

Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: Рассматриваются проблемные вопросы состояния изоляции силовых кабельных систем (СКС) на основе разработки и развития методов неразрушающего контроля. Установлены основные компоненты, разрушающие изоляцию СКС. Предлагается аналитический метод оценки процессов окисления целлюлозы с определением наиболее вероятного. Приведены расчеты термодинамических процессов окисления целлюлозы. Использование предложенного подхода изучения основных процессов разрушения изоляции позволяет более детально представить предпосылки развития частичных разрядов (ЧР) в изоляции и определить необходимые мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции изоляции силовых кабелей.

Ключевые слова: изоляционный материал, термодинамический процесс, кабельная система, прогнозирование.

Введение

В процессе эксплуатации СКС с бумажно-масляной изоляцией (БМИ), подвергаются различным видам механических, тепловых и электрических напряжений [1-5]. Основными причинами деградации изоляции являются:

- Тепловое напряжение (условия нагрузки);
- Химическая коррозия (воздействие воды, соли, масла и загазованности);
- Внешнее воздействие (загрязненная внешняя среда, доступ воды).
- Механическое усилие (вытягивание, изгиб, осадка фундамента);
- Воздействие электрического напряжения (перенапряжение, частичные разряды);

Химическая деградация будет вызывать изменения в механических свойствах полимерной изоляции. Результат химической деградации может быть разбиение длинных полимерных цепей, процесс, известный как деполимеризации. Скорость образования свободных радикалов зависит от температуры, количества кислорода и присутствие радиации.

В работе предложен термодинамический подход выявления основных процессов разрушения изоляции. На основании термодинамического расчета процессов окисления, определен основной компонент разрушающий изоляцию.

Деструкции неоднородных изоляционных материалов. Одним из диэлектрических материалов является бумага рис.1,а имеющая очень высокую кратковременную и длительную электрическую прочность (500-600 кВ/см в поперечном направлении и $E_{раб}=2,3$ кВ/см – рабочая напряженность).

Одним из частных случаев неоднородных диэлектриков является диэлектрик, содержащий газы включения (поры). Наличие наиболее часто встречаемых неоднородностей в диэлектрике являются газы включения (поры) [1]. Внешние напряжения могут резко ускорить деградацию изоляционного материала. Промежутки между бумажными полосками в изоляции СКС заполнены маслом, рис.1,б которое так же может изменять свои свойства.

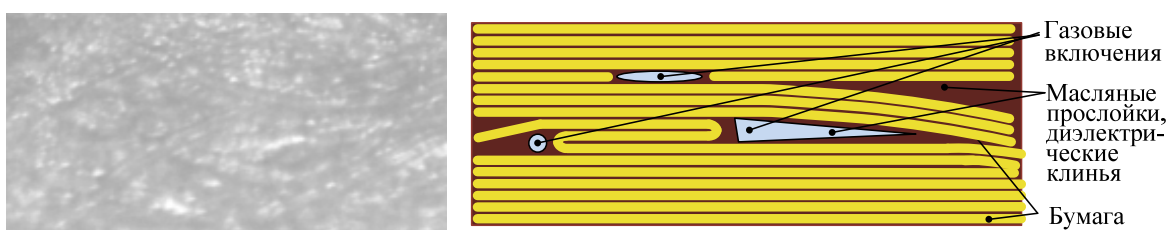


Рис.1. а – поверхность бумаги, б – структура фрагментов бумажно-масляной изоляции

Масляные прослойки могут иметь протяженный вид или вид диэлектрических клиньев рис.1,б. В ходе деструкции изоляционных материалах кабелей получают такие газы как угарный (CO), углекислый (CO_2), небольшое количество водорода (H_2), метана (CH_4), этана (C_2H_6) и этилена (C_2H_4).

Для дефектов термического характера наиболее характерны следующие газы:

- этилен (C_2H_4) – нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше $600\text{ }^\circ\text{C}$;
- метан (CH_4) – нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ или нагрев масла и бумажно-масляной изоляции, сопровождающийся разрядами;
- этан (C_2H_6) – нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур $300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$;
- окись (CO) и двуокись углерода (CO_2) – старение и, как следствие, увлажнение масла и изоляции;
- двуокись углерода (CO_2) – нагрев твердой изоляции.

Эти газы вытесняют масло и заполняют области между бумажными полосками, образуя газовые полости рис.1,б. Газовые пузырьки диаметром от 1 мм и более являются явным дефектом изоляции. Напряженность электрического поля внутри полости газа выше, чем в окружающей изоляции. Когда его уровень превышает предельное значение, происходит ЧР, что приводит к образованию новых полостей, заполненных проводящими частицами, такими как углерод.

При воздействии рабочего напряжения в изоляции, не имеющей явных дефектов, можно определить среднюю напряженность электрического поля

$$E_{\text{макс}} = (\varepsilon_{\delta} / \varepsilon_{\text{м}}) \cdot E_{\text{ср}},$$

где ε_{δ} , $\varepsilon_{\text{м}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость бумаги и масла

В масляных прослойках и масляных диэлектрических клиньях наибольшая напряженность поля $E_{\text{макс}}$ составляет $E_{\text{макс}} = 1,7E_{\text{ср}}$ или $E_{\text{макс}} = (3,4 \div 6,8)$ кВ/мм.

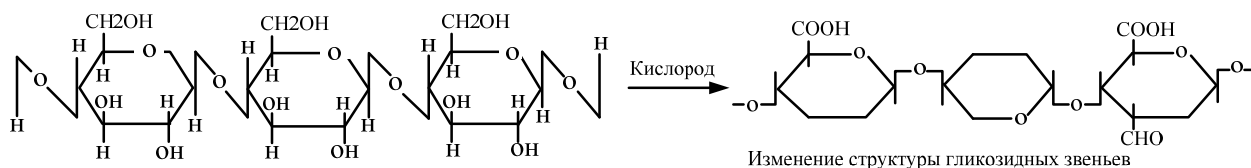
Следовательно, масляные прослойки имеют наибольшую напряженность электрического поля.

В кабелях и их гарнитурах в слоистой и пропитанной бумажной изоляции, на сухих участках, появляются локально распределенные ЧР [7],

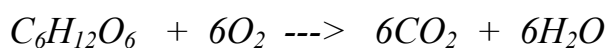
которые снова могут гаситься вследствие перемещения пропиточной массы при изменении термического режима работы кабеля в зависимости от его нагрузки [9]. Равным образом действуют обугливания (карбонизация) вследствие воздействия ЧР [7].

Термодеструкция изоляции. При эксплуатации кабеля в изоляции происходит три различных механизма деградации: гидролитического разложения, окисления и термической деструкции. Термодеструкция или пиролиз целлюлозы в отсутствие окислителей и влаги приводит к разрыву гликозидных связей и открытию колец глюкозы. Влажность является самым мощным понижающим агентом бумажной изоляции [8]. В зависимости от процесса деградации вода образуется или потребляется, например, формирование уксусной кислоты будет потреблять воду. Пиролиз может происходить без доступа кислорода и влаги. Во время нормальной работы, при температуре ниже 140 °С, процессы пиролиза не достигают большого значения [8]. На рисунке 2 показаны различные процессы деградации и их основные продукты. Процесс окисления можно разбить на несколько стадий:

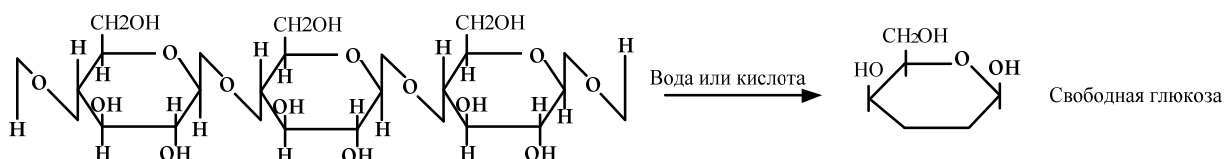
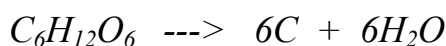
I – стадия окисления (начальная):



II – стадия частичного окисления:



III – стадия полного окисления:



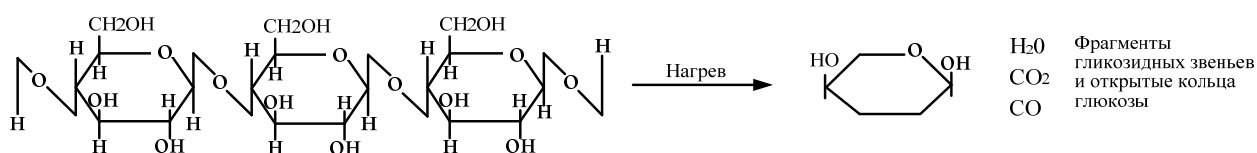


Рис.2. – Процессы деградации целлюлозы и их основные продукты

Во время деградации уменьшается степень полимеризации изолирующей бумаги. Степень полимеризации новой бумаги составляет около 1100 до 1500, а значение менее 500 свидетельствует о значительном термическом разложении [8].

Агрессивным компонентом, наиболее вероятно встречающимся при эксплуатации СКС, является кислород, так как его присутствие наблюдается в любой среде. Затем при наличии некоторых повреждений, возможно взаимодействие с водой и кислотами, и при существенном повреждении создаются благоприятные условия для возникновения частичных микро разрядов, повышается температура среды, которая приводит к окончательному местному разрушению изоляции кабеля. Во время нормальной эксплуатации [11, 12] температура кабеля должна быть ниже 90 °С в то время как в условиях неисправности кабели могут использоваться при температурах 120 °С и более. Основным компонентом картона является целлюлоза, мономером которой служит молекула глюкозы, рис. 3.

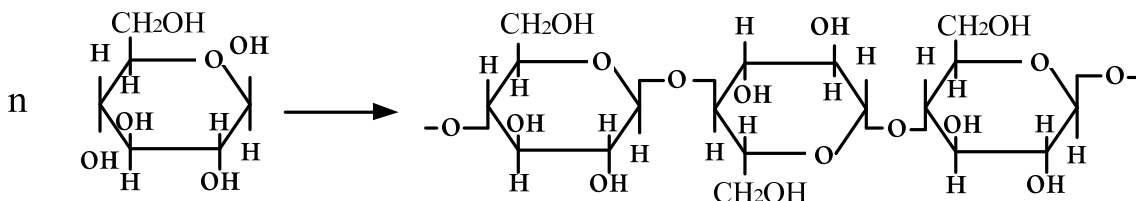
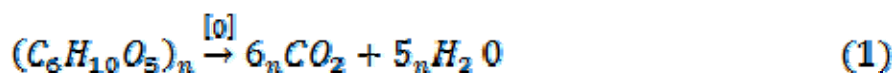


Рис.3. – Полимеризация глюкозы

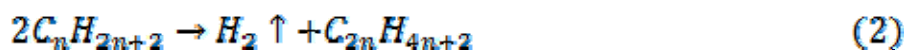
Термодинамический расчет процессов разрушающих изоляцию.
 Наличие воздушных включений в кабелях с вязкой пропиткой (максимально до 3 % по объему), приводит к окислению клетчатки. В этой стадии при

температурах 60-70 °С происходит окисление первичных гидроксильных групп до альдегидных $-C \begin{smallmatrix} O \\ \parallel \\ H \end{smallmatrix}$ или до карбоксильных $-C \begin{smallmatrix} O \\ \parallel \\ OH \end{smallmatrix}$.

Дальнейшая стадия окисления связана уже с деструкцией молекул клетчатки (целлюлозы). Последняя стадия окисления завершается полным разложением клетчатки на окись углерода и воду:

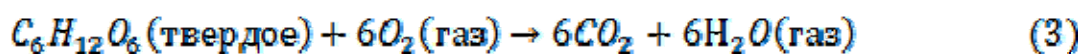


При наличии ЧР в воздушных включениях в изоляции кабелей с вязкой пропиткой происходит разложение масла с выделением газов (преимущественно водорода) и твердого вещества («Х-воск»). Для метановых углеводородов реакция идет следующим образом:



жидкость газ твердое вещество

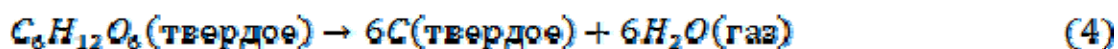
Регулирующим фактором является наличие доступа кислорода и повышенной температуры. Если имеется доступ кислорода, то разрушение изоляции происходит ускоренным темпом из-за образования большого количества газов, так как из 1 моль молекулы глюкозы образуется 12 молекул газов (оксид углерода и вода):



Выделение газов увеличивает интенсивность ЧР с переходом их в критические с величиной заряда $q_{PD} \approx 10^{-9} - 10^{-7}$ Кл, что приводит к локальному повышению температуры и возрастанию термической деструкции целлюлозы (клетчатки). Например, под действием электрического поля порядка 30 кВ/мм и температуры 50 °С происходит разложение пропитанной бумаги с выделением следующих газов: $H_2 - 55\%$,

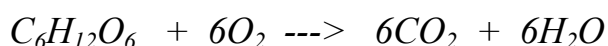
CO_2 – 36%, CO – 9%. Проникновение влаги в БМИ существенно ускоряет процесс деструкции (увеличение проводимости, рост температуры и т.д.).

В случае отсутствия кислорода и при наличии повышенной температуры процесс окисления идет до образования углерода, при этом объем образующихся газов в 2 раза меньше



Количество выделенного газа влияет на масштабы механического разрушения изоляции, а количество образующегося углерода в несколько раз повышает проводимость масла.

Термодинамический расчет процесса окисления. Рассчитаем, какое окисление целлюлозы термодинамически более вероятно, до углерода или до полного окисления. В случае полного окисления глюкозы [6]



значения энтальпий образования веществ, участвующих в реакции, соответственно равны [3]: -1274,5 кДж/моль; 0 кДж/моль, -393,51 кДж/моль; -241,84 кДж/моль. Из 2-го следствия закона Гесса:

$$\Delta H = \sum n_{пр} \Delta H_{298}^{\circ} \text{обр.прод.} - \sum n_{исх} \Delta H_{298}^{\circ} \text{обр.исх.}$$

где $n_{пр}$, $n_{исх}$ – стехиометрические коэффициенты продуктов реакции и исходных веществ, находим изменение энтальпии в ходе этого процесса, оно равно -2537,6 кДж.

Значения энтропий для участников реакции записываются с такими значениями [3]: 212 Дж/мольК; 205,03 Дж/мольК; 213,8 Дж/мольК; 188,74 Дж/мольК. Расчет энтропии химического процесса произведем по формуле:

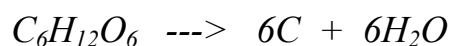
$$\Delta S = \sum n_{пр} \Delta S_{298}^{\circ} \text{обр.прод.} - \sum n_{исх} \Delta S_{298}^{\circ} \text{обр.исх.}$$

Изменение энтропии химической реакции равно 923,06 Дж/К.

Изменение изобарно-изотермического потенциала вычисляем по формуле:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Подставим вычисленные значения термодинамических величин, температуру примем равной 393 К, получим значение $\Delta G_1 = -2928.1 \text{ кДж}$. Проведем аналогичные вычисления для реакции неполного окисления глюкозы:



Получим изменение энтальпии этого процесса, равное $-176,54 \text{ кДж}$, изменение энтропии равно $954,88 \text{ Дж/К}$, изменение изобарно-изотермического потенциала получим равным $\Delta G_2 = -580.45 \text{ кДж}$, табл.1.

Таблица №1

Результаты расчета процесса окисления

Реакция		Значение
1	Изменение энтальпии	-176,54 кДж
2	Изменение энтропии	954,88 Дж/К
3	Изменение изобарно-изотермического потенциала	$\Delta G_2 = -580.45 \text{ кДж}$

Сравнив полученные значения ΔG_1 и ΔG_2 изобарно-изотермических потенциалов (энергии Гиббса) этих процессов, делаем вывод: так как значение изобарно-изотермического потенциала процесса полного окисления глюкозы (1) приблизительно в пять раз меньше изобарно-изотермического потенциала реакции с образованием углерода (2), как продукта неполного окисления глюкозы, то первый процесс более вероятен, и с позиции термодинамики, более выгоден. Следовательно, при длительной эксплуатации [9] в изоляционных материалах, наиболее вероятным будет процесс полного окисления целлюлозы, с образованием большого объема газов, которые будут способны механически разрывать изоляционные слои [10, 11, 12]. В свою очередь, такое механическое нарушение целостности изоляции приведет к увеличению поверхности соприкасающихся слоев, что в геометрической прогрессии увеличит адсорбцию влаги и других частиц на поверхности изоляции и значительно уменьшит срок эксплуатации кабеля в целом. Ослабление механических свойств неизбежно приведет к отказу

кабеля при коротких замыканиях. Расчеты показывают, что деградация бумаги в основном проходит в сторону ухудшения механических свойств, электрические свойства меняются незначительно. Таким образом, выделение газов увеличивает интенсивность ЧР с переходом их в критические с величиной заряда $q_{PD} \approx 10^{-8} - 10^{-7}$ Кл приводит к локальному повышению температуры и возростанию термической деструкции клетчатки. Например, под действием электрического поля порядка 30 кВ/мм и температуры 50 °С происходит разложение пропитанной бумаги с выделением следующих газов: H_2 –55%, CO_2 –36%, CO –9%. Проникновение влаги в бумажно-масляную изоляцию существенно ускоряет процесс деструкции (увеличение проводимости, рост температуры и т.д.) [11, 12].

Заключение. Приведены термодинамические расчеты процессов окисления целлюлозы с возможностью определения наиболее вероятного. Определено, что основными компонентами, разрушающими изоляцию, являются не углерод, как предполагается в [8], (хотя его образование в реальных системах не исключено), а газы, образующиеся при полном окислении. Изучена электрическая и механическая прочность бумажно-масляной изоляции силовых кабелей. Результаты выполненных исследований позволяют более детально представить предпосылки к развитию ЧР в изоляции и определить необходимые мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции изоляции кабелей.

Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.



Литература

1. Dubyago M.N. Mathematical description of interaction of the elements in the power network system. Applied Mechanics and Materials, 2014. №448-453. pp 2455-2460.
 2. Благородова Н.В., Филимонов Е.В., Старостенков А.С. Использование современных огнезащитных составов для ремонта огнезащитных кабельных покрытий с истекшим сроком эксплуатации. Инженерный вестник Дона, 2012. №4 (часть 2) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1290.
 3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: учебник для вузов, 1985. С.304
 4. Королев А.Н., Н.К. Полуянович, В.В. Петров. Импедансная спектроскопия нанокompозитных газочувствительных материалов: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. 200 с.
 5. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий: учебное пособие. СПб.: Издательство "Лань", 2012. 400с.
 6. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. The Method of Nondestructive Testing and Prediction of Evolving Insulation Defect of Power Line Cable. International SAUM Conference. Proceedings/ XI Triennial November, 2012, pp.418-422.
 7. Дубяго М.Н. Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения. Известия ЮФУ, 2013. №11. С. 201-207
 8. Мищенко К.П. и Равделя А.А. Краткий «Справочник физико-химических величин», 1974. С. 183
 9. М.Н. Полуянович, Н.К. Полуянович Микроконтроллерная система компенсации реактивной мощности. Инженерный вестник Дона, 2007. №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/26
-

10. Пивнев В.В., Басан С.Н. Математическое моделирование нелинейных характеристик элементов применительно к задаче реализации двухполюсников с заданными нелинейными зависимостями // Инженерный вестник Дона, 2016. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3857

11. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пшихопов В.Х. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий. Известия ЮФУ. Технические науки, 2015. №7 (168). С.230-237

12. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory. Materials and Mechanics. 2016. № doi: 10.1142/ 9789813146587 _0032.

References

1. Dubyago M.N. Applied Mechanics and Materials, 2014 №448-453. pp 2455-2460.

2. Blagorodova N.V., Filimonov E.V., Starostenkov A.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012.1290.

3. Bogorodickij N.P., Pasyнков V.V., Tareev B.M. Jelektroteh-nicheskie materialy: uchebnik dlja vuzov. [Electrotechnical materials: the textbook for higher education institutions]. 1985. С.304

4. A.N. Korolev, N.K. Polujanovich, V.V. Petrov. Impedansnaja spektroskopija nanokompozitnyh gazochuvstvitel'nyh materialov: uchebnoe posobie. [Impedance spectroscopy of nanocomposite gas-sensitive materials]. Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2010. 200 p.

5. Polujanovich N.K. Montazh, naladka, jekspluatacija i remont sistem jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij [Impedance spectroscopy of nanocomposite gas-sensitive materials]: uchebnoe posobie. SPb.: Izdatel'stvo "Lan", 2012. 400 p.



6. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. The Method of Nondestructive Testing and Prediction of Evolving Insulation Defect of Power Line Cable. International SAUM Conference. Proceedings. XI Triennial November, 2012. pp. 418-423
7. Dubjago M.N. Izvestija JuFU, 2013. №11. pp. 201-207
8. Mishhenko K.P. i Ravdelja A.A. Kratkij «spravochnik fiziko-himicheskikh velichin» [Short "reference book of physical and chemical sizes"]. 1974. С. 183
9. M.N. Polujanovich, N.K. Polujanovich Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2007. №2. С.77-86. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/26
10. Pivnev V.V., Basan S.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3857.
11. Dubjago M.N., Polujanovich N.K., Pshihopov V.H. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki, 2015. №7 (168). pp.230-237
12. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V. Prediction deterioration of insulation process based on partial discharge thermal fluctuation theory. Materials and Mechanics, 2016. №doi: 10.1142/ 9789813146587 _0032.