

Физико-химические аспекты газостойкости изоляционных жидкостей к воздействию электрических разрядов

В.Г.Аракелян, кандидат химических наук, доктор технических наук,
Всероссийский электротехнический институт, Россия
arakelva@mtu-net.ru

Введение

Стойкость к газообразованию является важным свойством изоляционной жидкости, определяющим надежность и долговечность высоковольтной маслопропитанной изоляции. Как правило, газообразование является результатом одновременного эксплуатационного воздействия электрических, тепловых и механических факторов. Во всех случаях газообразование связано с химическими изменениями. В углеводородной изоляционной жидкости образование водорода и легких углеводородных газов сопровождается образованием полимерных и конденсированных структур. Неизбежное присутствие растворенного в изоляционной жидкости кислорода определяет образование окислов углерода, воды и других кислородных органических соединений. Любое энергетическое воздействие на изоляционную жидкость при его достаточной интенсивности может привести к образованию газов – результату старения изоляционной жидкости. Поскольку образование газов в изоляционной жидкости представляет определенную опасность для нормальной эксплуатации оборудования, были предложены методы оценки способности жидкости к газообразованию (английское "gas-sing") или в противоположном смысле – "газостойкости" изоляционной жидкости. Особое внимание уделяется газообразованию от частичных разрядов (ЧР), сопровождающих нормальную работу высоковольтного оборудования. Цель данной статьи – описать физико-химические аспекты данного явления и на этой основе предложить новый метод оценки газостойкости изоляционных жидкостей.

Методы определения газостойкости

Существующие в настоящее время методы оценки стойкости жидкости к газообразованию можно разделить на две группы.

К первой группе относится разработанный еще для кабельных масел модифицированный метод Пирелли [1], в котором разряды создаются над поверхностью изоляционных жидкостей и затрагивают только пары изоляционной жидкости. Создание этих методов было важным шагом на пути оценки изоляционных жидкостей, и не случайно эти методы были приняты в качестве международных стандартов [2].

Вторая группа методов оценки стойкости изоляционных жидкостей к газообразованию использует такие типы испытательных ячеек, в которых электрические разряды создаются непосредственно в жидкости и имитируют дефекты, имеющие место при эксплуатации электрооборудования. При использовании методов второй группы такие использовавшиеся ранее и не слишком ясные понятия как "газопоглощающая" или "газовыделяющая" жидкость полностью утрачивают какой-либо смысл. Энергетическое воздействие на изоляционную жидкость всегда приводит к образованию газов, которые по условиям эксперимента могут быть растворены в изоляционной жидкости или выделиться из нее в газообразном состоянии. В связи с этим, единственным и точным определением является: "стойкость жидкости к газообразованию" или в несколько вульгаризованном виде "газостойкость".

Доказано [3], что разрушения маслопропитанной изоляции пропорциональны энергии разрядов. В качестве критерия оценки стойкости изоляционной жидкости к газообразованию принимается величина, равная количеству газообразных продуктов разложения изоляционной жидкости, образующихся в объеме испытываемой жидкости при рассеянии в ней одного джоуля энергии разряда [4]. Эта величина получила название коэффициента газообразования.

Очевидно, что для определения коэффициента газообразования жидкости следует рассматривать исключительно вариант воздействия разряда непосредственно на жидкость, т.е. разряд в чисто масляном промежутке без газовых включений.

Сообщения разных авторов

Здесь приводятся несколько работ общего характера, определяющих направления химических превращений изоляционной жидкости под действием разрядов, и некоторые работы, из которых можно извлечь количественные данные о рассматриваемых явлениях. Публикация МЭК 60599 (1999) суммирует и обобщает сведения о минеральном масле, в том числе и о влиянии разрядов на его разложение, но не прибавляет знаний в этом вопросе.

О химических явлениях в изоляционных жидкостях, сопутствующих образованию газов, дают представление работы [5] и [6]. Авторы отметили, что механизм образования олефиновых полимеров подобен тому, который наблюдается в плазмохимии, т.е. обусловлен рекомбинацией СН-фрагментов. Позже, авторы [6] подтвердили, что электрические воздействия на изоляционное масло (корона в газовой фазе, искровой разряд, дуговой разряд) легко идентифицируются химико-аналитическими методами. ЧР или искровой разряд в самом масле не образует полимеров и не производит значительных структурных изменений. Сильные искровые разряды и дуги сопровождаются образованием насыщенных соединений (не имеющих полосы поглощения в ультрафиолете) с малыми размерами молекул. Общее содержание ароматических соединений снижается под действием дуги, окисления и коронного разряда в газовой фазе.

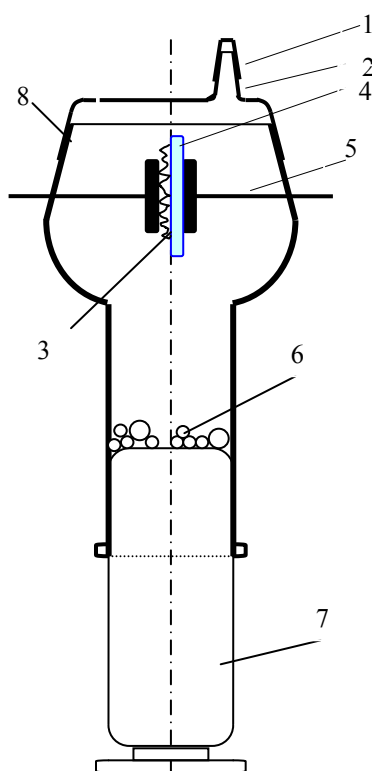
Кучинский [7] характеризует газообразование под действием электрических разрядов следующим образом. Слабые частичные разряды характеризуются малым температурным воздействием и продуцируют в основном водород с добавками метана, окиси и двуокиси углерода. Искровые разряды в масло-барьерной изоляции продуцируют газ, содержащий большое количество водорода, ацетилен, метана и окиси углерода. Дуга в масле продуцирует до 60-80 % по объёму водорода, 10-25 % ацетилен, 1,5-3,5 % метана и до 2% этана.

Борси и другие [8, 9] выполнили исследование газообразования минерального масла Shell Diala D и эфирной жидкости Midel 7131. Частичные разряды в жидкостях инициировались в электродной системе игла-плоскость при напряжении переменного тока 35 кВ с промежутком в 60 мм и 70 кВ с промежутком 240 мм. Искровой разряд инициировался генератором Маркса по мере накопления зарядного напряжения от 125 до 360 кВ в той же электродной системе, а дуговой разряд был реализован в стандартных электродах с промежутком 2 мм при 40 кВ переменного тока. Время действия дуги определялось включением и отключением напряжения. Регулировка выполнялась так, чтобы обеспечить энергию единичного разряда 125 или 250 мДж. При сравнительно высокой мощности энергетического воздействия образующиеся газы не успевали раствориться в изоляционной жидкости, пузырьки поднимались вверх и собирались в бюретке для измерения. Собранные газы и изоляционная жидкость анализировались газохроматографически.

Поскольку авторы не представили результаты в виде общего объема образовавшихся газов и не предоставили возможности для такого расчета, при выборке данных можно опереться на результаты при малом энергетическом воздействии, когда все газы успевают полностью раствориться. Можно также воспользоваться данными при быстром выделении газов из жидкости, количество которых определяется непосредственным измерением объема. Авторы не включили в расчет окислы углерода, вероятно полагая, что эти продукты не являются результатом электрического воздействия, хотя изоляционные жидкости до опыта насыщались воздухом. Авторы также не учли собственные реакции в изоляционных жидкостях, протекающие с образованием и последующей переработкой газов за счет теплового воздействия [10], хотя эксперименты выполнялись при 80 °С и длительность некоторых экспериментов достигала 1000 часов. Выбранные из графиков результаты представлены далее в таблице 2.

Ооммен сообщает [11], что газообразование в дуговом разряде в изоляционных жидкостях на основе растительных масел составляет одну четвертую от газообразования в минеральных маслах.

Исследование газообразования минерального и касторового масла под действием ЧР представлено в [12, 13]. Особое внимание было уделено определению характеристик частичного разряда [14]. Регистрации и расчету подлежали: число импульсов, суммарный заряд, средний ток, кажущийся заряд, частота поступления импульсов, средняя мощность импульсов и общая энергия разрядов. Качественный и количественный состав образующихся газов устанавливается газохроматографическим методом. Конструкция испытательной ячейки приведена на рис. 1. Основой конструкции является стеклянный медицинский шприц на 100 мл. Система электродов располагалась в головной части устройства и состояла из высоковольтного электрода, к которому прикладывалась фольга специальной конфигурации – "звездочка", прижатая к стеклянному экрану толщиной 2,5 мм. Острые кромки "звездочки" формировали скользящие разряды в масле на поверхности стеклянного экрана. Поджатие "звездочки" к экрану регулировалось пружиной. Для перемешивания жидкости с целью ускорения растворения образующихся газов и равномерного распределения их по всему объему масла в шприце размещали по несколько стеклянных шариков диаметром 8-10 мм. Ячейка одновременно представляла собой высоковольтное устройство для внедрения электрической энергии в изоляционную жидкость и пробоотборное устройство для выполнения газохроматографического анализа изоляционной жидкости. Подготовка эксперимента заключалась в сушке и дегазации изоляционной жидкости. При расчете объемов образовавшихся газов учитывалась та часть газов, которая уходила на анализ вместе с пробой масла.



В таблице 1 приведены условия выполнения опытов в чисто масляном промежутке и экспериментальные результаты, полученные при исследовании минерального масла ГК и касторового масла (технического, медицинского и индийского медицинского).

В таблице 1 приведены условия выполнения опытов в чисто масляном промежутке и экспериментальные результаты, полученные при исследовании минерального масла ГК и касторового масла (технического, медицинского и индийского медицинского).

Рисунок 1. Испытательная ячейка с масляным промежутком.

1 – колпачок, 2 – пробоотборный штуцер, 3 – фольга, 4 – стеклянный экран, 5 – электроды, 6 – стеклянные шарики, 7 – поршень шприца, 8 – шлиф, стягиваемый пружинами.

Таблица 1. Опыт в ячейке с чисто масляным промежутком, напряжение 16 кВ, режим непрерывный, температура 20 °С.

Изоляционная жидкость	Средний кажущийся заряд, пКл	Частота следования импульсов, имп/с	Внедренная энергия, E, Дж	Средняя мощность, мкВт	Общий объем газов, V, мкл	Среднее значение ($\Sigma V/\Sigma E$), мкл/Дж
Минеральное масло	437	3	1,24	21,7	206,4 ^{*)}	166 ^{*)} (138 ^{***)} ; 136 ^{**)}
Касторовое масло	техн.	586	3,5	8,04	57,6 ^{**)}	7,2 ^{**)}
	мед.	453	33	8,96	407,6 ^{**)}	45 ^{**)}
	инд.	731	12	28,84	805,6 ^{**)}	28 ^{**)}

^{*)} Все компоненты; ^{**)} без CO и CO₂; ^{***)} без CO₂

В [15] приведены значения удельного газообразования при исследовании газостойкости минеральных масел разных марок при ЧР в масле.

Объединение имеющихся фактических данных, полученных в [8, 9, 12, 13, 15] дает примерную сводку по удельному газообразованию (таблица 2).

Таблица 2. Сводка экспериментальных данных по удельному газообразованию (мкл/Дж) в чисто масляном промежутке.

Условия испытания		Минеральное масло					Касторовое масло			Эфирная жидкость
		ГК	Шведское	КН	МНК-4	Shell Diala D	Техническое	Медицинское	Индийское	Мидель 7131
Частичные разряды	20°C, все газы, 437 пКл, 0,022 мВт	166								
	20°C, без CO ₂ , 437 пКл, 0,022 мВт	138								
	20°C, без CO ₂ и CO, 437 пКл, 0,022 мВт	136								
	20°C, без CO ₂ и CO, 586 пКл, 0,043 мВт						7			
	20°C, без CO ₂ и CO, 453 пКл, 0,280 мВт							45		
	20°C, без CO ₂ и CO, 731 пКл, 0,192 мВт								28	
	20°C, без CO ₂	34	45	55	76					
	80°C, без CO ₂ и CO (в среде O ₂)					40				57
	80°C, почти все газы (в среде O ₂)					140				200
Искра	80°C, все газы (в среде O ₂)					1650				3560
Дуга	80°C, все газы (в среде O ₂)					1500				2000

Из сводной таблицы можно сделать следующие общие выводы.

1. Выполнение испытания жидкостей в одинаковых условиях позволяет производить их сравнение по газостойкости. Например: при 80 °С в кислородной среде тенденция к снижению газостойкости эфирной жидкости по сравнению с минеральным маслом выражена отчетливо (40 и 57 мкл/Дж); техническое касторовое масло образует меньше газов, чем минеральное масло, и меньше, чем медицинские сорта касторового масла; разные марки минерального масла отчетливо разнятся по этому показателю.

2. Учет объема СО для ЧР незначительно увеличивает общий объем образованных в минеральном масле газов в чисто масляном промежутке (138 против 136); доля СО₂, даже при пониженном содержании кислорода (на уровне 3000 мкл/л), достигает 17 % от общего объема (166 против 138), при повышенном содержании кислорода (и повышенной температуре) доля окислов углерода резко возрастает (140 против 40 и 200 против 57).

3. Удельное газообразование в дуговом разряде на порядок превышает это значение для ЧР (1500 против 140 и 2000 против 200); максимальное удельное газообразование характерно для искрового разряда.

4. Повторяемость и воспроизводимость абсолютных результатов очень низкая.

Обратимся к теоретическим представлениям об обсуждаемом предмете, принимая во внимание изложенные экспериментальные данные.

Теоретические представления

Энергетические составляющие разрядов. Разрушение изоляционной жидкости под действием электрических разрядов является результатом комплексного воздействия всех ви-

дов энергии, характеризующих данный разряд. Известно [7], что разрушение жидкости при ЧР и ее дальнейшие химические превращения протекают в результате теплового воздействия, бомбардировки заряженными частицами, воздействия излучения и ударных волн. Часть этой энергии тратится на образование и поддержание канала разряда, на разогрев жидкости или газа, на возбуждение атомов жидкости или газа, на разрыв химических связей и фрагментацию молекул, на ионизацию атомов, молекул и фрагментов. Очевидно, что степень воздействия разряда на жидкость зависит от условий развития разряда. Так, при ЧР в газовом включении [16, 7] до 25 % энергии тратится на излучение, 3-4 % – на ионизацию и 6-8 % – на бомбардировку, около 30 % – на формирование канала. В то же время, при ЧР в жидкости на излучение тратится порядка 0,1 % всей энергии разряда. Можно предполагать, что в жидкости затраты на бомбардировку и ионизацию возрастают, но основные затраты при этом приходятся на поддержание канала разряда. Данные об энергетических составляющих других разрядов неизвестны.

Влияние электрического поля. Электрический разряд формируется в электрическом поле. Оно же является источником энергии разряда: оно сообщает ускорение заряженным частицам – электронам и ионам. Электроны вследствие малой массы и большой подвижности приобретают в электрическом поле значительно большую энергию, чем тяжелые ионы, и при упругих столкновениях с тяжелыми частицами теряют ничтожную долю своей энергии. Поэтому в плазме электроны имеют среднюю энергию, большую, чем ионы, атомы и молекулы. При столкновении с молекулами "горячие" электроны мало меняют их кинетическую энергию (т.е. электроны практически не нагревают окружающий газ), но весьма эффективно возбуждают и диссоциируют молекулы. Таким образом, энергичные электроны плазмы производят нетермическим образом достаточно большое количество химически активных частиц в окружающем газе (атомов, радикалов, возбужденных частиц, фотонов и т.д.) [17, 18].

Еще до возникновения разряда приложенный электрический потенциал способствует образованию заряженных частиц и повышает энергию спонтанно образующихся под действием тепла ионов и электронов. Повышение напряженности электрического поля увеличивает скорость старения жидкости (как и повышение температуры) и, в конце концов, приводит к формированию незавершенных разрядов (ЧР). Бомбардировка молекул жидкости производит химические реакции с образованием газовой фазы – плазмы, плазменного канала, после чего часть поддерживаемой электрическим полем энергии тратится на поддержание канала разряда.

Фазы состояния вещества при развитии разряда. Электрическое воздействие на изоляционную жидкость порождает химические реакции одновременно в двух фазах: в жидкости и в плазме. Химические процессы в плазменной и в жидкой фазах существенно отличаются друг от друга: в жидкой фазе развивается цепной радикальный процесс [10], а в газовой фазе – плазмохимический, характеризующийся первоначальной фрагментацией и последующей рекомбинацией образованных фрагментов.

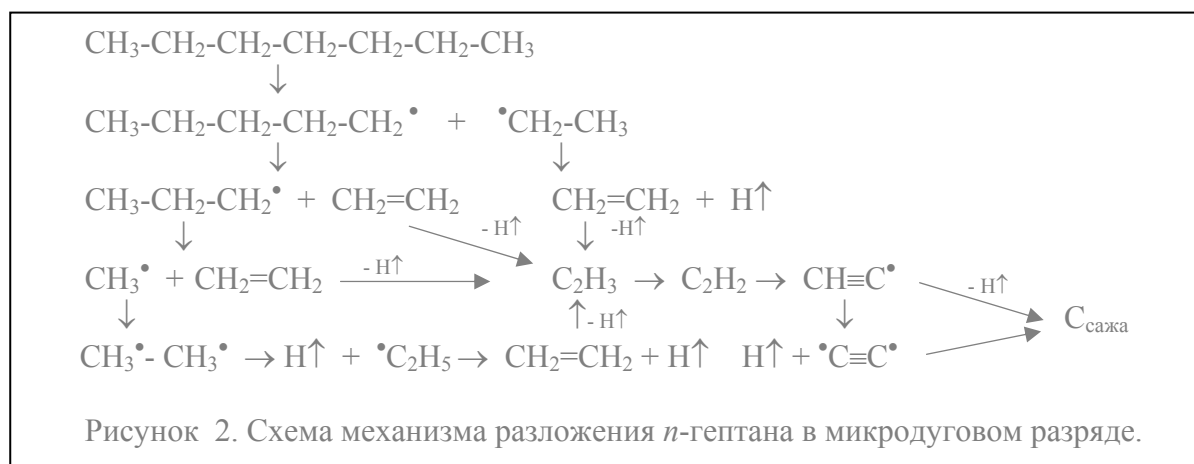
Цепной химический процесс побуждается той частью энергии разряда, которая внедряется в жидкую фазу: бомбардирующие частицы и жесткое излучение формируют лавину свободных радикалов и заряженных частиц. Частота возникновения лавины свободных радикалов и их энергия определяется напряженностью электрического поля, характеристиками разряда, его энергетическими возможностями и энергетическими составляющими, а также физико-химическими свойствами изоляционной жидкости. После образования свободных радикалов и прочих инициирующих цепную реакцию частиц процесс в жидкости развивается по законам цепной реакции при заданной температуре: с вовлечением кислорода, с вторичными реакциями, с развитием цепи и ее обрывом. Основные продукты – водород и легкие углеводороды (без ацетилена), высокомолекулярные соединения. Важная особенность жидкофазного процесса – зависимость от концентрации кислорода, который определяет образование окислов углерода, кислородсодержащих органических соединений и воды. Концентрация кислорода в минеральном масле даже в состоянии насыщения воздухом невелика (36-38 тысяч микролитров на литр, что в мольном соотношении к маслу составляет: одна мо-

лекула кислорода на 2000 молекул масла), но кислород активно взаимодействует с радикалами, в то время как молекулы масла в большей степени выполняют транспортную функцию, как для радикалов, так и для прочих видов энергии, до тех пор, пока на пути не встретится молекула кислорода. Поэтому, несмотря на большое разбавление, существенную роль в формировании конечных продуктов жидкофазного процесса играет концентрация кислорода. Очевидно, что температура опыта влияет только на процессы в жидкой фазе.

В плазме химические реакции развиваются по-другому. Энергия разряда атомизирует попавшие на пути молекулы жидкости. Рекомбинация образованных осколков в плазменной фазе приводит, в основном, к образованию водорода и ацетилена. Молекула минерального масла при этом производит большой объем плазмы с небольшим содержанием кислорода (за счет имеющихся кислородсодержащих соединений), дополнительно снижая влияние и без того небольшой концентрации растворенного кислорода.

Механизмы химических процессов. Характер принудительного, энергичного воздействия электрическим разрядом принципиально отличается от характера воздействия тепловой энергии. Тепловая энергия (энергия колебания молекул и атомов) находит слабые места в молекуле. Если случайно сложившийся максимум энергии совпадает со случайно подвергшейся деформации связью в молекуле, то происходит ее разрыв. Вероятность такого события при нормальной температуре ничтожно мала. Здесь можно рассчитывать в большей степени на то, что распаду будут подвергаться наименее прочные связи (C–C, 346 кДж/моль) и в центральной части молекулы, а не в концевом звене –CH₃. Но и при этом водород является преимущественным газом, а не исключительно только более мелкие органические фрагменты. Это свидетельствует о том, что даже мягкое тепловое воздействие после разрыва связи C–C ведет к глубокому потрясению молекулы как ангармонического осциллятора, сопровождающемуся отщеплением атома водорода с образованием неопределенной связи.

Водород является преобладающим продуктом и в плазменном процессе. В работе [17] приводится последовательный механизм, который объясняет образование водорода (схема, рис. 2) на примере гептана. Конечным итогом плазмохимической реакции являются водород



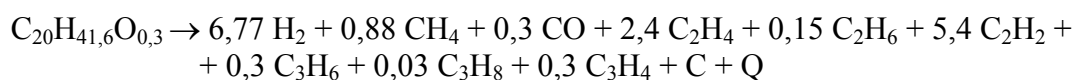
и сажа. Таким же образом протекают реакции разложения циклопарафинов и ароматики – различаются только начальные стадии: разрыв бензольного кольца приводит непосредственно к образованию ацетилена, а деструкция нефтяных углеводородов начинается с раскрытия цикла. Превращения кислородных соединений в плазмохимической реакции происходит с выделением CO, а углеводородные части молекул переходят в неопределенные углеводороды, которые далее разлагаются по уже представленному механизму.

Как видим, как бы не развивался процесс воздействия электрического разряда на органическую, углеводородную жидкость, водород всегда образуется в преимущественном количестве, несмотря на то, что химическая связь C–H не является самой слабой (413 кДж/моль).

Диссоциация – первый акт плазмохимического процесса. Мерой сравнительной устойчивости молекул является энергия диссоциации – это энергия, которую необходимо со-

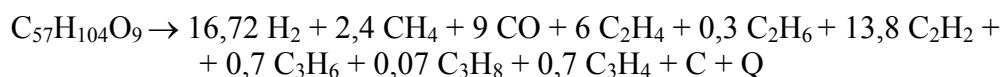
общить молекуле для перевода ее в состояние отдельно существующих не взаимодействующих атомов. Разница энергии диссоциации молекул – начальных и конечных участников реакции – определяет тепловой эффект химической реакции. Энергия диссоциации молекулы зависит от прочности химических связей и равна сумме энергии диссоциации всех связей. Энергия связи – это разность между электронной энергией связанной системы частиц и суммарной электронной энергией этих частиц в свободном состоянии. Энергию диссоциации молекулы можно рассчитать по условной, так называемой средней энергии связей.

Термохимический расчет для минерального масла. Исходя из средней молекулярной массы 286, брутто-состав свежего минерального масла с учетом ароматических, нафтеновых и алкановых составляющих, а также кислородсодержащих компонентов может быть принят как $C_{20}H_{41,6}O_{0,3}$. Исходя из теплоты сгорания 13174 кДж/моль [19], по реакции горения определяем энергию диссоциации: $D_{298} = 24081$ кДж/моль. Сообразно характерным для плазмохимии реакциям, записываем примерное уравнение химической реакции распада молекулы минерального масла в бескислородной среде:



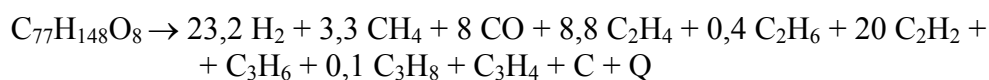
Из этого уравнения следует, что из моля минерального масла образуется 16,53 молей газообразных компонентов, образование которых теоретически обусловлено внедрением 24081 кДж энергии. В расчете на один моль газов затраты энергии составят 1457 кДж/моль, а обратная величина – 16,6 мкл/Дж (при 20 °С). Это и есть теоретическое значение коэффициента газообразования в плазмохимическом процессе, в котором энергия разряда использована только в первом акте, на диссоциацию. Средний тепловой эффект равен $Q = -1936$ кДж/моль. Именно такое количество энергии потребуется для данной реакции с образованием 16,53 молей газов. На один моль образовавшихся газов придется 117 кДж, а теоретический коэффициент газообразования составит 207 мкл/Дж.

Термохимический расчет для касторового масла. Брутто-формула касторового масла (триглицерида рицинолевой кислоты) $C_{57}H_{104}O_9$. Энергия диссоциации молекулы касторового масла D_{298} подсчитана как 73000 кДж/моль, и уравнение плазмохимической реакции распада можно представить как следующее:



Из одного моля касторового масла образуется 49,69 молей газообразных компонентов, образование которых теоретически обусловлено внедрением 73000 кДж энергии. В расчете на один моль образованных газов затраты энергии составят 1469 кДж/моль, а коэффициент газообразования – 16,5 мкл/Дж (при 20 °С). При учете энергии образовавшихся связей в продуктах реакции касторового масла тепловой эффект реакции составит $Q = -9782$ кДж на моль касторового масла или 197 кДж на моль газов, а коэффициент газообразования – 123 мкл/Дж.

Термохимический расчет для Мидель 7131. Основу этой жидкости составляет эфир пентаэритрита и жирных кислот природного происхождения, главным образом стеариновой, $C(CH_2OC(O)C_{17}H_{35})_4$. Брутто-формула $C_{77}H_{148}O_8$. Исходя из теплоты сгорания 44160 кДж/моль [19], по реакции горения определяем энергию диссоциации: $D_{298} = 96590$ кДж/моль. Записываем примерное уравнение реакции плазмохимического распада молекулы Мидель в бескислородной среде:



Из одного моля Мидель образуется 65,8 молей газообразных компонентов, образование которых теоретически обусловлено внедрением 96590 кДж энергии. В расчете на один моль образованных газов затраты энергии составят 1468 кДж/моль, а коэффициент газообразования – 16,5 мкл/Дж (при 20 °С). Средний тепловой эффект равен $Q = -11306$ кДж на моль Мидель или 172 кДж на моль газов, а коэффициент газообразования – 141 мкл/Дж.

Обобщенный вывод из термохимического расчета. Так определены теоретические значения коэффициентов газообразования изоляционных органических жидкостей для двух возможных вариантов участия энергии разряда в плазмохимическом процессе: только на первой стадии (диссоциации) и в завершеном химическом процессе. Выполненный расчет показывает, что несмотря на существенное химическое различие состава и структуры, на наличие в структуре крупной органической молекулы более прочных связей, таких как C=C, C=O, и группировки COO, теоретический коэффициент газообразования существенно не меняется, оставаясь (в пределах ошибки расчета) на уровне 16,5 мкл/Дж для скоротечных воздействий. Но в завершеном плазмохимическом процессе значения коэффициента газообразования для теоретически чистых образцов разнятся: 123 – для касторового масла, 141 – для Мидель и 207 мкл/Дж – для минерального масла.

Длительность химических и разрядных процессов и особенности формирования канала. Вторым актом плазмохимической реакции является взаимодействие образовавшихся в первом акте частиц с образованием конечных продуктов. Элементарный акт химической реакции протекает за очень короткий отрезок времени (0,01 нс) [20]. Но после образования фрагментов включаются кинетические факторы, которые определяют скорость процесса рекомбинации осколков молекулы: протяженность реакционного пространства, диффузия двух объединяющихся частиц друг к другу и их эффективное столкновение. Большая часть столкновений не приводит к химическому превращению. Доля активных столкновений от общего их числа невелика и составляет $10^{-20} - 10^{-10}$ [20, стр. 138]. Так что завершение химического процесса по меркам микромира может несколько затянуться.

Во всех случаях, считаем, что энергия квантов намного превосходит энергию диссоциации молекулы изоляционных жидкостей, и взаимодействие кванта энергии электрического разряда приводит к полной диссоциации молекулы ("взрывной" механизм, а не последовательный как в [17]) с дальнейшими превращениями полученных атомизированных и ионизированных осколков в плазменной или жидкой фазах. Образование канала происходит за счет бомбардировки и взрыва молекул жидкости, т.е. за счет химического процесса, а поддержание канала разряда – это дополнительная работа, выполняемая за счет энергии разряда (нехимические процессы).

Энергия импульса частичного разряда уходит на диссоциацию молекул жидкости, за счет чего и образуется канал. Длительность частичного разряда составляет от 3 – 10 нс для начальных и до 100 – 1000 нс для критических [7, стр. 10], что намного превышает длительность первого акта химического процесса. Температурный фактор ничтожен. Размеры образовавшегося канала после каждого импульса находятся в пределах 10^{-6} мкл для ЧР с кажущимся зарядом 10^{-9} Кл. В таком малом объеме кинетические факторы несущественны, и плазмохимическая реакция успевает завершиться к моменту схлопывания канала. Поэтому результат химического воздействия ЧР формируется с учетом теплового эффекта, как и предполагал Г.С.Кучинский ([7], стр. 77). Можно ожидать, что с ростом кажущегося заряда выше критического, а, следовательно, с ростом объема канала, ситуация будет меняться в сторону увеличения доли незавершённого термохимического процесса, т.е. в сторону снижения удельного газообразования.

При развитии искрового разряда фронт лидера с температурой до 7000 К с космической скоростью прокладывает себе путь, образуя плазменный канал за счет диссоциации попадающих на пути молекул жидкости. "Взрывающая" молекулы, энергия лидера выбрасывает большую часть образовавшихся атомизированных частиц и фотонов в жидкость. Искра является неподдерживаемым разрядом, и после перекрытия изоляционного промежутка канал схлопывается. Длительность искрового разряда составляет от долей до десятка микросекунд,

а время контакта фронта с молекулой – в пределах наносекунды. Объем канала на много порядков превышает объем канала единичного ЧР. Сравнительно большой объем канала переводит завершение плазмохимической реакции для оставшихся в плазме атомизированных частиц в сравнительно медленную кинетическую стадию: схлопывание происходит быстрее, чем кинетическое завершение плазмохимической реакции, и в результате возбужденные неуспевшие рекомбинировать частицы попадают в жидкость. Таким образом, практически вся масса первоначально образованных искрой атомизированных остатков изоляционной жидкости попадает в жидкую фазу, побуждая цепную жидкофазную реакцию и оставляя плазмохимическую реакцию незавершенной. Поэтому энергию этого быстротекущего явления имеет смысл сопоставлять с энергией диссоциации молекул изоляционной жидкости (т.е. коэффициент газообразования в плазмохимическом процессе для искрового разряда может быть принят как 16,5 мкл/Дж).

Дуга в момент образования в химическом плане ведет себя как искра, с той разницей, что канал сильно ионизирован и поток электронов по нему не прекращается. Прodelав большую химическую работу в начальный момент формирования канала, дуга горит, излучает тепло и фотоны. По образованному плазменному каналу протекает большое количество энергии, основная часть которой выполняет работу поддержания канала и во внешней электрической цепи (нехимические процессы). Чем дольше горит дуга, тем меньше доля затрат общей энергии на первоначальный химический процесс формирования канала. Длительность дугового процесса, поддерживаемого источником, задается искусственно, и намного превышает время завершения химической реакции. Плазма поддерживается низким напряжением и близка к равновесной. Высокая температура всех частиц только способствует завершению плазмохимической реакции. Поэтому воздействие дуги на изоляционную жидкость необходимо рассматривать во взаимосвязи с процессом рекомбинации осколков, т.е. с учетом теплового эффекта химической реакции.

Уравнение для расчета газообразования. Каждый из видов энергетического воздействия (термическое, излучение и бомбардировка) производит свой химический эффект на конкретную изоляционную жидкость, выражающийся в образовании определенного количества газообразных компонентов. Несколько упрощая, зависимость объема образующихся газообразных компонентов от энергии разряда можно представить следующим уравнением

$$V_{\Gamma} = [\omega_{\text{ж.ф.}} B_{\Gamma}^{\text{ж.ф.}} + \omega_{\text{пл}} B_{\Gamma}^{\text{пл}}] E \quad (1)$$

где $\omega_{\text{ж.ф.}}$ и $\omega_{\text{пл}}$ – доля энергии, аккумулированная химическими реакциями в жидкости и в плазме (свойство разряда), $B_{\Gamma}^{\text{ж.ф.}}$ и $B_{\Gamma}^{\text{пл}}$ – коэффициенты газообразования в жидкой фазе и в плазме (свойство жидкости), E – суммарная энергия разряда. Сумма $\omega_{\text{ж.ф.}} + \omega_{\text{пл}}$ меньше единицы, так как та или иная часть энергии разряда тратится на нехимические процессы, с одной стороны, и с другой, газообразные компоненты – не единственные химические продукты превращения изоляционной жидкости, образование которых обязано внедряемой энергии.

Трактовка экспериментальных результатов

Повторяемость результатов приведенных выше опытов в одной лаборатории и даже в одной серии невысока. Результаты исследований (таблица 2) плохо согласуются между собой, и прежде всего, из-за несопоставимости экспериментальных условий. Однако попытаемся их сблизить на основе имеющихся знаний, в том числе и о тепловом процессе [10].

Опыты Борси с коллегами выполнены при 80 °С с насыщенными воздухом изоляционными жидкостями. Эксперимент с ЧР имел протяженность до 1000 часов. Вне зависимости от процессов между электродами, при температуре 80 °С кислород во всем объеме изоляционной жидкости расходуется на образование продуктов, и за несколько дней его концентрация упадет ниже эквивалентной [10]. В условиях электрического эксперимента это

произойдет еще быстрее за счет свободных радикалов, в данном случае образуемых не только температурным фактором, но и электрическими процессами. После достижения эквивалентной концентрации все образующиеся радикалы начнут взаимодействовать с растворенными газами, образованными как в системе электродов, так и в самой жидкости, перерабатываясь в полимерные продукты. Эксперименты меньшей продолжительности (искра и дуга) протекают при сравнительно высокой концентрации кислорода. Но от концентрации кислорода и, тем более, от температуры зависят в основном реакции в жидкой фазе. И если доля химических реакций в жидкости велика, то и влияние концентрации кислорода на формирование продуктов повышено.

Для ЧР доля реакций в жидкой фазе мала, и поэтому влияние кислорода проявляется слабо. В нашем эксперименте с ЧР (20 °С, $c_{O_2} \sim 3000$ мкл/л) добавка СО незначительна и CO_2 – невелика (136 → 138 → 166 мкл/Дж), у Борси (80 °С, $c_{O_2} \sim 38000$ мкл/л) это влияние больше (40 → 140 или 57 → 200), но сами значения меньше: процесс длительный, и кислород и растворенные газы расходуются по тепловому механизму.

В искровом разряде доля реакций в жидкой фазе высокая, поэтому прослеживается большая зависимость от температуры и от концентрации кислорода. Удельное газообразование от ЧР до искры при 80 °С, $c_{O_2} \sim 38000$ мкл/л возросло на порядок (до 1650 для масла и до 3560 мкл/Дж для Мидель).

В дуговом разряде также доля реакций в жидкой фазе высокая, что определяет большую зависимость от температуры и от концентрации кислорода и высокий уровень газообразования (1500 для масла и 2000 мкл/Дж для Мидель). Доля химических реакций в плазме падает с продолжительностью горения дуги, хотя снижение газообразования не столь резкое, так как энергия дуги питает реакции в жидкой фазе, насыщенной кислородом.

Учитывая вышесказанное, можно принять, что увеличение удельного газообразования в опыте Борси на порядок для искрового и дугового процессов явилось следствием влияния температуры и концентрации кислорода. Исходя из этого, представим упрощенную и обобщенную сводку данных для минерального масла (таблица 3), полагая, что все эксперименты выполняются в короткие временные интервалы.

Качественную характеристику разрядов представим следующим образом:

Разряд в жидкости	Характеристика разряда	Энергетические составляющие			Общая энергия	Доля энергии		
		термическое воздействие	радиационное воздействие	бомбардировка		на нехимические процессы	на химическое разложение с образованием плазмы	на химическое разложение в жидкой фазе
ЧР	незавершенный, поддерживаемый	мин.	мин.	макс.	мин.	сред.	высок.	малая
Искра	завершенный, поддерживаемый	сред.	сред.	макс.	сред.	мин.	макс.	макс.
Дуга	неподдерживаемый, завершенный, поддерживаемый	макс.	макс.	мин.	высок.	больш.	малая	средн.

Таблица 3. Упрощенная обобщенная сводка удельного газообразования для минерального масла (в мкл/Дж) в непродолжительных экспериментах

	20 °С в бескислородной среде	80 °С и концентрации кислорода 36-38 мл/л
ЧР	138	~ 160-200
Искра	165	1650
Дуга	150	1500

Расчет коэффициента газообразования в жидкой фазе и долей распределения энергии. Наиболее приемлемое представление о долях энергии на отдельные составляющие процесса можно дать для искрового разряда: примерно равные доли на химические процессы при образовании плазменной фазы и в жидкой фазе и минимальные нехимические потери. Зададимся возможными значениями этого распределения: 45, 50 и 5 %%, соответственно. Тогда в соответствии с коэффициентом газообразования минерального масла в плазме, данными таблицы 3 и уравнением 1 записываем для искрового разряда:

$$165 = 0,45 \cdot 16,5 + 0,5 x \quad \text{и} \quad 1650 = 0,45 \cdot 16,5 + 0,5 y$$

Получаем $x = 315$ и $y = 3285$. Это – значения коэффициента газообразования $B_{г}^{ж.ф}$ (мкл/Дж) в жидкой фазе минерального масла в условиях нашего эксперимента и в условиях короткого эксперимента Борси для всех видов разрядов, энергия которых в той или иной доле проникает в жидкую фазу. Теперь мы получаем возможность оценить доли распределения энергии для ЧР, условно реализуемых в короткие времена, и для дуги. Составляем таблицу с исходными данными для расчета и выполняем в ней расчет долей энергии разряда в плазме и в жидкой фазе, исходя из принятого удельного газообразования в минеральном масле (таблица 3) и уравнения 1:

Тип разряда и доля энергии на нехимические процессы	Доли энергии, ω		Коэффициенты газообразования (мкл/Дж)			Расчет удельного газообразования (мкл/Дж)	
	плазма	ж.ф.	плазма, $B_{г}^{пл}$	жидкая фаза, $B_{г}^{ж.ф}$		$V_{г}/E = [\omega_{ж.ф} B_{г}^{ж.ф} + \omega_{пл} B_{г}^{пл}]$	
				20°, $c_{O_2}=0$	80°, $c_{O_2}=38$ мл/л	20°, $c_{O_2}=0$	80°, $c_{O_2}=38$ мл/л
ЧР, 0,35	0,63	0,02	207	315	3285	137	196
	0,34	0,01				138	167
Искра, 0,05	0,45	0,50	16,5	315	3285	165	1650
Дуга, 0,51	0,03	0,46	207	315	3285	151	1517

Полученные значения удельного газообразования хорошо соответствуют принятым условиям, обобщенным данным в таблице 3 и нашим представлениям о качественных характеристиках разрядов:

– 63-65 % энергии ЧР расходуется в химическом процессе образования плазмы, 1-2 % – расходуется в жидкой фазе и 34-35 % затрачивается на нехимические процессы,

– 3 % энергии дуги израсходовано в химическом процессе образования плазмы, 46 % пошло на реакции в жидкой фазе и 51 % – на нехимические процессы (в конкретном эксперименте Борси).

Однако этот расчет следует воспринимать только как подтверждение структуры формирования газов при развитии электрических разрядов непосредственно в изоляционной жидкости. Он позволяет дать представление о примерном распределении энергии разрядов.

В качестве результата рассмотрения такого явления, как развитие электрического разряда в изоляционной жидкости, с позиции физической химии отметим три неудобных обстоятельства. Во-первых, коэффициент газообразования как единое целое не существует: для жидкой фазы это одно значение, для плазменной – другое. Во-вторых, удельное газообразование в той или иной степени зависит от концентрации кислорода и от температуры. В-третьих, какой-либо расчет образовавшихся газов невозможен без знания распределения энергии по фазам состояния изоляционной жидкости, причем для дугового разряда необходимо учитывать и время горения дуги в качестве фактора, влияющего на распределение энергии.

Заключение

Теперь, когда составлено представление о газообразовании под действием разрядов как о физико-химическом явлении, можно строго сформулировать основные требования к методу определения газостойкости изоляционной жидкости электрическим методом.

Не привязывая понятие к какому-либо глубокому физическому смыслу, в качестве сравнительной характеристики газостойкости изоляционных жидкостей выберем "стандартную газостойкость" ("standard gas stability", SGS) в размерности Дж/мл: чем больше величина, тем больше стойкость жидкости к воздействию электрических разрядов. Для определения SGS необходимо выбрать и строго нормировать условия получения этой характеристики.

Наиболее просто воспроизводится искровой разряд: элементы электрической схемы задают его параметры и его исполнение не зависит от изоляционной жидкости. Хуже воспроизводится дуга, а воспроизведение ЧР практически невозможно. Кроме легкости создания и воспроизведения искровой разряд имеет еще ряд преимуществ. Энергия искры примерно *равно* распределяется в жидкой и плазменной фазах, т.е. в более *равной* степени учитывается и та, и другая сторона химического процесса, и, следовательно, получаемые значения "стандартной газостойкости" будут отражать поведение жидкости и в электрическом поле, и в разрядных процессах. Искра имеет наименьшие потери на нехимические процессы и максимальный газогенерирующий эффект. Искровой разряд наименее предсказуем в плане траектории своего развития. Поэтому он в меньшей степени зависит от ионизационного следа, оставляемого предыдущим разрядом. Вероятно, параметры искрового разряда не так чувствительны к точности установки межэлектродного расстояния. И, наконец, эксперименты можно выполнять в достаточно коротких временных рамках. Единственный недостаток использования искрового разряда для определения SGS – это его *большая* зависимость от концентрации кислорода, чем, например, у ЧР, что потребует более глубокого удаления кислорода из испытуемой жидкости или исследования его влияния (что с учётом изложенного будет представлять собой непростую проблему).

Стандартный грозовой импульс по МЭК 60060-1 с учетом требований МЭК 897 (1987) определит однотипность и повторяемость искрового разряда. Испытательная ячейка должна выполнять функции инструмента для высоковольтных испытаний и инструмента для дозирования жидкости на анализ. Предположительно, некоторый прототип устройства, изображенного на рис. 1, оснащенный электродной системой игла-шар (point-to-sphere electrode system), отвечает этим требованиям. Температура (комнатная) и концентрация кислорода (минимальная) должны регламентироваться методикой выполнения эксперимента.

Введение жесткого нормирования всех параметров при определении значения SGS для каждой из существующих или претендующих на это изоляционных жидкостей обеспечит хорошую повторяемость и надежность квалификации изоляционной жидкости по этому показателю. Все нормируемые условия доступны для любой электротехнической лаборатории.

Организованное таким образом измерение SGS с равным успехом может использоваться как для чистых изоляционных жидкостей для сравнения между собой, так и для жидкости любой кондиции для сравнения с нормативным значением для чистого образца.

Послесловие

Автор первоначально не предполагал осуществить эту публикацию на русском языке, считая, что в современных экономических условиях подобного рода практические исследования перестали быть актуальными. Выход этого материала на английском языке ожидается в соавторстве с I.Fofana в Electrical Insulation Magazine.

Непредвиденное опубликование этого материала на русском языке побудила информация о продолжении в нашей стране исследования разложения изоляционных жидкостей под действием ЧР. Как следует из изложенного, подобные исследования не могут привести к каким-либо разумным результатам обобщающего характера, кроме как к констатации результатов конкретных, но бесполезных и с физико-химических позиций некорректно поставленных экспериментов (которыми насыщена научная электротехническая литература), непригодных ни для оценки газостойкости жидкостей, ни для диагностического мониторинга оборудования в эксплуатации. В связи с этим автор

считает целесообразным приложить проект метода определения стандартной газостойкости изоляционных жидкостей.

Приложение.

Метод определения стандартной газостойкости SGS изоляционных жидкостей

Преамбула

Метод предназначен для определения сравнительной стойкости изоляционных жидкостей к газообразованию под действием энергии электрического разряда. В качестве такой характеристики выступает "стандартная газостойкость" ("standard gas stability", SGS) в размерности Дж/мл. Чем больше величина SGS, тем больше стойкость жидкости к воздействию электрических разрядов.

Электрическое воздействие создается с помощью искрового разряда в электродной системе игла-шар, заполненной испытуемой изоляционной жидкостью. Суммарная энергия, внедряемая в изоляционную жидкость, обеспечивается импульсным генератором и условиями испытания. Измерение объема образовавшихся газов осуществляется посредством измерения объема изоляционной жидкости в системе и газохроматографического анализа растворенных газов в тщательно перемешанной изоляционной жидкости. В качестве определяемых компонентов должны быть: H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_6 , C_3H_8 и, может быть, компоненты C_4 .

Измерение стандартной газостойкости с равным успехом может использоваться как для чистых изоляционных жидкостей для сравнения между собой, так и для жидкости любой кондиции для сравнения с нормативным значением для чистого образца.

Характеристика искрового разряда

Искровой разряд формируется напряжением до 100 кВ в виде стандартной грозовой волны 1,2/50 мкс, обеспечивающей 100%-ную вероятность пробоя любого жидкого диэлектрика независимо от его химической природы при перенапряжении в пределах двух-трех стандартных отклонений [21]. Суммарная энергия разрядов, внедряемая в жидкость, должна составлять 1 Дж.

Конструкция ячейки для испытания

Конструкция испытательной ячейки схематично приведена на рис. 1. Ячейка одновременно представляет собой высоковольтное устройство для внедрения электрической энергии в изоляционную жидкость и пробоотборное устройство для выполнения газохроматографического анализа изоляционной жидкости. Два цилиндрических горизонтальных выступа обеспечивают электрическую прочность по воздуху. Стеклоячейка конструируется на базе стеклянного медицинского шприца на 50-100 мл. Электродные штыри, вваренные в стеклянный корпус, имеют концевые резьбы для установки электродов и регулировки

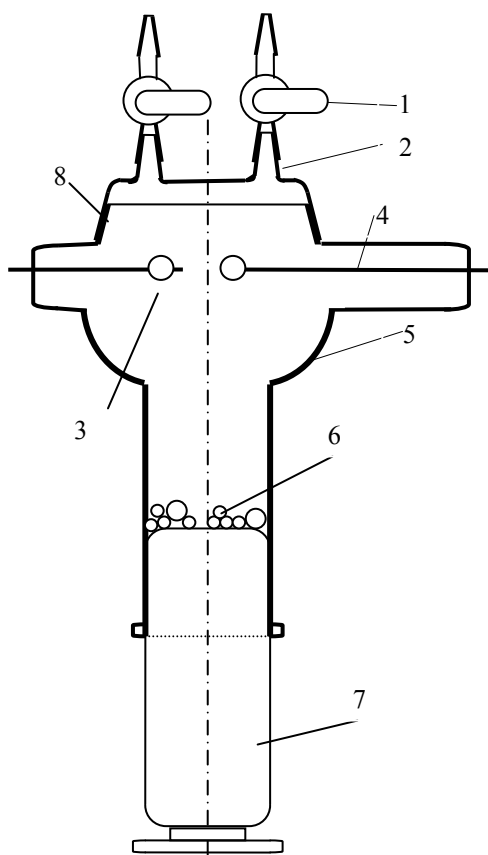


Рисунок 1. Стеклянная ячейка для определения стандартной газостойкости изоляционных жидкостей к электрическому воздействию

1 – миниатюрный пластмассовый трехходовой краник, 2 – крышка с конусом, 3 – электрод "шар", 4 – электрод "игла-шар", 5 – корпус, 6 – стеклянные шарики, 7 – поршень шприца, 8 – шлиф, стягиваемый резиновыми кольцами.

расстояния. Размеры электродов должны соответствовать требованию [22]. На съемной крышке, герметично устанавливаемой на корпус посредством шлифа, располагают конусы для установки двух миниатюрных пластмассовых трехходовых краников, в настоящее время широко используемых на пробоотборных шприцах. Для перемешивания жидкости с целью ускорения растворения образующихся газовых включений и равномерного распределения их концентрации по всему объему масла в ячейке размещают несколько стеклянных, хорошо оплавленных шариков диаметром 8-10 мм.

Методика подготовки изоляционной жидкости к испытаниям

Основная задача подготовки жидкости к испытанию состоит в достижении предельности отобранного образца при максимально возможном глубоком удалении кислорода. Для этого изоляционная жидкость вакуумируется и продувается потоком гелия.

Подготовка жидкости и заполнение ею ячейки выполняется в четыре приёма. 1) Сначала изоляционная жидкость (0,5-0,6 л) в открытой большой конической колбе выдерживается в вакуумном шкафу в течение ночи при остаточном давлении менее 1 мм Нг. Линия сброса вакуума вакуумного шкафа соединена герметичной металлической коммуникацией с источником аргона. 2) После сброса вакуума (аргоном) колба извлекается из вакуумного шкафа, закрывается пробкой с трубками для осуществления барботажной продувки гелием в течение двух часов. Поток гелия подается по тонкой стеклянной трубке в придонную часть колбы для более полного захвата жидкости в процесс насыщения гелием и вытеснения оставшихся газообразных примесей. Выходная трубка снабжена пластиковым шлангом, опущенным в изоляционную жидкость, выполняющую функцию гидравлического затвора для предотвращения обратной диффузии воздуха. 3) После продувки, открытая колба с изоляционной жидкостью снова устанавливается в вакуумный шкаф. Туда же помещается подготовленная, чистая, взвешенная ячейка с максимально выдвинутым поршнем, открытыми краниками и пластиковыми шлангами (внутренний диаметр ~ 3-4 мм), надетым на конусные отрезки краников. При остаточном давлении менее 1 мм Нг вакуумный шкаф оставляют на ночь. После сброса вакуума (аргоном) и вскрытия шкафа колба с изоляционной жидкостью прикрывается пробкой, а краники ячейки переводят в закрытое положение и боковые отрезки заглушают стандартными заглушками, входящими в комплект краников. 4) Заполнение ячейки осуществляют через пластиковый шланг сразу после выемки из шкафа. Сначала через шланг пропускают аргон из шприца, выдавливая его поршнем. После этого опускают шланг в изоляционную жидкость в колбе, и осторожно оттягивая поршень, засасывают первую порцию жидкости в ячейку. Эта порция должна смочить шлиф шприца. Постепенно оттягивая поршень (направленный вертикально вниз) и опустив ячейку по возможности ниже уровня жидкости в колбе, дают ей возможность самотеком заполнять ячейку. Далее, открыв второй краник, позволяют жидкости заполнить весь объем ячейки при полностью оттянутом поршне. После перекрытия краников, удаления шлангов и небольшого перемешивания жидкости с помощью стеклянных шариков ячейка готова к анализу состава газов в исходном образце и последующему испытанию.

Влажность изоляционной жидкости не измеряется, она соответствует состоянию поставки образца на испытание и является характеристикой качества испытываемой жидкости.

Условия испытания

Испытание изоляционной жидкости выполняется при комнатной температуре (22 ± 2 °С). Длительность электрического воздействия импульсами заданной энергии и периодичности не должна превышать двух часов. Поршень шприца при испытании должен находиться в свободном, незаторможенном состоянии.

Методика выполнения эксперимента

После подсоединения ячейки к электрической схеме, производится включение установки, и в автоматическом режиме с установленным интервалом (30-35 секунд) выполняется

заданное число импульсов (~ 200 , ~ 5 мДж/имп) в установленное время (не более 2 часов) для обеспечения постоянной суммарной энергии в 1 Дж. По завершении электрического воздействия ячейка извлекается из электрической схемы, и посредством вращения, покачивания и переворачивания осуществляется перемешивание изоляционной жидкости в течение 20 минут.

Анализ газов в изоляционной жидкости

В качестве определяемых компонентов должны быть: H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_6 , C_3H_8 и, может быть, компоненты C_4 . Концентрация каждого из перечисленных компонентов должна быть выражена в размерности мкл/л.

Хроматографический анализ изоляционной жидкости должен выполняться непосредственно из ячейки: после заполнения ячейки изоляционной жидкостью и после испытания.

Концентрация кислорода в исходной пробе не должна превышать 50 мкл/л^{**}). При превышении установленного уровня процедура подготовки изоляционной жидкости к испытанию должна быть выполнена заново.

Измерение объема изоляционной жидкости

Объем изоляционной жидкости в ячейке должен быть измерен в каждом эксперименте взвешиванием чистой подготовленной для заполнения ячейки и после ее заполнения и выполнения анализа исходного состава газов в подготовленной изоляционной жидкости. Плотность изоляционной жидкости при температуре опыта, необходимая для расчета объема, должна быть определена гидростатическим методом из оставшегося неиспользованным остатка подготовленной жидкости. Объем жидкости (мл) рассчитывается как

$$V = G/\rho$$

где G – масса жидкости, г, ρ – плотность жидкости, г/мл.

Расчет SGS

Для получения значения стандартной газостойкости (SGS) необходимо поделить суммарную энергию разряда E , в джоулях, на суммарное количество образовавшихся газов:

$$SGS = 10^6 E/[V(c_{H_2}+c_{CH_4}+c_{CO}+c_{CO_2}+c_{C_2H_4}+c_{C_2H_6}+c_{C_2H_2}+c_{C_3H_6}+c_{C_3H_8}+c_{C_4})]$$

где V – объем изоляционной жидкости в ячейке, в миллилитрах, c – концентрация компонента после испытания, в мкл/л, за вычетом исходных значений.

Оценка газостойкости изоляционной жидкости

Стандартная газостойкость изоляционной жидкости (SGS) является абсолютным значением, выражаемым количеством энергии, необходимым для образования единицы объема генерируемых газов. Для чистых жидкостей или регламентировано подготовленных товарных образцов эта величина табулируется. Чем больше значение SGS, тем больше стойкость жидкости к электрическому воздействию.

Отклонение значения SGS для исследуемого образца от табулированного значения для чистой жидкости или товарного образца характеризует качество исследуемого образца жидкости.

^{**}) Это значение должно быть установлено экспериментально. Процедура подготовки жидкости к испытанию и процедура заполнения ячейки изоляционной жидкостью должны надежно обеспечивать это требование.

-
- ¹ L.Gherardi, B.Vecellio. Investigation of the gassing properties of dielectric liquids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. Vol. EI-20, No. 2, 1985, p. 431-435.
- ² Публикация МЭК 60628 (1985). Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization.
- ³ F.Viale, J.Poittevin, B.Fallow and other. Study of a correlation between energy of partial discharges and degradation of paperoil insulation. *CIGRE*. 1982. Sess. 15-12.
- ⁴ Г.С.Кучинский, Н.И.Назаров, Г.Т.Назарова, И.Ф.Переселенцев. Силовые электрические конденсаторы. М. Энергия. 1975, 247 с.
- ⁵ M.Duval, C.Lamarre. The characterization of electrical insulating oils by high-performance liquids chromatography. *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 1977, Vol. EI-12, № 5, p. 340-348.
- ⁶ P.J.Burton, M.Carballeira, M.Duval, C.W.Fuller, J.Graham, A. de Pablo, J. Samat, E.Spicar. Application of liquid chromatography to the analysis of electrical insulation materials. *Internat. Conf. on Large High Voltage Electric Syst.*, Paris, 28 August – 3 Sept., 1988, paper 15-08.
- ⁷ Г.С.Кучинский. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л., Энергия, 1979, 224 с.
- ⁸ H.Borsi, K.Dumke, E.Gockenbach. Relation between faults and generated gases in transformer liquids. *Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99)*, Nara, Japan, 1999, July 20-25, p. 487-490.
- ⁹ H.Borsi. Gassing behaviour of different insulating liquids for transformers. *Electra*, 2000, No.188, p. 21-41.
- ¹⁰ В.Г.Аракелян. Исследование теплового старения изоляционных жидкостей. Части I и II. *Электротехника*. 2007, № 6 и 2008, №1. Thermal ageing of insulation liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, in publication.
- ¹¹ T.V.Oommen. Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, Vol. 18, No. 1, p. 6-11.
- ¹² В.Г.Аракелян, Л.А.Дарьян, А.К.Лоханин. Разложение изоляционных жидкостей под действием частичных разрядов, тепла и ультразвукового поля. *Электричество*. 1988, № 5, стр. 33-38.
- ¹³ Л.А.Дарьян, В.Г.Аракелян. Особенности разрушения изоляционных жидкостей под действием частичных разрядов. *Электротехника*. 1997, № 5, стр. 58-61.
- ¹⁴ Л.А.Дарьян, К.А.Зайцев. Схема и методика измерений интегральных характеристик ч.р. Сборник научных трудов ВЭИ "Электрическая прочность изоляции оборудования высокого напряжения. М., 1989, стр. 107-110.
- ¹⁵ В.Г.Аракелян, Л.А.Дарьян. Стойкость изоляционных жидкостей к газообразованию. *Электротехника*. 1997, № 2, стр. 45-49.
- ¹⁶ Н.С.Ильченко, В.М.Кириленко. Полимерные диэлектрики. Киев. Техніка. 1977, 170 с.
- ¹⁷ А.Д.Кокурин. Химия плазмы. Л., 1970.
- ¹⁸ Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Том VIII-1 Химия низкотемпературной плазмы. М., 2005. Под ред. В.Е.Фортова.
- ¹⁹ I.Fofana, V.Wasserberg, H.Borsi, E.Gockenbach. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformer. Part 1: Investigation of mixed liquids. *IEEE Electrical Insulation magazine*, 2002, Vol. 18, No. 3, p. 18-31.
- ²⁰ Физическая химия, т. 2, М., 2001, издание 3-е, под ред. К.С.Краснова.
- ²¹ Документ МЭК 60060-1.
- ²² Документ МЭК 897 (1987).