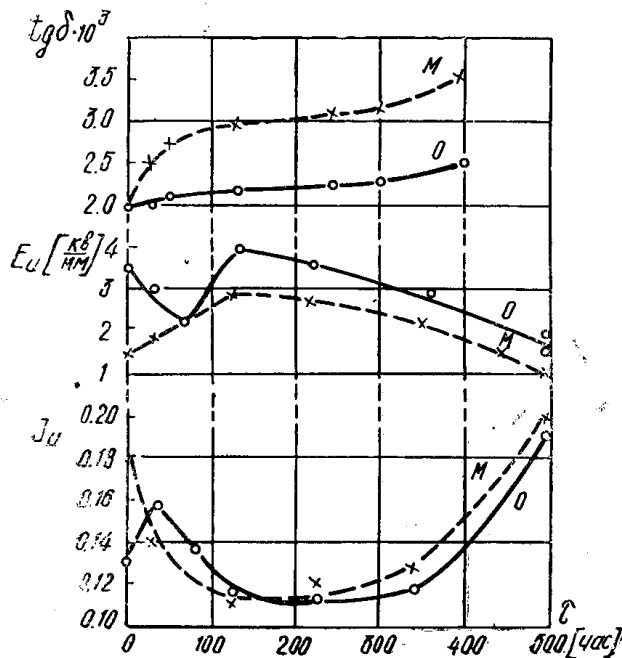


Рис. 4. Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$ ,  $E_u$ ,  $J_u$  полиэтиленовой изоляции многопроволочных (М) и однопроволочных (О) секторных жил от времени ионизационного старения

строго «закорачивания» мелких пор. Поэтому уменьшение  $E_u$  и увеличение  $J_u$  жил О в первые 60 часов старения можно объяснить «закорачиванием» мелких пор.

При длительной ионизации происходит разрушение полиэтилена (эрозия), увеличиваются размеры пор. С другой стороны «закорачивание» некоторых пор приводит к местному увеличению напряженности поля, что облегчает монизацию других пор. С этими причинами, возможно, связаны уменьшение  $E_u$  и увеличение  $J_u$  при длительном ионизационном старении полиэтиленовой изоляции (рис. 4).

Исследованные изолированные жилы явились моделью жил кабеля

для напряжением 6 кВ. Учитывая наложение изоляции толщиной 3,5 мм, можно предполагать, что при равнозначных условиях ионизационное старение в кабеле будет протекать более интенсивно. Для оценки изменения электрической прочности полиэтиленовой изоляции в процессе ионизационного старения исследование проведено на плоских образцах полиэтилена толщиной 0,6 мм высокого давления, одинаковой марки с изоляцией жил. Поверхность образца подвергалась ионизации, происходящей в искусственной поре при напряжении, на 15% превышающем напряжение начала ионизации. Пробой образцов проводился при напряжении промышленной частоты при электродах плоскость — плоскость в трансформаторном масле.

Полученные средние значения пробивной прочности полиэтилена приведены в табл. 2.

В процессе ионизационного старения происходит уменьшение электрической прочности полиэтилена: в течение 200 часов, снижение  $E_{пр}$  составило 25%.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением сечения токопроводящих жил уменьшается величина минимальной поры, при которой возможна ионизация. Для на-

дежной (с точки зрения отсутствия ионизации в газовых порах) работы изоляции кабелей напряжением 1,6 и 35 кВ размеры пор, расположенных на границе жила — изоляция, не должны превышать определенных значений. Вследствие малых радиусов закруглений секторных жил и отсутствия экранов по жилам опасность возникновения ионизации в изоляции кабелей напряжением 6 кВ большая, чем в изоляции кабелей на 10 кВ, и величины минимальных пор в изоляции кабеля на 6 кВ меньше, чем в кабеле на 10 кВ.

Таблица 2

Изменение электрической прочности полиэтилена ВД  
со временем ионизационного старения

| Продолжительность старения,<br>час         | 0  | 50 | 100 | 150 | 200 |
|--------------------------------------------|----|----|-----|-----|-----|
| Электр.<br>прочность                       |    |    |     |     |     |
| $E_{пр}$ (среднее из 10 то-<br>чек), кВ/мм | 45 | 44 | 42  | 39  | 34  |

2.  $\operatorname{tg} \delta$  полиэтиленовой изоляции кабеля одной длины не является постоянной величиной, колебания значений  $\operatorname{tg} \delta$  доходят до одного порядка.

3. Напряженность начала ионизации в изоляции однопроволочных жил на 30—60% выше  $E_{ц}$  многопроволочных жил, а интенсивность ионизации меньше, чем  $I_{ц}$  в изоляции жил М.

4. С повышением температуры от 20°C до 80°C происходит уменьшение на 60% напряженности начала ионизации и на 50—170% увеличение интенсивности ионизации в полиэтиленовой изоляции секторных жил без экрана по жиле. Причем, больший процент увеличения  $I_{ц}$  относится к изоляции многопроволочных жил.

5. При длительном ионизационном старении увеличивается  $\operatorname{tg} \delta$  полиэтиленовой изоляции. Увеличение  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции жил М в 3 раза больше, чем жил О.

6. В процессе ионизационного старения в течение первого периода увеличивается напряженность начала ионизации, уменьшается интенсивность ионизации. При длительном ионизационном старении наблюдается уменьшение  $E_{ц}$  и увеличение  $I_{ц}$ . В процессе ионизационного старения происходит уменьшение электрической прочности полиэтиленовой изоляции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мирзоев. Некоторые вопросы технологии изготовления силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией. «Применение пластмасс в кабельной промышленности», ВНИИ ЭМ, 1964.
2. А. Н. Перфилов. Ионизация воздушных включений в полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей. Вестник электропромышленности, 12, 1961.
3. С. А. Пархомович. Некоторые вопросы экономии кабельного производства. Вестник электропромышленности, 6, 1962.
4. Р. В. Кулакова. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией. ГЭИ, 1963.
5. Ф. Х. Крейгер. Обнаружение внутренних разрядов, в частности, в высоковольтных кабелях. Кабельные линии высокого напряжения. Сб. переводов, вып. 2, ГЭИ, 1959.
6. Разработка силового кабеля на напряжение 10 кВ с полиэтиленовой изоляцией. Отчет НИИ КП, № 635—57.