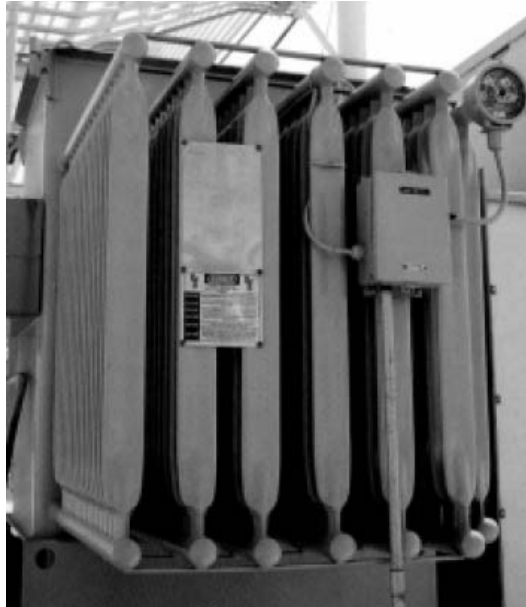




СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ СОФЭКСИЛ-ТСЖ™.



(техническое описание и характеристики)



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

1. Введение

Известно, что трансформаторы с жидким диэлектриком имеют существенные преимущества перед сухими трансформаторами или трансформаторами с изоляцией из смолы. Эти преимущества связаны прежде всего со значительно более низкой стоимостью, меньшими габаритами. Кроме того, сухие трансформаторы требуют более сильной вентиляции при установке в закрытых помещениях. Основным недостатком трансформаторов, заполненных минеральным маслом является их пожароопасность, что в значительной мере усложняет размещение трансформаторов, особенно в условиях промышленного производства. В отечественной промышленности продолжают широко использоваться пожаробезопасные трансформаторы, заполненные жидкими негорючими полихлорбифениловыми (ПХБ) диэлектриками типа "СОВТОЛ", которые относятся к стойким органическим загрязнителям (СОЗ). Такие трансформаторы используются там, где от трансформаторов требуется пожаробезопасность. Это особенно важно, когда трансформаторы не могут быть отнесены далеко от оборудования, например, сварочного или различных силовых приводов. Применение трансформаторов с негорючим или мало горючим жидким диэлектриком позволяло получать существенную экономию при размещении и эксплуатации оборудования. Однако в настоящее время накоплен существенный опыт, показывающий значительную опасность ПХБ для здоровья человека. Поэтому большинство стран, включая и Россию, подписали Конвенцию по исключению использования в промышленности и сельском хозяйстве СОЗ. В соответствии с Конвенцией предполагается постепенный вывод из эксплуатации оборудования с ПХБ диэлектриками. При этом в соответствии с требованиями международных торговых организаций предпочтение на международном рынке отдается той продукции, которая была произведена на предприятиях не использующих ПХБ, то есть имеющих экологическую сертификацию.

Корпорация **Dow Corning** начала исследования силиконовых жидкостей в качестве перспективных диэлектрических хладагентов с 1950 года. Результатом этих исследований явилось создание и производство силиконовой трансформаторной жидкости **561**®, которая в настоящее время широко используется в трансформаторах с жидким диэлектриком особенно там, где предъявляются высокие требования по пожаробезопасности, термостойкости и экологической безопасности.

В номенклатуре компании СОФЭКС имеется силиконовая трансформаторная жидкость СОФЭКСИЛ-ТСЖ™ - хорошая альтернатива негорючей диэлектрической жидкости типа совтол (ПХБ диэлектрик), которая использовалась и продолжает использоваться в трансформаторах отечественного производства. По техническим характеристикам и свойствам трансформаторная силиконовая жидкость СОФЭКСИЛ-ТСЖ™, компании СОФЭКС аналогична трансформаторной силиконовой жидкости типа **561**® корпорации **Dow Corning**.

Силиконовая трансформаторная жидкость обычно используется для:

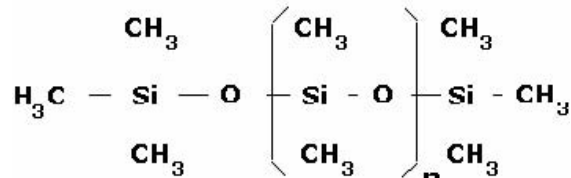
- изготовления новых экономически эффективных, пожаро и экологически безопасных трансформаторов,
- замены экологически опасных ПХБ диэлектриков (совтол) в работающих трансформаторах,
- замены минерального масла в масляных трансформаторах с целью понижения класса их пожароопасности.

Кремнийорганические жидкости имеют уникальную химическую структуру. Эти жидкости, которые также называются полидиметилсилоксанами (PDMS), основаны на молекулярных связях типа Si-O, характерных для высокотемпературных неорганических материалов, таких как кварц. Эти молекулярные связи много прочнее чем углеводородные особенно при воздействии высоких температур, кислорода, физического и химического воздействия. Химическая формула силиконовой

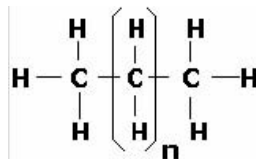


СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

жидкости имеет вид:



Формула углеводородного полимера (минерального масла, применяемого в качестве диэлектрика для трансформаторов) приведена ниже:



Силиконовые жидкости являются основой широкого спектра материалов, отличительными свойствами которых являются:

- Широкий диапазон рабочих температур.
- Слабая зависимость вязкости от температуры
- Термостабильность.
- Слабая воспламеняемость.
- Стабильность диэлектрических характеристик.
- Слабая сжимаемость.
- Химическая инертность.
- Низкое поверхностное натяжение.
- Низкая токсичность.

Эти свойства позволяют использовать силиконовые жидкости в качестве диэлектрических, гидравлических жидкостей, теплоносителей и т.д., и, в частности, в качестве трансформаторной жидкости, которая свободна от воды, не маслится, практически лишена запаха и обладает хорошими изолирующими и диэлектрическими свойствами.

2. Силиконовая трансформаторная жидкость СОФЭКСИЛ-ТСЖ

СОФЭКСИЛ-ТСЖ™- это охлаждающая и диэлектрическая жидкость для заполнения масляных трансформаторов и другого оборудования, которые должны работать при очень низких и очень высоких температурах и особенно в тех случаях, когда требуется высокая термостабильность и наименее низкие значения тепла, выделяемого при сгорании.

За рубежом силиконовая жидкость PDMS специфицирована для применения в качестве жидкого диэлектрика. (Commission (IEC) 836 "specifications for silicone liquid for electrical purposes" (Silicone Type T1).* ASTM D 4652-92 "silicone fluids for electrical insulation

Трансформаторы с жидким диэлектриком разработаны более 90 лет назад и до настоящего времени имеют следующие неоспоримые преимущества по сравнению с сухими трансформаторами средней и большой мощности.

- более компактны по сравнению с сухими трансформаторами или трансформаторами с литой изоляцией.
- обеспечивают высокую эффективность и более высокий уровень диэлектрической прочности изоляции при небольшой стоимости, подобные эксплуатационные характеристики в сухих трансформаторах достигаются за счет более высокой стоимости.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

- высокую надежность при небольших размерах, что не реализуемо для сухих трансформаторов и трансформаторов с изоляцией из литевой смолы.
- низкий уровень шумов (порядка 60 дБ по сравнению с 67 дБ у сухих трансформаторов).
- возможность предупреждения развития аварийных ситуаций на основе получения прогностической информации без вывода трансформатора из обычного режима работы.

2.1. Основные свойства.

Основные параметры силиконовой трансформаторной жидкости типа СОФЭКСИЛ-ТСЖ™ приведены в таблице.

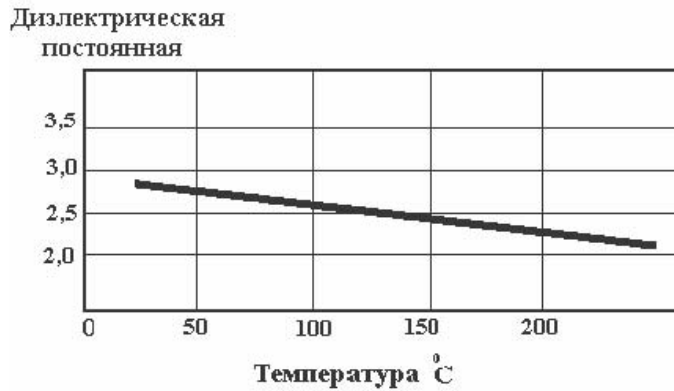
Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
Внешний вид		Кристалльно прозрачная жидкость
Диэлектрическая прочность	кВ (зазор 2,5 мм)	35
Напряжение пробоя	кВ	50
Диэлектрическая постоянная		2,73
Тангенс угла потерь		0,0001
Объемное сопротивление	ом при 20 °С	1×10^{15}
Вязкость,	ССт (мм./сек)	50,0
Плотность	Кг/дм.	0,960
Содержание воды	ppm	50
Температура вспышки в открытом сосуде	°С	300
Коэффициент расширения	1/°С	0,00104
Теплопроводность	кал/(с·см ² ·°С/см)	0,00036
Теплоемкость	кал/г·°С	0,363
Коэффициент расширения	(см ³ /см ³ ·°С)	0,00104
Теплота выделяемая при сгорании	Ккал/гр.	6.13
Температура стеклования	°С	-128
Время желирования при 200°С	Часы	200
Температура самовоспламенения	°С	460

2.2. Функциональные зависимости параметров силиконовой жидкости от окружающих условий.

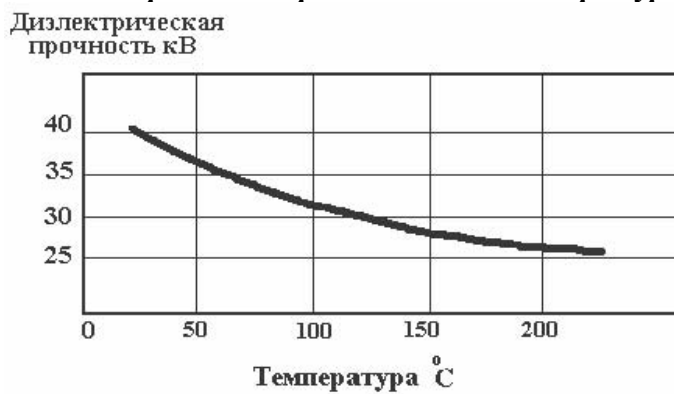
При конструировании трансформаторов во многих случаях необходимо иметь информацию об изменении параметров жидкости при изменении температуры, влажности, загрязнений и т.д.



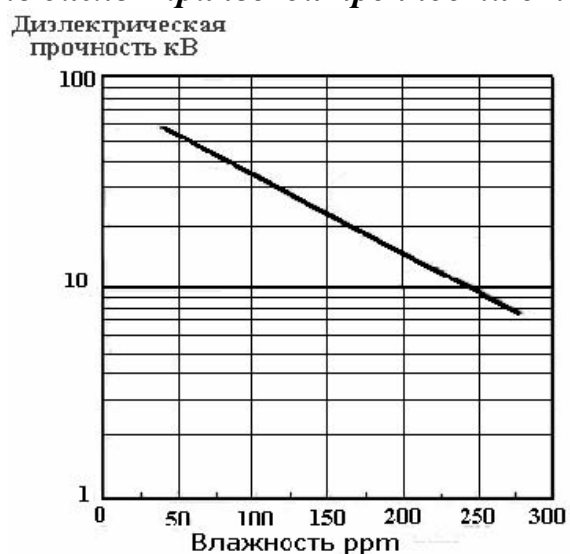
2.2.1. Зависимость диэлектрической постоянной от температуры.



2.2.2. Зависимость диэлектрической прочности от температуры



2.2.3. Зависимость диэлектрической прочности от влажности.



Значения влажности приведены в единицах ppm (одна часть на миллион частей).



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

2.3. Характеристики электрического пробоя.

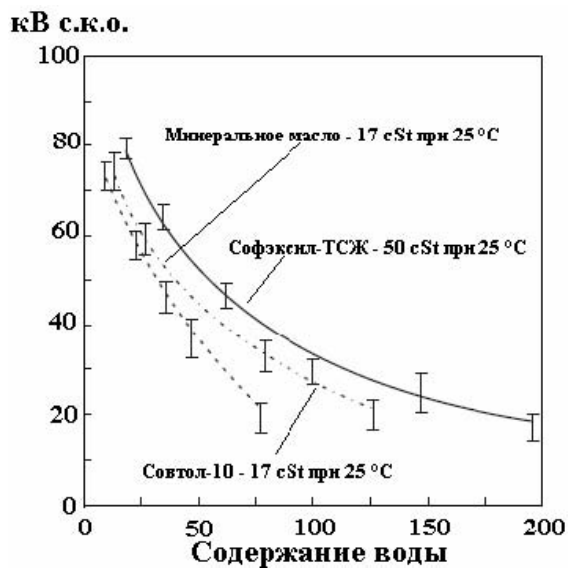
2.3.1. Значения импульсного пробоя (кВ на миллиметр) между сферами .

	Положительный импульс зазор 12,7 мм	Отрицательный импульс зазор 6,1 мм
Силиконовая жидкость	3,18	14,12
Силикон с водой 125ppm	3,22	13,9
Минеральное масло	5	8,15
ПХБ (совтол)	5,1	7,8

2.3.2. Значения импульсного пробоя (кВ на миллиметр) через бумагу толщиной 2x0.25мм пропитанной трансформаторной жидкостью между сферическими электродами.

	Положительный импульс	Отрицательный импульс
Силиконовая жидкость	87	102
Силикон с водой 125ppm	68	78
Силикон+10% ТСВ	112	86
Минеральное масло	63	75
ПХБ (совтол)	125	81

2.3.3. Напряжение пробоя в зависимости от содержания воды.



По вертикальной оси приведены значения среднеквадратичного отклонения переменного тока в киловольтах. Пробой происходит в промежутке 2,5 мм между сферами диаметром 12,5 мм



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

2.3.4. Пробой крафт-картона толщиной 0,25 мм в силиконовой жидкости (статистические результаты)

	Силиконовая жидкость	Минеральное масло
Величина пробойного напряжения при скорости нарастания переменного тока 3 кВ/сек	62,8 кВ/мм	75,7 кВ/мм
Величина пробойного напряжения при скорости нарастания переменного тока 1 кВ/мин	48,4 кВ/мм	47,3 кВ/мм

2.3.5. Зависимость напряжения пробоя от влажности и воздействия воды — 60 Гц, 25°C, скорость нарастания 3 кВ/с

	После вакуума	7 дней при относительной влажности 85%	60 дней контакта с водой
<i>Композитная изоляция: крафт-бумага 0,25мм в силиконовой жидкости</i>			
Напряжение пробоя, среднее, кВ/мм	62 кВ	57 кВ	63 кВ
<i>Композитная изоляция: крафт- бумага 0,25мм в минеральном масле</i>			
Напряжение пробоя, среднее, кВ/мм	75 кВ	69 кВ	69,8 кВ

2.4. Теплофизические свойства трансформаторных жидкостей/

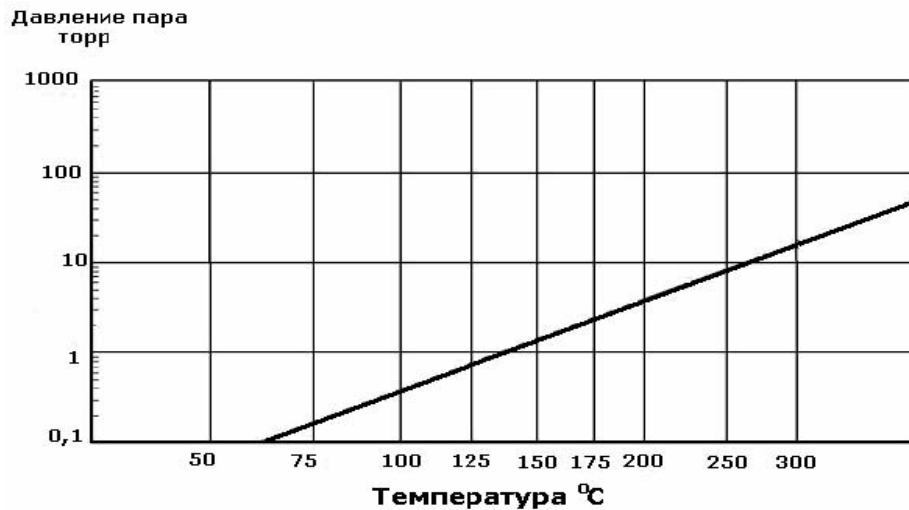
2.4.1. Сравнительные теплофизические характеристики различных трансформаторных жидкостей

Жидкость	Вязкость, сСт	Удельная масса	Коэффициент расширения 1/°C	Теплопроводность кал/(с·см ² ·°C/см)	Теплоемкость кал/г·°C
Силиконовая трансформаторная жидкость	50,0	0,960	0,00104	0,00036	0,363
Совтол	46,4	1,540	0,00123	0,00021	0,260
Минеральное масло	15,0	0,898	0,00073	0,00036	0,488



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

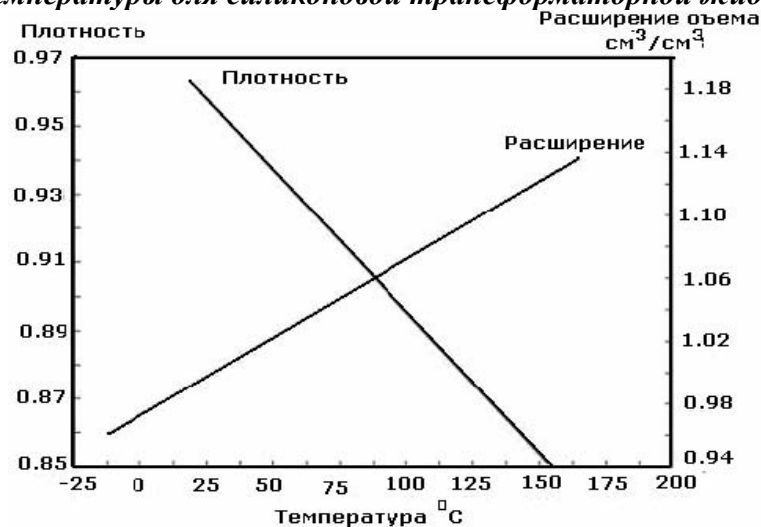
2.4.2. Давление паров в зависимости от температуры.



2.4.3. Коэффициенты расширения для трансформаторных жидкостей

Тип жидкости	Коэффициент расширения (см ³ /см ³ ·°С)
Силиконовая трансформаторная жидкость	0,00104
Минеральное масло	0,00073
Совтол	0,00070

2.4.4. Зависимость плотности и коэффициента объемного расширения в зависимости от температуры для силиконовой трансформаторной жидкости.

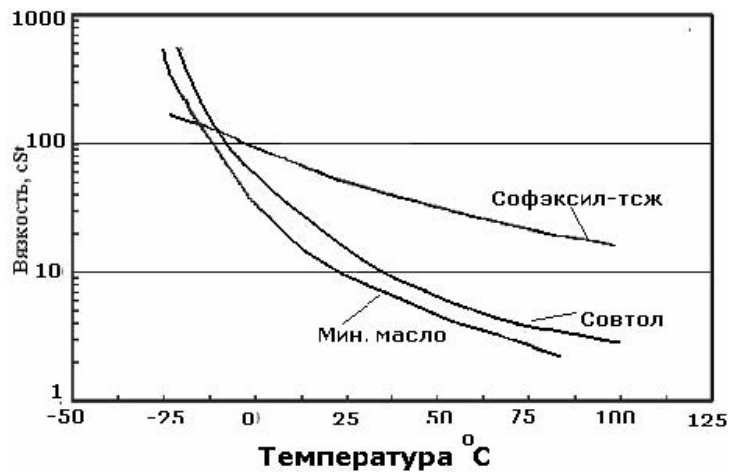




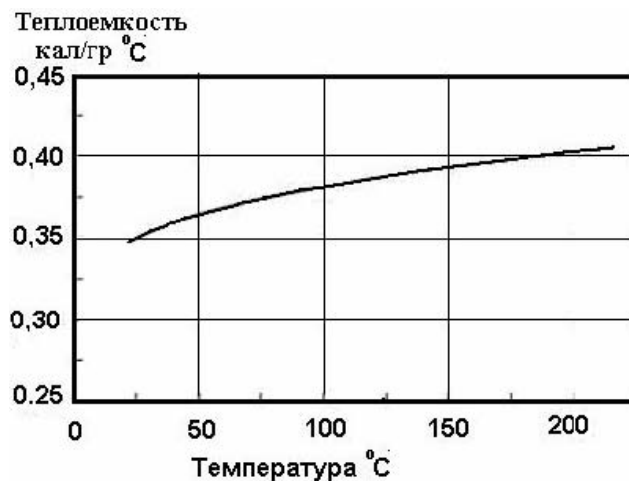
СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

Силиконовая жидкость расширяется сильнее минерального масла или диэлектрика совтол, однако это расширение частично компенсируется способностью силиконовой жидкости поглощать большее количество газа.

2.4.5. Зависимость вязкости от температуры для трансформаторной силиконовой жидкости, диэлектрика ПХБ и минерального масла



2.4.6. График изменения удельной теплоемкости силиконовой трансформаторной жидкости в зависимости от температуры.





СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

2.5. Растворимость газов и воды.

2.5.1 Растворимость воздуха в трансформаторных жидкостях.

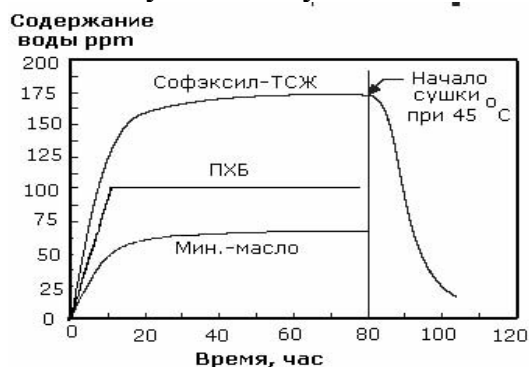
Жидкость	Растворимость воздуха при 25°C при 1 атм
Силиконовая трансформаторная жидкость	16.5%
Минеральное масло	10.0%
Совтол	5.7%

Контроль состояния 81 трансформатора (в США), заполненного силиконовой трансформаторной жидкостью с анализом зависимости давления от температуры в различных эксплуатационных условиях, проводимый в течение 3 лет каких-либо необычайных явлений роста давления или образования вакуума не показал.

2.5.1. Растворимость газов в трансформаторной жидкости

Газ	Растворимость, %
H ₂	8,7
CO	12
CO ₂	73
CH ₄	29
C ₂ H ₂	76
C ₂ H ₄	85
C ₂ H ₄	108
N ₂	11

2.5.2. Поглощение воды различными трансформаторными жидкостями при влажности воздуха 80% и сушка.





СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

Время сушки силиконовой жидкости при температуре 45 °С не превышает 20 часов.

Опыт обращения с силиконовой трансформаторной жидкостью в процессе ее обработки и производства показывает, что силиконовая жидкость может быть обезвожена до очень низкого уровня содержания воды за счет использования обычных или вакуумных печей.

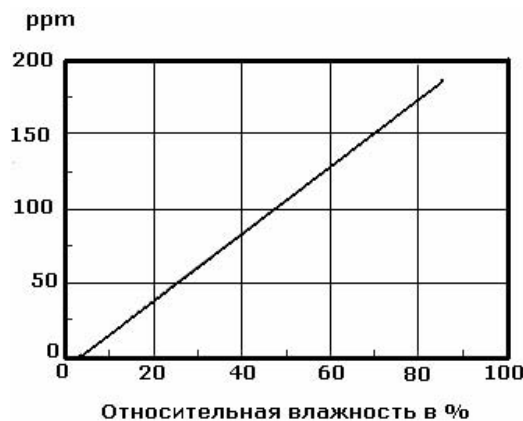
Обычно производители трансформаторов с жидким силиконовым диэлектриком применяют те же методы вакуумно-температурной обработки сухих и насыщенных жидкостью обмоток, как и те, что разработаны для трансформаторов, заполняемых минеральным маслом.

Практический опыт подсказывает, что обезвоживание силиконовой жидкости лучше всего осуществлять в обычном дегазаторе, который работает с вакуумированием до 1 - 2 торр и при температуре от 20 до 80°С. Типовые скорости потока при работе с такими дегазаторами составляют от 15 до 30 литров в минуту

2.5.3. Скорость поглощения влаги силиконовой жидкостью в зависимости от относительной влажности окружающей атмосферы.

Относительное равновесное состояние влажного воздуха и трансформаторной силиконовой жидкости зависит от влажности воздуха и содержание воды в жидкости. Сухой воздух способствует обезвоживанию содержащей влагу жидкости, а влажный воздух добавляет влагу в обезвоженную жидкость. Скорости, с которыми это происходит, зависят от таких факторов, как площадь открытой поверхности жидкости, перемешивание, температура и относительная разность давления паров.

2.5.4. График зависимости равновесного содержания воды в силиконовой трансформаторной жидкости от относительной влажности представлен ниже.



3. Термостойкость.

Силиконовая трансформаторная жидкость отличается от минерального масла и синтетического ПХБ диэлектрика типа совтол тем, что она представляет собой химически однородное вещество, а не смесь, содержащую некоторое количество относительно летучих компонентов. Она существенно более термостойчива по сравнению с упомянутыми двумя жидкостями. Это позволяет подвергать силиконовую трансформаторную жидкость очень высоким температурам, — существенно выше значений, характерных для нормальной работы трансформатора, — без образования избыточного давления паров или коррозионных побочных продуктов.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

В таблице приведены результаты испытаний, демонстрирующих значительную разницу в термостойкости между силиконовой жидкостью и обычными трансформаторными жидкостями. Открытые сосуды с двумя жидкостями подвергались старению в тепловой ванне при температуре 160°C в течение 500 часов. Процесс старения вызывает большое испарение и окисление минерального масла; - все, что остается к концу испытаний – это темный шлам. В отличие от этого с силиконовой жидкостью ничего не происходит; - признаки испарения и окисления отсутствуют. Хотя трансформаторная жидкость не подвергается подобным температурам, полученные результаты свидетельствуют о лучших характеристиках силиконовой жидкости.

3.1. Термостойкость силиконовой трансформаторной жидкости и трансформаторного минерального масла (открытый сосуд, 160°C)

Время старения	Минеральное масло				Силиконовая трансформаторная жидкость		
	Начало	24 часа	100 часов	500 час	Начало	100 часов	500 час
<i>Физические свойства</i>							
Внешний вид	Бледно-желтый	Светло-коричн.	Темно-коричн.	Черный	Чистый, бесцветн.	Чистый, бесцветн.	Чистый, бесцветн.
Потери в массе, %	—	14,4	33,7	75,1	—	0,053	0,141
Вязкость, сSt при 23°C	17,8	19,0	24,5	62,0	49,0	49,5	49,0
<i>Диэлектрические свойства</i>							
Диэлектрическая постоянная, 100	2,26	2,27	2,29	2,46	2,72	2,72	2,72
Коэффициент потерь, 100 Гц,	0,0014	0,00075	0,0039	0,0072	0,000018	0,000018	0,003
Объемное удельное сопротивление, Ом·см.	8,4·10 ¹²	8,7·10 ¹²	2,4·10 ¹²	9,5·10 ¹²	7,1·10 ¹⁴	1,1·10 ¹⁴	5,9·10 ¹⁴

Минеральное масло быстро улетучивается и окисляется при температурах свыше 105°C. Окисление приводит к формированию множества нежелательных продуктов распада. Эти продукты снижают диэлектрические свойства изоляции и приводят к коррозии металлов.

Имеется две формы распада силиконовой жидкости: тепловое разложение и окисление. Тепловое разложение силиконовой жидкости начинается при температурах свыше 230°C. При таких температурах длинные полимерные цепочки начинают медленно распадаться с образованием более летучего циклического силиконового материала.

Окисление силиконовой жидкости происходит очень медленно при температурах свыше 175°C. При окислении силиконовая жидкость полимеризуется с непрерывным повышением вязкости до тех пока не застынет. Этот процесс протекает без образования нежелательных кислот или шламов. Кроме того, диэлектрические свойства удлиненных цепочек молекул силикона аналогичны диэлектрическим свойствам свежей силиконовой жидкости.

Температуры, при которых происходит тепловой и окислительный распад существенно выше очагового нагрева, ожидаемого при работе в трансформаторах на уровне 65°C. При ограниченном количестве кислорода в герметизированных трансформаторах силиконовая трансформаторная жидкость может применяться при нагреве, превышающем стандартный, предусмотренный для других



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

трансформаторных жидкостей.

Предполагается, что силиконовая трансформаторная жидкость существенно не распадается на протяжении всего срока службы трансформатора с нагревом 65°C. По отчетам исследователей после 10000 часов работы при очаговой температуре 220°C трансформатор находился в превосходном состоянии. Силиконовая жидкость при этом оставалась чистой как вода. Характеристики жидкости, полученные в процессе старения, приведены в таблице.

3.2. Свойства силиконовой жидкости с вязкостью 50 сСт в процессе испытаний на долговечность трансформатора с очаговой температурой 220°C

	Исходная жидкость	Через 1650 часов	Через 9000 часов	Через 9000 часов
Общее состояние	Прозрачная жидкость	Прозрачная жидкость	Прозрачная жидкость	Прозрачная жидкость
Электрическая прочность, кВ	35	28	33	28
Тангенс угла потерь, % при 60 Гц, 25°C	0,007	0,01	0,004	0,006
Межфазное натяжение, Дин/см	44,6	40,9	33,7	32,9
Число нейтрализации, мг КОН/г	0,002	0,03	0,05	0,02

3.3. Загрязнение силиконовой жидкости минеральным маслом.

При заполнении силиконовой жидкостью трансформатора, наполненного прежде минеральным маслом, в устройстве всегда остается определенное количество масла. До определенной степени это остаточное масло может раствориться в силиконовой трансформаторной жидкости и может понизить характерную для нее температуру вспышки и температуру воспламенения. Исследования показывают, что максимальный уровень загрязнения в 3% допустим, тогда как большее содержание масла приводит к значительному падению значений температуры вспышки и воспламенения силиконовой жидкости. Такие технологические приемы, как промывка дренированного бака силиконовой жидкостью перед окончательным заполнением, могут минимизировать количество остаточного минерального масла. Опыт показывает, что заново заполненные трансформаторы, в которых прежде использовалось минеральное масло, могут достигнуть более пожаробезопасного статуса только при условии значительных усилий по удалению остаточного минерального масла из бака.

3.3.1. Влияние загрязнения минеральным маслом на температуру вспышки и температуру воспламенения силиконовой трансформаторной жидкости

Уровень содержания минерального масла, %	Температура вспышки °С	Температура воспламенения, °С
0	322	>343
1	241	>343
2	229	>343
3	202	332
5	193	241
10	179	207



3.4. Газовыделение/дугообразование

Выделение газов в процессе образования дуги между электродами Известно, что при низких уровнях тока поддерживать дугу в силиконовой трансформаторной жидкости трудно. Пробой силиконовой трансформаторной жидкости приводит к мгновенному формированию между двумя зафиксированными электродами твердых веществ. Состоящий из двуокиси кремния и углерода «мостик», удерживается желеобразной жидкостью, которая образуется в зазоре между электродами. Характеристики этого «мостика» зависят непосредственно от исходной подводимой энергии тока первоначальной дуги. Обычно дуга гасится, и выделение газа снижается или полностью прекращается.

В условиях образования дуги, объем газов, образующихся в силиконовой трансформаторной жидкости аналогичен тому, что наблюдается для минерального масла. Он составляет примерно 50 мл. на 1 квт/сек для электрической дуги в пределах до 2 квт/сек. Для электрической дуги большей мощности (более 50 квт/сек.) объем выделяемых газов при такой дуге составляет примерно 50 литров на 50 квт/сек. Эти данные показывают, что принципы, используемые при конструировании трансформаторных баков, предназначенных для минерального масла, можно применять и при конструировании трансформаторных баков для силиконовой жидкости.

Анализа газов, образующихся в силиконовой трансформаторной жидкости в процессе слаботочного дугообразования, основным компонентом условий является водород. Однако, кроме того, выделяется и значительное количество угарного газа, СО. Результаты сравнительного анализа показывают, что в случае минерального масла в дополнение к водороду, H_2 , выделяется значительное количество ацетилена, C_2H_2 .

4. Пожаробезопасность

При выборе жидкого диэлектрика особое внимание обычно обращается на поведение жидкости при пожаре. При этом особое значение имеют следующие факторы :

- Выделение тепла.
- Дым и горючие газы.
- Разрастание пожара.
- Газы, выделяемые под действием электрической дуги.
- Выжигание кислорода.
- Простота воспламенения.
- Тушение.

Данные, характеризующие горение, получаются обычно в процессе испытаний, связанных с горением в испытательном бассейне.

4.1. Характеристики горения в испытательном бассейне.

Исследования показывают, что высота пламени при горении углеводородов в 2,5 раза превышает диаметр при диаметре бассейна более 1.2 метра. Скорость горения силиконов уменьшается с увеличением размера бассейна. Высота пламени устанавливается на значениях от 30 до 60 см при диаметре бассейна около 1.2 метра.

После воспламенения силиконовая трансформаторная жидкость достигает максимальной установившейся скорости выделения теплоты. Это пиковое значение сохраняется в течение нескольких минут, а затем уменьшается. Горящий углеводород обычно выделяет максимальное тепло до тех пор, пока весь не выгорит. Пиковое значение выделяемого при горении тепла используется для оценки потенциальной опасности. Пиковое значение для силикона в 10 – 18 раз ниже среднего



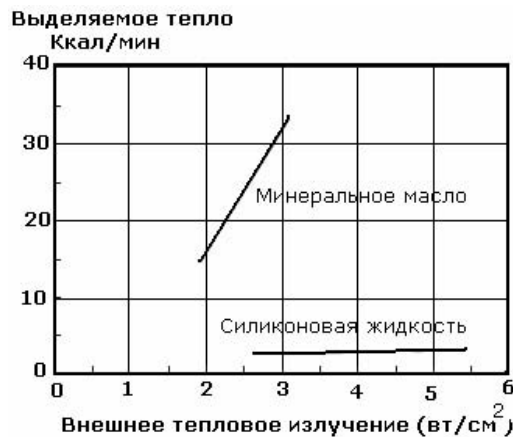
СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

значения для углеводородов.

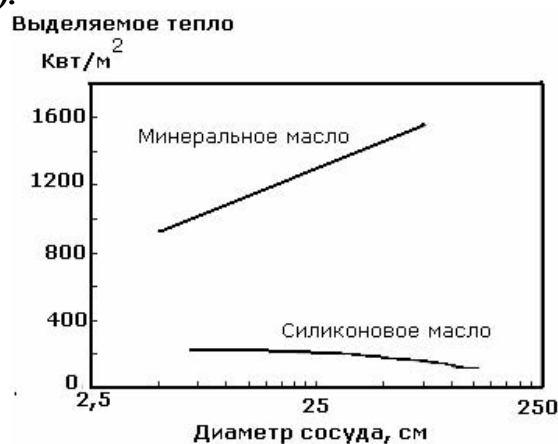
Пожароопасность по отношению к зданиям, конструкциям и оборудованию оценивается по выделению теплоты. В США страховые компании используют показатель скорости выделения теплоты для классификации материалов, используемых в устройстве трансформаторов.

Внешний источник тепла для горячей углеводородной трансформаторной жидкости увеличивает выделение потока тепла. Для силиконовой жидкости с усилением потока внешнего тепла выделение общего тепла увеличивается мало. Это означает, что углеводороды способны усиливать, а силиконовая жидкость способствует этому в малой степени и практически ее вклад вовсе отсутствует.

4.2. Выделяемое тепло при горении минерального масла и силиконовой жидкости в зависимости от значения внешнего дополнительного воздействия.



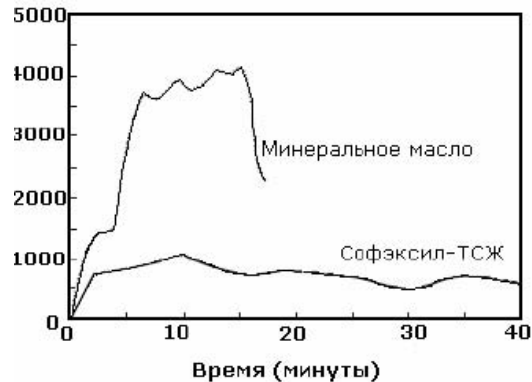
4.3. Нормализованное значение скорости выделения теплоты в зависимости от диаметра сосуда (бассейна).





СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

4.4. Скорость выделения тепла в бту/мин при загорании различных трансформаторных жидкостей в бассейне диаметром 3 метра.



4.5. Дым и продукты горения

Дым при горении силиконовой трансформаторной жидкости обычно в 3-5 раз менее плотный, чем это имеет место для высокомолекулярных углеводородов. Дым состоит из коричнево-серых частиц, практически полностью состоящих из аморфной двуокиси кремния. Скорость выжигания кислорода при испытаниях с той же плотностью дыма составляет 600 л/мин. Исследования на животных показывают, что продукты горения силиконовой трансформаторной жидкости практически безвредны для здоровья, особенно по сравнению с продуктами горения минерального масла или ПХБ диэлектрика.

4.5.1. Основные термохимические свойства силиконовой трансформаторной жидкости.

Свойство	Значение
Вязкость	50сСт
Температура вспышки	300°С минимум
Температура воспламенения	>350°С
Температура самовозгорания	435°С
Легучесть	<0,5%
Теплопроводность	0,00036 кал/с·см·°С при 50°С
Кислородный индекс	18.5-19% O ₂
Теплота сгорания	6,7 ккал/г
Скорость выделения теплоты	100-120 ккал/м ² (в бассейне 1.2м)

5. Совместимость силиконовой жидкости с материалами, используемыми в трансформаторах.

Силиконовая трансформаторная жидкость обладает приемлемой совместимостью с большинством материалов, используемых в трансформаторах, заполняемых синтетическим диэлектриком совтол или минеральным маслом.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

5.1. Используемые в трансформаторах материалы, совместимые с силиконовыми жидкостями

Металлы	Изоляционные материалы	Пластики и смолы	Эмали для покрытия проводов
Медь	Крафт-бумага	Нейлон	Амид-имид
Фосфористая бронза	Прессшпан	Полистирол	Полиэфир
Алюминий	NOMEX(полиамидная бумага)	Акриловые смолы	Амид
Нержавеющая сталь	QUINTEX® (асбестовая бумага)	Поликарбонаты	FORMVAR
Холоднокатанная сталь	MYLAR® (полиэфирная пленка)	Фенольные смолы	ALKANEX®
Горячекатанная сталь	КАРТОН® (полиимидная пленка)	Тефлон	
Никель	Полипропиленовая пленка	Силиконовые смолы	
Магний	Сшитый полиэтилен	Дифенилоксиды	
Цинк	Дерево	Эпоксидные смолы	
Кадмий	Слюда	Полиэфирные смолы	
Дюралюминий			
Титан			
Серебро			
Олово			
Латунь			

Лабораторные испытания показали, что эти материалы совместимы с силиконовыми жидкостями. Однако, поскольку материалы у различных производителей варьируются по составу, необходимо оценивать совместимость комбинаций конкретных используемых материалов.

MYLAR и КАРТОН – торговые марки компании *E.I. Du Pont de Nemours Company, Inc.*

QUINTEX – торговая марка корпорации *Quin-T*

ALKANEX - торговая марка компании *General Electric*

5.2. Материалы, после погружения в течение 30 дней

Бутират ацетилцеллюлозы	Затвердевание
Полиацеталь	Затвердевание и образование трещин
Полиэтилен	Образование трещин от напряжения
Линейный полиэтилен	Образование трещин от напряжения
Поливинилхлорид	Усадка и затвердевание

Необходимо соблюдать осторожность при выборе материала уплотнений и прокладок. Некоторые пластификаторы могут выщелачиваться силиконовыми жидкостями из композиционных резин. Из-за большого разнообразия композиционного состава имеющихся материалов желательно проводить отдельные испытания материала, предполагаемого для использования в качестве



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

уплотнений и прокладок. При выборе материалов для уплотнений и прокладок можно пользоваться следующей таблицей.

5.3. Совместимость с материалами, применяемыми для уплотнений и прокладок

Материал	Несовместимый	Совместимый	Необходимы испытания
Натуральный каучук		√	
KEL-F®		√	
Кремнефтористый каучук		√	
Кремнийорганический каучук	√		
Неопрен			√
TEFLON®		√	
VITON®		√	
G.R.S.			√
EPDM		√	
Нитрил каучук			√
Буна	√		
Полипропилен			√
HYPALON®	√		
S.B.R.			√
E.P.R.			√
CORPRENE®			√

KEL-F - торговая марка компании Kellogg's Professional Products Inc.

TEFLON, VITON, И HYPALON - торговые марки компании E.I. Du Pont de Nemours Company, Inc.

CORPRENE - торговая марка компании Armstrong

Кремнийорганическая (силиконовая) резина применяется в качестве материала для прокладок в трансформаторах, заполняемых жидким синтетическим диэлектриком ПХБ. Силиконовая резина и силиконовая трансформаторная жидкость - очень схожие материалы. Жидкость быстро поглощается в каучуке, вызывая разбухание и потерю физических свойств. Детали из силиконовой резины можно найти в уплотнениях вводов силовых трансформаторов, верхней крышки, переключателей ответвлений, в наливных каналах, каналах для установки измерительной аппаратуры и др. Любые детали из силиконовой резины должны быть заменены на те, которые не разбухают при воздействии силиконовой жидкости.

В случае, если отсутствует опыт использования выбранного материала, то рекомендуется проведения испытаний его совместимости.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

6. Характеристики силиконовой жидкости как теплоносителя.

Эффективность жидкости как теплоносителя зависит не только от вязкости, но также и от следующих ее свойств:

- плотности,
- теплопроводности,
- теплоемкости,
- коэффициента теплового расширения.

Влияние этих характеристик зависит от механизма теплопереноса внутри трансформатора, - используется ли свободная конвекция, принудительная конвекция в ламинарном потоке или принудительная конвекция в турбулентном потоке.

Несмотря на то, что высокая вязкость силиконовой трансформаторной жидкости создает тенденцию к снижению скорости потока, повышенная разница плотности холодной и теплой жидкости повышает термосифонирование в свободном конвекционном потоке внутри трансформатора. Ниже приведены данные тепловых испытаний двух новых идентичных трансформаторов. Один из трансформаторов содержал диэлектрик INERTEEN- ПХБ диэлектрик типа аскарель производства компании *Westinghouse*, а другой – силиконовую трансформаторную жидкость 561.

6.1. Данные тепловых испытаний трансформаторных жидкостей в трансформаторе *Delta 450 LV WYE, 2500 кВА, 13,8 кВ*

Температура °С	Трансформаторная жидкость	Нагрузка, %	Потери, Вт	Нагрев ребер радиатора		Нагрев жидкости в верхней масти °С
				Верх	Низ	
55	Жидкость INERTEEN	100	27900		50,10	49,90
65	Трансформаторная жидкость 561	100	-	50,90 60,00 46,88	60,00	56,00
55	Трансформаторная жидкость 561	100	28000	57,52	46,03	53,00
65	Трансформаторная жидкость 561	100	-		57,28	61,00

Результаты показывают, что, не смотря на различие в распределении температуры обмоток, коэффициент теплопередачи трансформаторной жидкости 561 для данной конкретной конструкции сравним с величиной для INERTEEN.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

6.2. Результаты тепловых испытаний для трансформаторов, перезаполненных силиконовой жидкостью вместо ПХБ диэлектрика.

	ПХБ	Силиконовая жидкость
2240 kVA, 3/60 13800 – 480V		
Нагрев первичных обмоток, °C	61,5	62,7
Нагрев вторичных обмоток, °C	61,7	65,9
Макс. нагрев жидкости, °C	60,0	67,2
2000 kVA, 3/60 13800 – 480V		
Нагрев первичных обмоток, °C	57,3	54,0
Нагрев вторичных обмоток, °C	53,8	57,5
Макс. нагрев жидкости, °C	51,8	58,3

6.3. Теплофизические свойства некоторых трансформаторных жидкостей

Жидкость	Вязкость, сСт	Удельная масса	Коэффициент Расширения	Теплопроводность кал/(с·см ² ·°C/см)	Теплоемкость кал/г·°C
Трансформаторная жидкость 561	50,0	0,960	0,00104	0,00036	0,363
AROCLOR® 1242	17,2	1,380	0,00119	0,00023	0,290
AROCLOR 1254	46,4	1,540	0,00123	0,00021	0,260
WEMCO C™ (минеральное масло)	15,0	0,898	0,00073	0,00036	0,488

AROCLOR – торговая марка компании *Monsanto Chemical*
WEMCO C – торговая марка компании *Westinghouse*.

Исторически в большинстве случаев ПХБ жидкости типа аскарель в трансформаторах меняются на силиконовую трансформаторную жидкость. В последнее время растет число случаев замены минерального масла на силиконовую жидкость. При перезаполнении трансформаторов, в которых прежде находилось минеральное масло, необходимо принимать во внимание результирующую характеристику распределения температур. В зависимости от конструкции трансформатора и особенностей нагрузки, возможно наблюдать температуры выше номинальных. Обычно для самой силиконовой жидкости это не имеет значения, однако, скорость старения обычно используемых изоляционных материалов, как, например, целлюлозы, может зависеть от температуры эксплуатации.

Конструкторы могут компенсировать более высокие температуры, подстраивая уровни нагрузки таким образом, чтобы не превышать расчетную температуру, добавляя внешние вентиляторы радиатора. Для трансформаторов, прежде заполненных минеральным маслом, которые прежде работали не на полной нагрузке замена минерального масла на силиконовую жидкость имеет минимальную, вероятность превышения проектных температур.

Эффективность теплопередачи силиконовой трансформаторной жидкости существенно зависит от конструкции трансформатора; при этом оптимизация некоторых конструкций лучше выявляет преимущества теплофизических характеристик этой жидкости. Например, если

[111141 МОСКВА, 2-й проезд Перова поля 9, \(495\) 232-1108, silicone@sofex.ru](mailto:silicone@sofex.ru)



**СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению**

используется многослойная конструкция обмотки, вертикальные каналы максимально усиливают эффекты сифонирования, возникающие при высоких коэффициентах расширения. С другой стороны, дисковые обмотки более сложные и могут препятствовать свободному вертикальному перемещению потока жидкости.

6.4. Сравнительные характеристики распределения температур нагрева диэлектрических жидкостей в трансформаторах, заполненных минеральным маслом и силиконом.

Пара трансформаторов 25 кВА								Пара трансформаторов 50 кВА							
Испытания проведены при исходном заполнении минеральным маслом								Испытания проведены при исходном заполнении жидкостью 561							
Устройство 1				Устройство 2				Устройство 3				Устройство 4			
Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла	Нагрузка, %	Окруж. темп. °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла	Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла	Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла
75	28	52	24	75	29	63	34	75	26	56	30	75	26	59	33
100	30	69	39	100	30	72	42	100	28	80	52	100	26	82	54
125	31	65	34	125	31	69	38	125	31	92	61	125	31	94	63
150	32	71	39	150	32	73	41	150	28	110	82	150	28	108	80
175	23	75	52	175	23	77	54	175	24	120	96	175	24	119	95
Испытания после замены диэлектрика на жидкость 561								Замена на минеральное масло				Повторный цикл с жидкостью 561			
Устройство 1				Устройство 2				Устройство 3				Устройство 4			
Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла	Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла	Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла	Нагрузка, %	Окруж. темп., °C	Макс. темп. масла °C	Нагрев масла
100	4	39	35	100	4	37	33	100	4	44	40	100	4	42	38
136	14	60	46	136	14	57	43	126	14	68	54	126	14	69	55
162	16	63	47	162	16	63	47	153	15	91	76	175	30	105	75
187	20	82	62	187	20	82	62	175	30	103	73	175	30	105	75



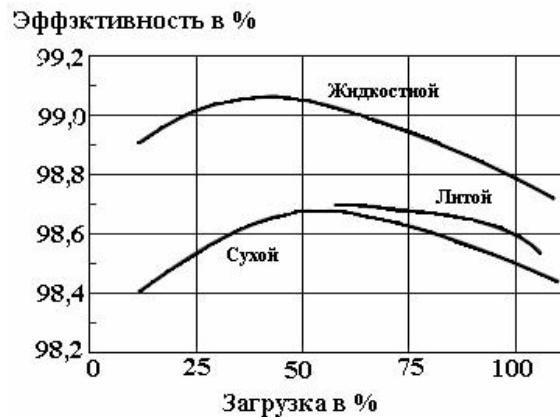
**СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению**

6.5. Диэлектрическая прочность для сухих трансформаторов и трансформаторов с жидким диэлектриком.

Тип трансформатора	Средний нагрев обмоток	Номинал
С жидким диэлектриком Сухой	55/65°C 150°C	95 кВ 60 кВ

Трансформаторы с жидким диэлектриком эффективно отводят тепло от блока сердечника и обмоток. В результате обеспечивается повышенная перегрузочная способность и связанная с этим экономия эксплуатационных затрат и затрат на техническое обслуживание, а также более длительный срок службы изоляции. Особо это относится к трансформаторам с силиконовым заполнением, которые обладают более высокой термостойкостью и большей эффективностью, особенно при низких уровнях нагрузки.

6.6. Показатели эффективности для трансформаторов основных типов



6.7. Сравнительные размеры и весовые характеристики трансформаторов мощностью 1000кВА различного типа и с различными уровнями нагрева.

	Жидкий диэлектрик	Обычный сухой тип		Обмотки, залитые смолой
Нагрев	65°C	150°C	80°C	80°C
Высота	165,0 см	230 см	250 см	230 см
Ширина	150 см	200 см	215 см	215 см
Глубина	190 см	150 см	180 см	140 см
Общий вес	3100 кг	2650 кг	3900 кг	3400 кг

^а По данным производителей трансформаторов
^б Включая глубину радиаторов.



7 Рекомендации по работе с силиконовой трансформаторной жидкостью

7.1 Заполнение трансформаторов

Перед вводом нового трансформатора в эксплуатацию необходимо убедиться в том, что в его баке отсутствует влага и посторонние материалы.

Технология заполнения трансформаторов силиконовой трансформаторной жидкостью существенно не отличается от той, что используется для заполнения трансформаторов минеральным маслом или ПХБ диэлектриком. Хотя рассмотренные ниже технологические приемы являются типовыми, это не означает, что они соответствуют единственному или лучшему способу заполнения трансформаторов силиконовой жидкостью.

Если трансформатор необходимо заполнять вне помещения, особенно в условиях высокой влажности или в дождливый день, необходимо позаботиться о том, чтобы предотвратить попадание влаги внутрь системы. Во избежание конденсации температура внутри трансформатора должна поддерживаться на уровне, превышающем температуру внешнего воздуха на несколько градусов. Подготовку и заполнение устройств, находящихся вне помещений предпочтительно выполнять в сухую, ясную погоду.

7.1.1 Вакуумное заполнение

Поскольку захватываемый при заполнении воздух представляет собой потенциальную проблему для всех трансформаторов с жидким диэлектриком, желательно производить заполнение с вакуумированием. Это делается с трансформаторами, поставляемыми с завода, и в случае практической осуществимости должно выполняться при заполнении трансформаторов в полевых условиях.

Если общепринятый метод вакуумного заполнения трансформаторов не выработан, вне зависимости от того, используется ли непосредственное вакуумирование корпуса трансформатора, или весь трансформатор помещается во вспомогательный вакуумный резервуар, можно использовать процедуры, описанные ниже.

- Произведите вакуумирование и поддерживайте вакуум на постоянном уровне 50 торр в течение не менее получаса для устройств с номиналом 25 кВ или ниже, или в течение четырех часов для устройств с номиналом свыше 25 кВ.
- Поддерживая вакуум, необходимо медленно заполнить трансформатор силиконовой трансформаторной жидкостью до нормального уровня при 25°C или в тех случаях, когда точно это измерить не удастся, необходимо заполнить трансформатор на 90% требуемого объема.
- После заполнения вакуум на установленном уровне следует поддерживать в течение не менее получаса.
- Необходимо добавить нужное количество силиконовой жидкости, чтобы установить нормальный ее уровень и герметизировать бак трансформатора. Во избежание образования конденсата на поверхности силиконовой трансформаторной жидкости не следует открывать трансформатор до тех пор, пока температура в верхней части жидкости не сравняется или не превысит температуру окружающего воздуха.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

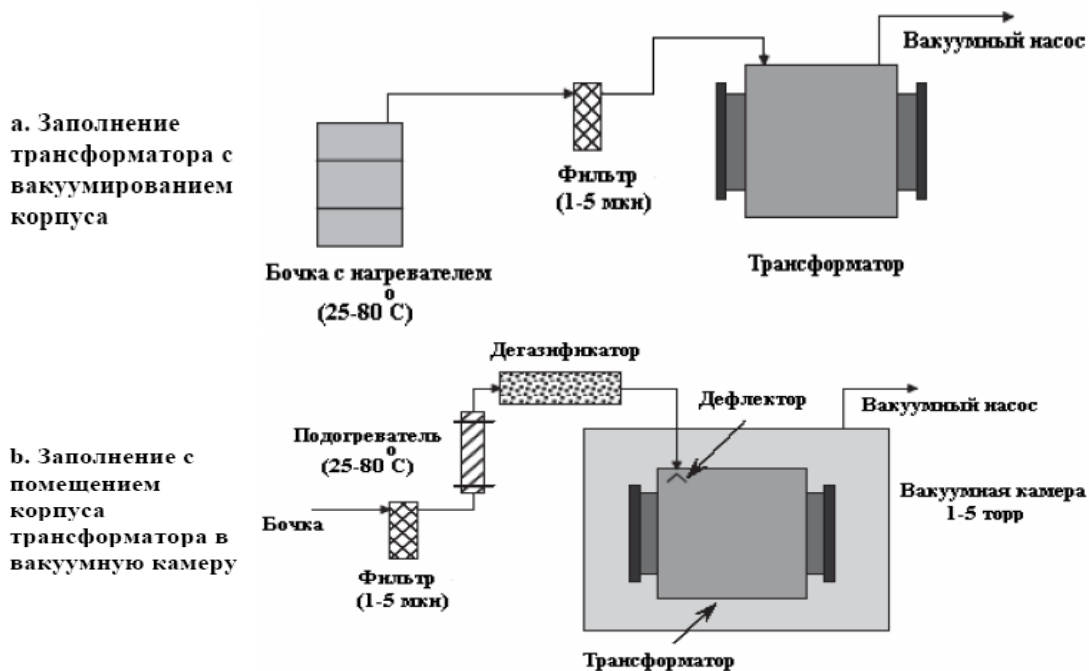
7.1.2 Заполнение без вакуума

В тех случаях, когда трансформатор нельзя заполнить в условиях вакуума, полное напряжение на его обмотки нельзя подавать в течение по крайней мере 24 часов после того, как в корпус трансформатора была залита силиконовая трансформаторная жидкость. Это время необходимо для выхода всех пузырьков воздуха.

Когда это практически реализуемо, заполнение трансформатора для предельного снижения аэрации можно производить через спускной клапан так и дренировать верхнюю часть бака, позволяя воздуху выходить из него. Следует позаботиться о том, чтобы все клапаны и трубы, соединяющие основной бак и любой заполняемый силиконовой жидкостью отсек трансформатора, были открыты, допуская свободную циркуляцию как газа, так и жидкости. Иначе наличие захваченного воздуха или газа в полостях может привести к тому, что уровень силиконовой жидкости в некоторых частях трансформатора останется ниже уровня безопасной эксплуатации.

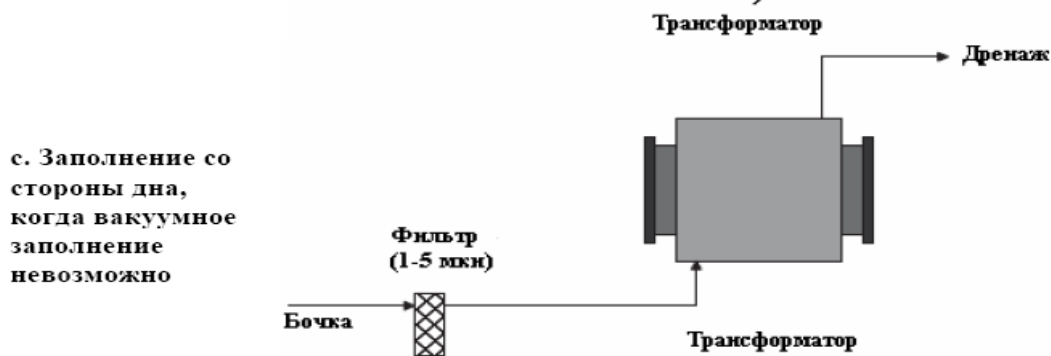
Бак трансформатора и отсеки, если таковые имеются, необходимо заполнить жидкостью при температуре окружающего воздуха до отметки на уровнемере с маркировкой "уровень жидкости при 25°C". Если температура окружающего воздуха при заполнении сильно отличается от 25°C, уровень жидкости снова необходимо проверить сразу после того, как средняя температура жидкости сравняется с температурой окружающего воздуха. Для того чтобы установить уровень силиконовой трансформаторной жидкости на требуемой высоте, необходимо добавить или слить соответствующее ее количество. Трансформатор никогда нельзя эксплуатировать или даже оставлять в нерабочем состоянии, если уровнемер не показывает должный уровень силиконовой жидкости.

7.1.3. *Различные способы заполнения трансформаторов жидкостью.*





СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению



7.1.4. Вакуумная дегазация

Перед использованием в силовых трансформаторах диэлектрические жидкости необходимо профильтровать и подвергнуть дегазации. Идеальные трансформаторные жидкости содержат мало примесей и сохраняют хорошие диэлектрические свойства. Кроме того, в них необходимо поддерживать содержание растворенного воздуха и воды на низком уровне. Жидкость с содержанием растворенного воздуха на уровне существенно ниже предела насыщения, растворяет воздушные пузырьки, удерживаемые внутри изоляции трансформатора, и устраняет эти потенциально слабые места системы изоляции. Вакуумные дегазаторы позволяют снизить содержание растворенной в жидкости воды и газов. Эффективность удаления воды и газов зависит от многих факторов, к которым относятся:

- температура жидкости,
- уровень достигаемого вакуума,
- первоначальное содержание воды в жидкости,
- толщина пленки жидкости,
- время воздействия вакуума,
- наличие факторов, способствующих кипению (например, перемешивание, острые углы, неровные поверхности и т.д.)

Эффективное удаление растворенной воды с помощью вакуумной дегазации связано с необходимостью применения специального оборудования.

Простое воздействие на трансформаторную жидкость вакуумом, или распыление трансформаторной жидкости через сопло в вакуумной камере, или выдержка трансформатора в вакууме могут не обеспечить необходимого уровня дегазации. Дегазация при распылении может оказаться неэффективной, поскольку в условиях вакуума при отсутствии воздуха или газа капли диспергированной жидкости имеют тенденцию принимать сферическую форму, которая минимизирует поверхностное воздействие. Не смотря на то, что размеры капелек очень малы, протяженность необходимой для дегазации диффузионной траектории слишком велика.

Эффективная дегазация наблюдается, когда воздействие вакуума на трансформаторную жидкость предельно усиливается в очень тонкой пленке жидкости. В наиболее эффективных процессах дегазации применяются колонны, в которых трансформаторная жидкость распределяется по большой площади с образованием тонкой пленки, и эта пленка подвергается вакуумному воздействию. При этих условиях происходит быстрая дегазация жидкости.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

Дегазационные колонны могут состоять из более, чем одного каскада, при этом достаточно широко распространены двухкаскадные колонны. Площадь поверхности в дегазационных колоннах увеличивается за счет распределения трансформаторной жидкости по заполняющим колонну тонкостенным стальным кольцам или седлами. Эти устройства, называемые насадочным материалом колонны, выполняются в самых различных конфигурациях, как, например, кольца Рашига, Палла или Нортон или седла Берла и Кишбаума.

Для снижения вязкости в процессе дегазации трансформаторная жидкость может быть нагрета. Соответствующая температура определяется зависимостью вязкости от температуры и состава используемой жидкости.

Цель вакуумной заливки бака трансформатора в первую очередь состоит в обеспечении лучшего импрегнирования за счет удаления воздуха из пустот в твердой изоляции. Эффекты дегазации и осушения трансформаторной жидкости в этом случае минимальны. Поэтому, трансформаторные жидкости должны иметь приемлемые диэлектрические свойства до того, как жидкость будет использована для заполнения трансформатора.

8. Техническое обслуживание

8.1 Проведение периодических проверок и испытаний

Необходимо всегда следовать рекомендациям производителя относительно проведения проверок и испытаний изолирующей (или диэлектрической) жидкости. Необходимо, чтобы отбор образцов жидкости и их тестирование производился через несколько дней после начала работы, и после этого регулярно проверялся уровень жидкости. Также рекомендуются периодические проверки и испытания жидкости. Такие проверки помогут заранее узнать о проблемах, связанных с эксплуатационными характеристиками и надежностью до того, как трансформатор может выйти из строя. На практике возможность выявления осложнений и их коррекции до момента возникновения серьезной неисправности является значительным преимуществом трансформаторов с жидким диэлектриком.

Частота проверок и испытаний зависит от выполняемых трансформатором функций. Рекомендуется проверять заполненные силиконом трансформаторы, работающие при экстремально высоких нагрузках значительно чаще, чем те, для которых условия эксплуатации нормальные или легкие. Анализ регистрационного журнала станции и результатов предыдущих испытаний должен помочь определить соответствующую частоту проведения проверок и испытаний. Промежуток времени между проверками не должен превышать один год, если только конкретный опыт не указывает на возможность продления этого срока.

Подробные указания относительно испытаний силиконовой жидкости содержатся в стандарте ASTM D2225 «Стандартные методы испытаний силиконовых жидкостей, используемых для электроизоляции». Ниже рассмотрены вопросы, относящиеся к визуальному контролю, контролю электрической прочности и содержания воды.



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

Рекомендуемые испытания силиконовой трансформаторной жидкости в процессе технического обслуживания

Испытания	Ссылка	Приемлемые результаты	Неудовлетворительные результаты испытаний указывают на...
<i>Минимальный объем проверок</i>			
Визуальный контроль	ASTM D-2129	Кристаллическая прозрачность	Наличие макрочастиц, свободной воды, изменение цвета.
Пробой диэлектрика	ASTM D-877	>35 кВ для свежей жидкости >25 кВ в трансформаторе	Наличие макрочастиц или воды.
<i>Дополнительные рекомендуемые испытания</i>			
Содержание воды	Modified Karl-Fisher, ASTM D-1533	<100 ppm	Наличие избытка воды.
Объемное удельное сопротивление	ASTM D-1169	$>1 \times 10^{12}$	Наличие воды или загрязнения.
Тангенс угла потерь	ASTM D-1533	<0,2%	Полярное/ионное загрязнение.
Вязкость	ASTM D-445	$50 \pm 2,5$ сСт	Распад или загрязнение.
Температура воспламенения	ASTM D-92	>340°C	Загрязнение горючими веществами.
Кислотное число	ASTM D-974	<0,2	Распад целлюлозной изоляции или загрязнение.

8.2 Визуальный контроль

Трансформаторная силиконовая жидкость представляет собой прозрачную как вода жидкость, которая практически не имеет запаха. Благодаря стойкости и химической инертности этой жидкости в изменение ее внешнего вида не предполагается в течение всего срока службы трансформатора.

Любое изменение цвета, например, на зеленый, красный или голубой, может указывать на экстрагирование примесей из твердой изоляции. Если наблюдается отчетливое изменение цвета, необходимо проверить весь спектр электротехнических параметров, а также значения температур вспышки и воспламенения и уведомить производителя трансформатора. Ухудшения электротехнических параметров может не наблюдаться. Изменение цвета (за исключением белого, серого или черного) не обязательно является сигналом опасности, поскольку маловероятно, чтобы само по себе загрязнение цветными примесями привело к снижению электрической прочности.

Все предназначенные для визуального контроля образцы необходимо отбирать с нижней части оборудования. Макрочастицы и вода собираются в нижних слоях силиконовой трансформаторной жидкости.

9. Повторное использование, переработка или утилизация силиконовой трансформаторной жидкости



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

9.1 Повторное использование

К числу вариантов повторного использования принадлежат следующие:

- Повторное использование материала в том же самом приложении.
- Переработка жидкости, загрязненной водой, макрочастицами или минеральным маслом.
- Специальная переработка жидкостей, загрязненных полихлорированными бифенилами (PCB).
- Составление топливных смесей для извлечения энергии.

В некоторых случаях жидкость можно повторно использовать в том же самом приложении без ее восстановления. Кроме того, часто трансформаторную жидкость можно восстановить, удалив из нее загрязнители, а затем повторно использовать в трансформаторах.

Силиконовая трансформаторная жидкость может также подвергаться вторичной переработке владельцем трансформатора или авторитетной обслуживающей компанией..

9.2 Сжигание и размещение на свалке

Если после тщательного анализа возможности повторного использования или переработки силиконовой трансформаторной жидкости уничтожение остается единственным допустимым вариантом, то следует рассмотреть вопрос ее сжигания.. В случае приготовления топливных смесей и других видов деятельности, связанных с горением, при сжигании необходимо учитывать теплосодержание силиконов и образование в процессе их горения двуокиси кремния.

Абсорбенты или другие твердые материалы, загрязненные трансформаторной жидкостью которые могут появляться в процессе технического обслуживания или очистки при незначительных утечках или разливах (в условиях отсутствия загрязнения полихлорированными бифенилами) могут удаляться на свалку, если это допускают принятые на местном уровне нормы.

10. Соответствие силиконовой жидкости, стандартам и системам классификации

10.1. Федеральные электротехнические правила и нормы 1996

Раздел 450-23 федеральных электротехнических правил и норм (National Electrical Code - NEC), содержит требования по установке трансформаторов с мало огнеопасными жидкими диэлектриками. В настоящей редакции NEC допускается применение мало огнеопасных жидкостей при установке трансформаторов как вне, так и внутри помещений.

Соответствующий текст раздела 450-23 федеральных электротехнических правил и норм, в редакции 1996 г. приведен ниже.

Раздел 450-23

Трансформаторы с наименее воспламеняемыми жидкими диэлектриками. Допускается установка трансформаторов с включенными в номенклатурные перечни наименее воспламеняемыми жидкими диэлектриками, с температурой воспламенения не менее 300°C в соответствии с требованиями, изложенными в пунктах (а) или (b).

(а) Установка внутри помещений. В соответствии с требованиями пунктов (1), (2), или (3):

(1) В зданиях типа I или типа II при выполнении всех следующих требований:

[111141 МОСКВА, 2-й проезд Перова поля 9, \(495\) 232-1108, silicone@sofex.ru](mailto:silicone@sofex.ru)



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

- a. Трансформатор рассчитан на 35 000 В или ниже.
 - b. На площадке не хранятся горючие вещества.
 - c. Имеется зона локализации жидкости
 - d. Установка соответствует ограничениям, предусмотренным для номенклатурного перечня жидкостей.
- (2) С системой автоматического пожаротушения и обеспечением зоны локализации жидкости, при условии, что трансформатор рассчитан на 35 000 В или менее.
- (3) В соответствии с требованиями раздела 450-26.
- (b) Установка вне помещений.** Допускается установка трансформаторов с наименее воспламеняемыми жидкими диэлектриками вне помещений, рядом, вблизи или на крыше зданий при соблюдении требований, представленных в пунктах (1) или (2):
- (1) Для зданий типа I или типа II при установке должны выполняться ограничения, установленные номенклатурным перечнем жидкостей.
- (FPN): Установка вблизи с горючими материалами, пожарными лестницами или дверными и оконными проемами может потребовать применения дополнительных средств защиты, например, таких, как перечислены в разделе 450-27.
- (2) В соответствии с разделом 450-27.
- (FPN №. 1): Определения относительно зданий типа I и типа II даны в документе NFPA 220-1995, Стандартные типы строительных конструкций.
- (FPN №. 2): См. определение относительно “включения в номенклатурный перечень” в статье 100.

10.2. Федеральные правила и нормы по электробезопасности 1996

Ниже приведен соответствующий текст из федеральных норм и правил по электробезопасности в редакции 1996 г. (National Electrical Safety Code - NESC). В этих разделах также признается применение мало огнеопасных трансформаторных жидкостей.

Раздел 15. Трансформаторы и регуляторы

152. Расположение и устройство силовых трансформаторов и регуляторов

A. Установка вне помещений

1. Трансформатор или регулятор должны устанавливаться таким образом, чтобы находящиеся под напряжением части оборудования были закрыты или защищены с предельным снижением возможности непреднамеренного контакта, или находящиеся под напряжением части оборудования должны быть изолированы в соответствии с Правилем 124. Корпус должен быть заземлен в соответствии с Правилем 123.

2. При изоляции трансформаторов с жидким диэлектриком для минимизации опасности возникновения пожара необходимо применять один или большее число следующих методов. Применяемый метод должен соответствовать степени опасности возникновения пожара. К общепризнанным методам относятся применение мало огнеопасных жидкостей, пространственное разделение, устройство огнестойких барьеров, применение автоматических



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

систем пожаротушения, поглощающих подушек и ограждений.

3. При выборе способа пространственного разделения, огнестойких барьеров, автоматических систем пожаротушения, поглощающих подушек и ограждений, которые ограничивают распространение жидкости из поврежденного трансформаторного бака и рассматриваются в качестве общепризнанных мер безопасности, необходимо принимать во внимание количество и характеристики содержащейся в трансформаторе жидкости.

В. Установка внутри помещений

1. Трансформаторы и регуляторы с номиналом 75 кВА и выше, содержащие значительное количество огнеопасной жидкости и расположенные внутри здания, должны устанавливаться в вентилируемых помещениях или специальных камерах, отделенных от остального здания брандмауэрами. Дверные проемы внутри здания должны быть оборудованы противопожарными дверями и располагать средствами удержания жидкости.

2. Трансформаторы или регуляторы сухого типа, или содержащие негорючие жидкости или газы могут устанавливаться в здании без пожарозащитного ограждения. При установках в здании, которое используется для иных чем станционные цели, корпус или ограждение должны быть сконструированы таким образом, чтобы все находящиеся под напряжением части находились внутри корпуса, заземленного в соответствии с Правилем 123. В качестве альтернативы все устройство может заключаться в корпус, чтобы минимизировать вероятность непреднамеренного контакта людей с какой-либо частью корпуса или электропроводки. После установки предохранительный клапан устройства, содержащего биологически не разлагаемую жидкость, должен быть оборудован средствами поглощения токсических газов.

3. Трансформаторы, содержащие наименее воспламеняемые жидкости, могут устанавливаться в здании силовой станции так, чтобы минимизировать опасность возникновения пожара. При выборе пространственного отделения от горючих материалов и конструкций, способов локализации жидкости, огнестойких барьеров, ограждений или систем пожаротушения необходимо учитывать количество содержащейся в устройстве жидкости, тип электрозащиты и дренаж бака.

10.3 Стандарты ASTM

К основным стандартам ASTM, вызывающим интерес с точки зрения спецификации силиконовых трансформаторных жидкостей относятся следующие:

- ASTM D 4652-92—"Стандартная спецификация силиконовой жидкости, используемой для электроизоляции", *Ежегодный сборник стандартов ASTM 1996, т. 10.03*, Диэлектрические жидкости и газы; Электрозащитное оборудование. ("Standard Specifications for Silicon Liquid Used for Electrical Insulation," *1996 Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 10.03, Electrical Insulating Liquids and Gases; Electrical Protective Equipment.)
- ASTM D 2225-92—"Стандартные методы испытания силиконовых жидкостей, используемых для электроизоляции", *Ежегодный сборник стандартов ASTM 1996, т. 10.03*, Диэлектрические жидкости и газы; Электрозащитное оборудование ("Standard Methods of Testing Silicon Fluids Used for Electrical Insulation", *1996 Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 10.03, Electrical Insulating Liquids and Gases; Electrical Protective Equipment.)



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

10.4. Номенклатурные перечни продукции

В требованиях федеральных электротехнических норм и правил (NEC) упоминается, что трансформаторы, заполненные наименее воспламеняемой жидкостью должны быть «включены в номенклатурный перечень». В соответствии с разделом 70 NEC термин «включения в номенклатурный перечень» относится к следующему:

В настоящее время ведение номенклатурных перечней для наименее воспламеняемых жидкостей в соответствии с требованиями NEC организовано в двух основных агентствах: корпорации *Factory Mutual Research* (FM) и в Лаборатории по технике безопасности (*Underwriters Laboratories - UL*). Однако, каждое из этих агентств предъявляет несколько различные требования. Критерии UL основаны на предотвращении взрыва бака трансформатора. Требования FM включают как профилактические меры защиты трансформатора, а также защиты конструкции всего оборудования, основанные на характеристиках горения жидкости. Конкретные приложения должны приспосабливаться к применению того или иного номенклатурного перечня. С точки зрения соответствия требованиям NEC обычно приемлемы оба номенклатурных перечня.

Дополнительную информацию относительно включения в номенклатурные перечни можно получить в UL, FM, и в корпорации *Dow Corning*.

10.5. Аттестация корпорацией *Factory Mutual*

Трансформаторная жидкость 561® аттестована корпорацией *Factory Mutual Research* и может применяться внутри помещений без дополнительной противопожарной защиты при условии установки в соответствии с требованиями раздела 450-23 NEC и соблюдении ограничений номенклатурного перечня FM. Квалификационные требования аттестации FM включают испытание скорости выделения теплоты, когда жидкость вовлечена в процесс горения. Выделение теплоты анализируется по отношению к способности здания противостоять огню.

Показатели теплоотдачи для трансформаторной жидкости 561

Механизм теплоотдачи	Норма теплоотдачи кВт/м ²
Тепловое излучение	25
Конвективная теплоотдача	53
Сумма	78

10.6. Классификационная маркировка UL

Трансформаторная жидкость 561 классифицирована UL как "диэлектрическая среда", а также как "наименее воспламеняемая жидкость в соответствии с NEC 450-23". Этот материал также классифицирован как наименее воспламеняемая жидкость в соответствии с федеральными электротехническими нормами и правилами, NEC, при использовании в трехфазных трансформаторах со следующими ограничениями:

- Применять следует только в трехфазных трансформаторах с баками, способными без разрушения выдерживать внутреннее давление 65 кг\м.. С целью ограничения роста давления и предотвращения разрыва бака из-за формирования газа при нарушениях, вызванных слаботочным дугообразованием, устройства ограничения давления должны устанавливаться на бак трансформатора в соответствии с данными, приведенными в таблице 10.1

- С целью ограничения возможных повреждений, вызываемых сильноточным



СИЛИКОНОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ЖИДКОСТЬ
СОФЭКСИЛ-ТСЖ™
Рекомендации по применению

дугообразованием, для первичной цепи должна быть обеспечена защита от сверхтоков с характеристиками $I^2 t$, не превосходящими значения, приведенные в таблице 10.1. Если конструкция предохранителя предусматривает удаление газа в процессе работы (как, например, в случае выхлопного предохранителя), он должен располагаться вне трансформаторного бака.

Таблица 10.1. Требования по ограничению давления и защите от сверхтоков для трансформаторов с жидким силиконовым диэлектриком

Мощность трансформатора, кВА	Настройка спускового клапана SCFM@15 psig	Максимальная токовая защита ^b $A^2 c$
45	35	700 000
75	35	800 000
112,5	35	900 000
150	50	1 000 000
225	100	1 200 000
300	100	1 400 000
500	350	1 900 000
750	350	2 200 000
1000	350	3 400 000
1500	700	4 500 000
2000	700	6 000 000
2500	500,0	7 500 000
3000	5000	9 000 000
3750	50500	11 000 000
От 5000 до 10 000	5000	14 000 000

^a Давление открытия: максимум 10 фунт/кв.дюйм.

^b Дополнительные требования к тому, что изложено в разделе 450-3 федеральных электротехнических правил и норм в редакции 1993г.