



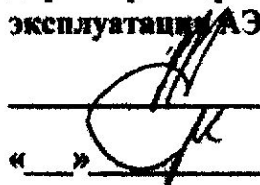
Приложение к приказу
АО «Концерн Росэнергоатом»
от 18.01.2016 № 9/31-11

Открытое акционерное общество
«Российский концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях»

(ОАО Концерн «Росэнергоатом»)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального директора -
директор по производству и
эксплуатации АЭС


А.Г. Жуков
«__» _____ 2015

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО
СРОКА СЛУЖБЫ КАБЕЛЕЙ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ, КОНТРОЛЯ И
ИЗМЕРЕНИЙ НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ**

Методические рекомендации

МР 1.2.1.13.1037-2015

Б Н Т И

НОВОВОРОНЕЖСКАЯ АЭС

К ВХОД. № 32-17
19 01 2016 г.

Предисловие

- 1 РАЗРАБОТАНЫ Федеральным государственным унитарным предприятием "Научно-исследовательский институт приборов" и Технологическим филиалом ОАО «Концерн Росэнергоатом»
- 2 ВНЕСЕНЫ Департаментом инженерной поддержки
- 3 ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом»
от 18.01.2016 № 9/31-17
- 4 ВЗАМЕН РД ЭО 0146-99

Содержание

1	Область применения	1
2	Нормативные ссылки.....	1
3	Термины и определения.....	2
4	Обозначения и сокращения.....	4
5	Основные положения.....	5
6	Методики диагностики состояния и прогнозирования срока службы кабелей с изоляцией из полимерных композиций на основе полиолефинов..	8
6.1	Общие положения.....	8
6.2	Оценка состояния и прогнозирование срока службы кабелей по температуре начала окисления («ТНО – методика»).....	9
6.3	Оценка состояния и прогнозирование срока службы кабелей по ВИ ("ВИ – методика").....	11
6.4	Оценка срока службы кабелей на основе испытаний микрообразцов в ячейке прибора ДСК ("ВИ – ТНО – методика").....	13
7	Методика контроля степени окисления полиэтиленовой изоляции/оболочки.....	17
8	Методика оценки технического состояния кабелей на основе неразрушающего контроля состояния механических свойств пластмассовых оболочек кабелей.....	19
9	Диагностика состояния и прогнозирование срока службы кабелей с изоляцией (оболочкой) из поливинилхлоридного пластика по результатам анализа ИК спектров поглощения.....	24
10	Оценка степени деструкции ПВХ пластика на основе термогравиметрических испытаний микрообразцов.....	30
11	Методика диагностики технического состояния кабелей и проводов с политетрафторэтиленовой изоляцией.....	32
12	Рекомендации по оценке технического состояния кабелей с резиновыми оболочками и изоляцией.....	39
	Библиография.....	46

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО
СРОКА СЛУЖБЫ КАБЕЛЕЙ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ, КОНТРОЛЯ И
ИЗМЕРЕНИЙ НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ**
Методические рекомендации

Дата введения 01.03.2016

1 Область применения

1.1 Настоящие методические рекомендации (далее – МР) предназначены для определения фактического технического состояния и прогнозирования срока службы низковольтных кабелей на АС на основе методов неразрушающего контроля или практически неразрушающего контроля (исследования микрообразцов) пластмассовых материалов изоляции и оболочки.

1.2 Настоящие МР распространяются на низковольтные кабели с пластмассовыми изоляциями напряжением до 1 кВ систем безопасности, важных для безопасности и других систем, важных для эксплуатации в целом.

1.3 Настоящие МР обязательны для технических работников АС, обеспечивающих внедрение и выполнение мероприятий по управлению ресурсными характеристиками кабелей, и для специализированных организаций, принимающих непосредственное участие в техническом диагностировании кабелей.

2 Нормативные ссылки

В настоящих МР использованы ссылки на следующие нормативные документы:

НП-017-2000 Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции

ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения

ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 7866.1-76 Кабели судовые с резиновой изоляцией в резиновой или свинцовой оболочке. Технические условия

ГОСТ 7866.2-76 Кабели судовые с резиновой изоляцией в оболочке из поливинилхлоридного пластика. Технические условия

ГОСТ 7866.3-76 Кабели судовые с изоляцией из кремнийорганической резины или радиационно-сшитого полиэтилена в оболочке из поливинилхлоридного пластика. Технические условия

ГОСТ 28665-90 Резина. Идентификация. Метод инфракрасной спектроскопии

ГОСТ IEC 60811-1-1-2011 Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. Измерение толщины и наружных размеров. Методы определения механических свойств

ГОСТ Р 51372-99 Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем. Общие положения

ПО 1.2.1.02.999.0184-2013 Определение технического состояния и управление старением кабелей на атомных станциях. Положение

СТО СРО-С 60542960 00030-2014 Объекты использования атомной энергии. Требования к противопожарной защите кабельных трасс и кабельных сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации АЭС

МР 1.2.1.13.0018-2011 Методические рекомендации по диагностике дефектов в контрольных кабелях атомных станций

ТПРГ 1.2.6.9. 0072-2011 Типовая программа диагностики кабельных линий на атомных станциях. Требования и рекомендации к разработке и выполнению.

3 Термины и определения

В настоящих МР применены термины по ГОСТ 27.002, ГОСТ 20911, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 алгоритм технического диагностирования (контроля технического состояния): Совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования (контроля).

3.2 диагностирование (техническое диагностирование): Определение технического состояния объектов.

3.3 диагностическое обеспечение: Комплекс взаимоувязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта.

3.4 доминирующий механизм старения: Механизм накопления необратимых неблагоприятных изменений в конструкционных материалах и составных частях элемента, вносящий основной (доминирующий) вклад в процесс старения.

3.5 контроль технического состояния: Проверка соответствия значений параметра объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени.

П р и м е ч а н и е - Видами технического состояния являются, например, исправное работоспособное, неисправное, неработоспособное и т.д. В зависимости от значений параметров в данный момент времени.

3.6 критерий предельного состояния: Признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.

3.7 неработоспособное состояние: Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

3.8 полнота технического диагностирования (контроля технического состояния): Характеристика, определяющая возможность выявления отказов (неисправностей) в объекте при выбранном методе его диагностирования (контроля).

3.9 прогнозирование технического состояния: Определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени.

П р и м е ч а н и е - Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта и вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

3.10 работоспособное состояние: Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской

(проектной) документации.

3.11 предельное состояние: Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

3.12 продолжительность технического диагностирования (контроля технического состояния): Интервал времени, необходимый для проведения диагностирования (контроля) объекта.

3.13 система технического диагностирования (контроля технического состояния): Совокупность средств, объекта и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации.

3.14 средство технического диагностирования (контроля технического состояния): Аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (контроль).

4 Обозначения и сокращения

АС(АЭС)	—	атомные электрические станции
ВВФ	—	внешние воздействующие факторы
ВИ	—	время индукции
ВРК	—	внутриреакторный контроль
ДАФ	—	ди-(н-алкил)-фталат
ДОС	—	ди-(2-этилгексил)-себагинат
ДОФ	—	ди-(2-этилгексил)-фталат
ДСК	—	дифференциальная сканирующая калориметрия
ИК	—	инфракрасный
МР	—	методические рекомендации
НПВО	—	нарушенное полное внутреннее отражение
НД	—	нормативная документация
ОУР	—	относительное удлинение при разрыве

ПВХ, ППВХ	—	поливинилхлорид, пластифицированный поливинилхлорид
ПК	—	персональный компьютер
ПО	—	положение
ПКнОП	—	полимерные композиции на основе полиолефинов
ПС	—	параметр (показатель) состояния
ПТФЭ	—	политетрафторэтилен
(С)ПЭ	—	(сшитый) полиэтилен
ТГ(А)	—	термогравиметрия (термогравиметрический анализатор)
ТКФ	—	трикрезилфосфат
ТНО	—	температура начала окисления
ТПРГ	—	типовая программа
стандарт ASTM	—	стандарт American Society for Testing and Materials (США)

5 Основные положения

5.1 Настоящие МР являются методическими материалами и разработаны на основе методов диагностики (контроля), представленных в техническом документе ПО 1.2.1.02.999.0184. МР распространяются на кабели, указанные в номенклатуре технического документа СТО СРО-С 60542960 00030 и на кабели, находящиеся в эксплуатации на действующих АС.

5.2 Методики основаны на определении и контроле физико-химических свойств полимерных материалов изоляций и оболочек кабелей, в том числе, по их микрообразцам. В качестве определяющих ПС в методиках используются диагностические параметры, характеризующие прямо или косвенно количественные изменения степени деградации кабельных полимерных материалов по доминирующим механизмам старения в условиях ВВФ на АС. Применение в методиках научно-обоснованных и апробированных методов диагностики (контроля) обеспечивает в соответствии с требованиями НП-017-2000 их эффективность в оценках состояния кабелей и обоснованный консерватизм при прогнозировании срока службы.

5.3 Представленные в настоящих МР методики и ПС рекомендуется использовать и для установления механизмов старения кабелей с напряжением выше 1 кВ вплоть до напряжения 6 кВ. При наличии доказательств, что доминирующим процессом деградации изоляции в этих кабелях в конкретных условиях эксплуатации является тепловое старение, допускается использование ПС в качестве определяющих.

5.4 Выбор представительных кабелей, кабельных трасс и "горячих точек" эксплуатации для проведения технического диагностирования и технический осмотр кабельный трасс проводятся в соответствии с требованиями ПО 1.2.1.02.999.0184 (пункты 6.2 и 6.4) и ТПРГ 1.2.6.9.0072. При этом разделяют все помещения эксплуатации на группы с примерно одинаковыми ВВФ по температуре, мощности ионизирующего излучения, влажности, наличию агрессивных сред, механических воздействий и сочетанию перечисленных факторов, с выделением помещений с "горячими точками". В отдельную группу помещений выделяются помещения, в которых возможны проектные аварии.

5.5 При выборе кабелей для технического диагностирования в «горячих точках» рекомендуется выбрать 3-5 кабелей одного типа и диаметра. Диагностика и отбор микрообразцов проводят на обесточенных кабелях.

5.6 Для отбора микрообразцов от диагностируемого кабеля (провода) с поверхности срезают пробы толщиной до 0,3 мм массой от 20 до 30 мг. Участки оболочки (изоляции), с которых взяты пробы, защищают липкой лентой из ПВХ или полиэтилена в зависимости от материала пробы. На кабеле (проводе) укрепляют номерную бирку с датой взятия пробы. При наличии на кабельных трассах концевых и соединительных коробов, они скрываются для среза микропроб непосредственно с концевых участков кабельной изоляции. Микрообразцов должно быть не менее трех.

5.7 Выполнение технического диагностирования кабелей по настоящим МР должно проводиться персоналом специализированной лаборатории, которая должна иметь следующие поверенные средства диагностики и испытаний:

— стандартный микрокалориметр дифференциальный сканирующий с ячейками для работы с микрообразцами массой от 4 до 20 мг в атмосфере инертного

газа и в атмосфере кислорода в температурном диапазоне от 20 °С до 400 °С при работе в изотермическом режиме и обеспечивающий скорость подъема температуры от 2 до 20 град/мин при многоскоростном режиме;

- стандартный инфракрасный Фурье спектрофотометр для диапазона волновых чисел от 4000 см⁻¹ до 400 см⁻¹ с приставкой НПВО для микрообразцов;

- стандартный термогравиметрический анализатор для работы с микрообразцами массой ≥ 20 мг с погрешность взвешивания не более 1% от полной шкалы и рабочим диапазоном температур от 20 °С до 600 °С;

- полимерный (кабельный) индентор с металлическим зондом, обеспечивающий деформацию внешней пластмассовой оболочки кабеля на скорости 12,8 мм/мин на заданную глубину с шагом 0,1 мм в диапазоне от 0,2 до 2,0 мм. Зонд должен быть изготовлен по стандарту ASTM: иметь форму конуса с углом 35 градусов, срезанную вершину конуса с диаметром плоской поверхности 0,79 мм, радиусом скругления от плоской поверхности к конусу по окружности приблизительно равный 0,1 мм;

- стандартную деформационную испытательную машину для определения ОУР и прочности при разрыве образцов полимерных оболочек в соответствии с ГОСТ IEC 60811-1-1-2011;

- аналитические весы, обеспечивающие точность взвешивания не хуже 0,015 мг;

- инструмент (скальпель) для среза микрообразцов с поверхности полимерных кабельных оболочек;

- сушильный шкаф объемом не менее 80 л для проведения термических испытаний кабельных образцов в температурном диапазоне от 70 °С до 150 °С и точностью поддержания температуры ± 2 °С.

5.8 Техническое диагностирование кабелей по настоящим МР должен проводить подготовленный персонал, имеющий опыт работы с оборудованием для диагностики и испытаний, указанным в 5.7, в объеме руководства пользователя этого оборудования. Для работы на ИК Фурье спектрометре необходим опыт анализа

спектров поглощения полимерных материалов в соответствии с требованиями ГОСТ 28665.

5.9 Оценка неоднородностей кабельных линий и поиск дефектов на кабельных трассах электрическими методами проводятся в соответствии с требованиями и рекомендациями МР 1.2.1.13.0018.

6 Методики диагностики состояния и прогнозирования срока службы кабелей с изоляцией из полимерных композиций на основе полиолефинов

6.1 Общие положения

6.1.1 Настоящие методики предназначены для определения технического состояния и прогнозирования срока службы кабелей с изоляцией и оболочкой из ПКнОП, в том числе (С)ПЭ, и других полимерных изоляционных материалов, для которых срок службы определяется содержанием стабилизаторов (антиоксидантов), ограничивающих процессы окислительной деструкции полимера.

6.1.2 Определяющими ПС в методиках являются: температура начала окисления («ТНО – методика») и время индукции («ВИ – методика»), определяемых методом ДСК.

6.1.3 В методиках определяется гарантированно заниженный срок кабелей по периоду индукции, соответствующий достижению ТНО и ВИ для изоляции и оболочки предельных значений. Это означает, что за срок службы в данных методиках принимают время, за которое концентрация антиоксиданта уменьшается от исходного значения до критической величины, при достижении которой инициируется цепное окисление ПКнОП (время цепного окисления зависит от окружающей температуры: при 60 °С оно менее одного года, при 50 °С оно составляет уже несколько лет в соответствии с [1-3]).

6.1.4 Рекомендуемая периодичность технического диагностирования представительных кабелей по данным методикам - 10 лет.

6.2 Оценка состояния и прогнозирование срока службы кабелей по температуре начала окисления («ТНО – методика»)

6.2.1 Для определения ТНО применяется обычный микрокалориметр дифференциальный сканирующий. От исследуемого ПКНОП отбирают не менее трех проб для измерения при одной скорости сканирования в калориметре массой от 2 до 3 мг в виде кусочков приблизительно кубической формы.

6.2.2 Измерения проводят при скорости подъема $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Через ячейку калориметра следует продувать воздух с постоянным потоком (около 40 мл/мин).

6.2.3 Производят измерения теплоемкости при изменении температуры с записью на компьютере. Нагрев продолжают до отчетливого появления на кривой ДСК экзотермического пика, при этом максимальная температура нагрева не должна превышать $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2.4 Для каждой пробы кабеля определяют величину ТНО, которую рассчитывают как температуру в точке пересечения касательных к базовой линии и к низкотемпературному плечу экзотермического пика окисления на кривой ДСК. Полученные значения $TNO(\partial)$, заносят в таблицу по форме, приведенной на рисунке 6.1 для последующего использования в формулах, представленных в настоящих методиках.

6.2.5 Порядок расчета остаточного срока службы. Значение параметра $TNO(\partial)$ при диагностировании сравнивают с предельно допустимым значением параметра $TNO(\kappa p)$ для данной марки ПКНОП, которое определяется опытным путем заранее. В таблице 6.1 приведены исходные $TNO(ис)$ и предельно допустимые значения $TNO(\kappa p)$ для некоторых марок ПЭ изоляций в соответствии с [4].

Кол-во измерений N	$TNO(\partial)$, $^{\circ}\text{C}$	$\overline{TNO(\partial)}$, $^{\circ}\text{C}$	S , $^{\circ}\text{C}$	$TNO(\partial)^{0,95}$, $^{\circ}\text{C}$
1				
2				
3				
4				
5				

Рисунок 6.1 – Форма таблицы для занесения результатов измерений $TNO(\partial)$

Т а б л и ц а 6.1 – Исходные и предельные значения ТНО для различных марок изоляционного полиэтилена

Марка полиэтилена	$TNO(ис), ^\circ C$	$TNO(кр), ^\circ C$
153-10K		204
271-70		206
107-01K, 102-01K	220	180
102-02K, 107-02K	240	190
153-02K, 178-02K	240	190
102-57	300	265
При отсутствии данных о начальных и предельных значениях ТНО для ПКнОП их следует определить заранее в лабораторных условиях		

Проводят обработку результатов, определяя среднее значение величины, среднее квадратичное отклонение S , рассчитывают нижнюю доверительную границу $TNO(\partial)$ при уровне значимости 0,95 при одностороннем критерии по формуле

$$TNO(\partial)^{0,95} = TNO(\partial) - (S/\sqrt{N}) \cdot t(\gamma), \quad (6.1)$$

где $t(\gamma)$ – коэффициент Стьюдента, значения которого выбираются из таблицы 6.2

Т а б л и ц а 6.2 – Значение коэффициента Стьюдента $t(\gamma)$ для 95% уровня значимости при одностороннем критерии.

Число степеней свободы *	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t(\gamma)$	2,92	2,35	2,13	2,02	1,94	1,89	1,86	1,83	1,81
*Число степеней свободы при числе измерений N равно $N-1$									

Определяют остаточный срок службы кабеля по ТНО ($\tau_{ост_TNO}$) по формуле

$$\tau_{ост_TNO} = \tau_0 \cdot \frac{TNO(\partial)^{0,95} - TNO(кр)}{TNO(ис) - TNO(\partial)^{0,95}} \cdot \frac{TNO(ис) + 273}{TNO(кр) + 273}, \text{ лет} \quad (6.2)$$

где τ_0 – срок службы кабеля на момент диагностирования.

Если результаты диагностики свидетельствуют о достижении ТНО предельной величины, то кабель (участок кабеля) необходимо заменить.

6.2.6 Пример определения ТНО и расчет остаточного срока службы кабеля.

Т а б л и ц а 6.3 – Результаты измерений $TNO(\partial)$

Кол-во измерений N	$TNO(\partial), ^\circ C$	$\overline{TNO(\partial)}, ^\circ C$	$S, ^\circ C$	$TNO(\partial)^{0,95}, ^\circ C$
1	210	210	0,7	209,3
2	210			

Кол-во измерений N	$TNO(\partial), ^\circ C$	$\overline{TNO(\partial)}, ^\circ C$	$S, ^\circ C$	$TNO(\partial)^{0,95} ^\circ C$
3	209			
4	210			
5	211			

Расчет нижней доверительной границы $TNO(\partial)$ при уровне значимости 0,95 при одностороннем критерии

$$TNO(\partial)^{0,95} = TNO(\partial) - (S/\sqrt{N}) \cdot t(\gamma) = 210 - (0,7/2,236) \cdot 2,13 = 209,3 ^\circ C.$$

Расчет остаточного срока службы кабеля по ТНО ($\tau_{ост_TNO}$) при исходном значении $TNO(ис)=240^0C$, предельном значении $TNO(к)=190^0C$ после 10 лет эксплуатации кабеля

$$\begin{aligned} \tau_{ост_TNO} &= \tau_{\partial} \cdot \frac{TNO(\partial)^{0,95} - TNO(кр)}{TNO(ис) - TNO(\partial)^{0,95}} \cdot \frac{TNO(ис) + 273}{TNO(кр) + 273} = \\ &= 10 \cdot \frac{209,3 - 190}{240 - 209,3} \cdot \frac{240 + 273}{190 + 273} = 7,0 \text{ лет.} \end{aligned}$$

6.3 Оценка состояния и прогнозирование срока службы кабелей по ВИ ("ВИ – методика")

6.3.1 ПС в данной методике является *ВИ*, которое измеряется на микрообразце полимера в ячейке прибора ДСК при постоянной температуре в атмосфере кислорода. Выбор температуры изотермической выдержки проводится в диапазоне от 180 °С до 240 °С.

6.3.2 Начальное и предельное значение для *ВИ* определяется для каждой марки ПОЛ заранее, на основании корреляционных зависимостей "*ВИ* - ОУР". На рисунке 6.2 такая зависимость представлена для СПЭ марки 102-57. Эта марка применяется для изоляции и внутренней оболочки кабеля типа КПЭТИнг, широко применяемого в системах ВРК. Полученные из этой кривой граничные значения *ВИ* представлены в таблице 6.4 при этом в качестве предельного значения ОУР была выбрана величина 100%, а температура изотермической выдержки в атмосфере азота была равна 220 °С.

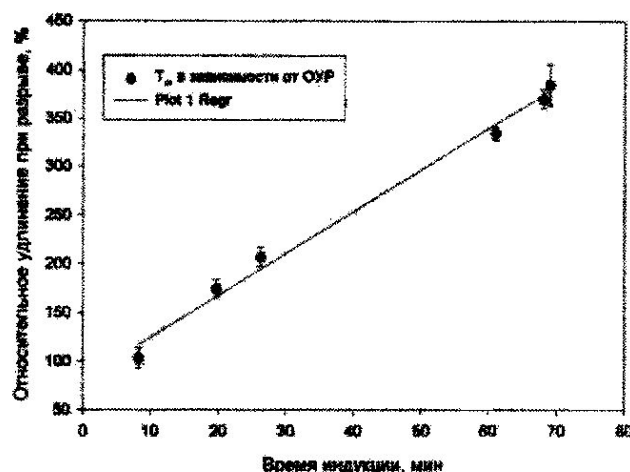


Рисунок 6.2 - Относительное удлинение при разрыве и время индукции при температуре 220 °С для СПЭ внутренней оболочки кабеля КПЭТИнг при терморadiационном старении

Т а б л и ц а 6.4 - Граничные значения параметра *ВИ* для различных кабельных изоляций при температуре на образце 220°С

Изоляционный материал	<i>ВИ(ис)</i> , мин	<i>ВИ(кр)</i> , мин
Изоляция кабеля КПЭТИнг	69	8
Изоляция провода УПР	69	8

6.3.3 Для испытаний по "ВИ – методике" отбирают не менее трех образцов аналогично п.6.2.1. Испытания проводят при изотермической температуре в ячейке ДСК в атмосфере азота. Результаты записывают в таблицу по форме, приведенной на рисунке 6.3.

Кол-во измерений <i>N</i>	<i>ВИ(δ)</i> , мин	$\overline{ВИ(δ)}$, мин	<i>S</i> , мин	$ВИ(δ)^{0,95}$, мин
1				
2				
3				

Рисунок 6.3 - Форма таблицы для занесения результатов измерений *ВИ(δ)*

6.3.4 Проводят обработку результатов, определяя среднее значение величины *ВИ(δ)*, среднее квадратичное отклонение *S*, рассчитывают нижнюю доверительную границу *ВИ(δ)* при уровне значимости 0,95 при одностороннем критерии аналогично (6.1). Определяют остаточный срок службы кабеля по *ВИ* ($\tau_{ост}$) по формуле

$$\tau_{ост} = \tau_{\partial} \cdot \frac{ВИ(\partial)^{0,95} - ВИ(кр)}{ВИ(ис) - ВИ(\partial)^{0,95}} \text{ лет,} \quad (6.3)$$

где τ_{∂} - срок службы кабеля на момент диагностирования в годах.

6.3.5 Пример определения ВИ и расчет остаточного срока службы кабеля.

Т а б л и ц а 6.5 – Результаты измерений $ВИ(\partial)$

Кол-во измерений N	$\overline{ВИ}$, мин	$ВИ(\partial)$, мин	S , мин	$ВИ(\partial)^{0,95}$, мин
1	30	29	0,58	29,2
2		31		
3		30		

Расчет нижней доверительной границы $ВИ(\partial)$ при уровне значимости 0,95 при одностороннем критерии

$$ВИ(\partial)^{0,95} = ВИ(\partial) - (S/\sqrt{N}) \cdot t(\gamma) = 30 - (0,5/1,73) \cdot 2,92 = 29,2 \text{ мин.}$$

Расчет остаточного срока службы кабеля по периоду индукции ($\tau_{ост_ind}$) при исходном значении $ВИ(ис) = 69$ мин, предельном значении $ВИ(кр) = 8$ мин после 10 лет эксплуатации кабеля

$$\tau_{ост_ind} = \tau_{\partial} \cdot \frac{ВИ(\partial)^{0,95} - ВИ(кр)}{ВИ(ис) - ВИ(\partial)^{0,95}} = 10 \cdot \frac{29,2 - 8}{69 - 29,2} = 5,3 \text{ года.}$$

6.4 Оценка срока службы кабелей на основе испытаний микрообразцов в ячейке прибора ДСК ("ВИ – ТНО – методика")

6.4.1 Данная ("ВИ – ТНО – методика") предназначена для оценки срока службы кабелей с полиолефиновой изоляцией и (или) оболочкой при различных температурах эксплуатации.

6.4.2 Методика предназначена только для предварительных оценок срока службы, так как прогнозирование проводится на основе данных, полученных при моделировании старения микрообразцов изоляции в ячейке прибора ДСК при температуре изотермической выдержки $T_{изо}$ в несколько раз превышающую температуру эксплуатации $T_{экс}$. Повторное применение данной методики после старения изоляционного материала в условиях эксплуатации (обычно через несколько лет) позволяет получить прогноз срока службы с заданной достоверностью.

6.4.3 За срок службы в методике принимается время (период) индукции. В методике постулируется, что *ВИ* определяется расходом стабилизатора (антиоксиданта) за счет термоокислительных процессов и рассчитывается по закону Аррениуса в соответствии [1, 4]

$$ВИ = a \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_{экс}}\right), \quad (6.4)$$

где *a* - предэкспоненциальный множитель, измеряется в единицах времени;

E_a - энергия активации процесса окисления, эВ;

T_{экс} - температура эксплуатации, К;

k - константа Больцмана ($k=8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К).

6.4.4 Для определения *E_a* и *a* моделируется процесс термического окисления микрообразцов изоляции в ячейке прибора ДСК. Для определения *E_a* проводят определение *ВИ* при нескольких температурах изотермической выдержки в атмосфере кислорода для определяют из экспериментальной зависимости *ВИ* от температуры изотермического отжига *T_{изо}* в ячейке прибора ДСК. Для определения параметра *a* проводят серию измерений *ТНО* при различных скоростных режимах скорости подъема температуры в ячейке прибора ДСК в воздушной атмосфере.

6.4.5 Для определения энергии активации окисления полиолефиновой изоляции следует подготовить 8 микропроб изоляции (оболочки) кабеля. С помощью ножа из кабеля вырезается кусочек исследуемого материала. Образец измельчается на частицы в виде куба со стороной примерно от 0,3 до 0,5 мм. На лабораторных весах отвешивают $(3 \pm 0,5)$ мг готовых кусочков образца для проведения измерений. Для продувки рабочей камеры прибора использовать инертные газы: аргон, азот. Окисление проводить в кислороде маркой ОЧ. Штуцеры сосудов с сжатыми газами должны иметь редукторы, обеспечивающие подачу газа по коммуникациям со скоростью 0 – 300 мл/мин.

6.4.5.1 Провести измерение *ВИ* для 6 - 8 подготовленных микропроб изоляции в температурном диапазоне от 200 °С до 230 °С. Рекомендуется начинать измерения с температуры 200 °С с шагом 5 °С и проводить измерения так, чтобы только одно

ВИ было по величине менее 10 минут. В противном случае необходимо провести дополнительные измерения при температурах меньших 200°C.

6.4.5.2 Из термограммы определить численные значения *ВИ*. Заполнить таблицу по форме, приведенной на рисунке 6.4, полученными данными и их модифицированными значениями и используя метод наименьших квадратов построить зависимость

$$\ln(VI) = \ln(a) + \frac{E_a}{kT_{изо}}. \quad (6.5)$$

Кол-во измерений <i>N</i>	$T_{изо}, ^\circ\text{C}$	<i>ВИ</i> , мин	$1/kT_{изо}, \text{эВ}^{-1}$	$\ln(VI), \ln(\text{мин})$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Рисунок 6.4 - Форма таблицы для занесения результатов измерений ВИ

6.4.5.3 Определить угловой коэффициент линейного уравнения (6.5), значения которого соответствуют энергии активации E_a . Рассчитывают нижнюю доверительную границу $E_a^{0,95}$ при уровне значимости 0,95 для целей прогнозирования.

6.4.6 Определение постоянного предэкспоненциального множителя для уравнения периода индукции при тепловом старении.

6.4.6.1 Провести измерения *ТНО* при пяти скоростях подъема температуры в ячейке ДСК: 2; 5; 10; 15; 20 град/мин; либо провести измерения *ТНО* 5 раз при скорости подъема температуры 10 град/мин. Полученные результаты записать в таблицу по форме, приведенной на рисунке 6.5.

6.4.6.2 Рассчитать предэкспоненциальный множитель в соответствии с [5]

$$a = \frac{1}{\alpha} \int_{T_0}^{T_{НО}} e^{-\frac{E_a}{kT}} dT, \quad (6.6)$$

где T_0 - температура, с которой начинался нагрев при испытаниях микрообразца в ячейке прибора ДСК (комнатная температура).

α , град/мин	2	5	10	15	20
T_{HO} , °K					
a_i , мин					

Рисунок 6.5 - Форма таблицы для занесения данных T_{HO} при многоскоростных испытаниях и результатов определения предэкспоненциального множителя

6.4.6.3 Для целей прогнозирования рассчитывают нижнюю доверительную границу $a^{0,95}$ при уровне значимости 0,95 (аналогично п.6.2.5), т.е. берется гарантированно заниженное значение, взятое на уровне достоверности 95%.

6.4.6.4 Срок службы рассчитывается по формуле

$$\tau_{ср} = 1,93 \cdot 10^{-6} \cdot a^{0,95} \cdot e^{\frac{E_a}{kT_{экс}}}, \text{ лет.} \quad (6.7)$$

Если расчетный срок службы по формуле превышает 60 лет, то следует считать, что техническое состояние кабеля соответствует исходному состоянию.

6.4.7 Пример прогнозирования срока службы кабеля КПЭТИнг при окружающей температуре 70 °С.

Т а б л и ц а 6.6 – Результаты измерения ВИ для определения энергии активации

Кол-во измерений N	$T_{изо}$, °C	ВИ, мин	$1/kT_{изо}$, эВ ⁻¹	$\ln(VI)$, $\ln(\text{мин})$
1	200	282	24,535	5,642
2	205	249	24,278	5,517
3	210	112	24,027	4,718
4	215	106	23,781	4,663
5	220	64	23,539	4,159
6	225	55	23,303	4,007
7	230	35	23,072	3,555

Определение энергии активации путем построения зависимости $\ln(VI) = \ln(a) + \frac{E_a}{kT_{изо}}$ методом наименьших квадратов (см. рисунок 6.6):

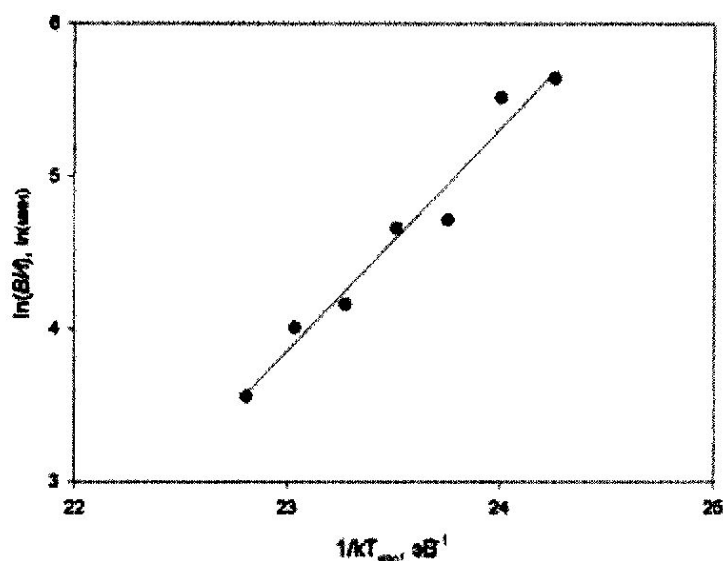


Рисунок 6.6 – Зависимость BI от температуры в ячейке прибора ДСК.
Экспериментальные данные модифицированы для оценки E_a .

Значение энергии активации процесса окисления $E_a = (1,44 \pm 0,12)$ эВ. Нижняя доверительная граница для $E_a^{0,95}$ при уровне значимости 0,95: 1,32 эВ.

Т а б л и ц а 6.7 – Данные TNO при многоскоростных испытаниях и результаты определения предэкспоненциального множителя

α , град/мин	2	5	10	15	20
TNO , °К	549	565	572	581	583
a_i , мин	$5,113 \cdot 10^{-13}$	$5,12 \cdot 10^{-13}$	$3,766 \cdot 10^{-13}$	$4,068 \cdot 10^{-13}$	$3,39 \cdot 10^{-13}$

Среднее квадратичное отклонение $S = 7,906 \cdot 10^{-14}$;

$$t(\gamma) = 1,94;$$

$$\bar{a} = 4,29 \cdot 10^{-13} \text{ мин.}$$

$$a^{0,95} = \bar{a} - (S/\sqrt{N}) \cdot t(\gamma) = 4,29 \cdot 10^{-13} - (7,906 \cdot 10^{-14}/2,65) \cdot 1,94 = 3,71 \cdot 10^{-13} \text{ мин.}$$

Прогнозирование срока службы при температуре эксплуатации 70°C:

$$\tau_{сл} = 1,93 \cdot 10^{-6} \cdot a^{0,95} \cdot e^{\frac{E_a^{0,95}}{kT_{экспл}}} = 1,93 \cdot 10^{-6} \cdot 3,71 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(1,32 \cdot 100000/8,617 \cdot 343) = 17,8 \text{ лет.}$$

7 Методика контроля степени окисления полиэтиленовой изоляции/оболочки

7.1 Настоящая методика предназначена для контроля технического состояния полиэтиленовых оболочек и изоляций кабелей и проводов по степени окисления

(концентрации карбонильных групп) с использованием инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии). Методика может быть использована самостоятельно, либо для определения степени консерватизма методик, представленных в разделе 6. Методики в разделе 6 не учитывают вклада времени окисления в срок службы (при температурах эксплуатации больше 50 °С им можно пренебречь, при температурах меньше 40 °С вклад периода окисления может составлять годы).

7.2 Контроль состояния полиэтиленовых кабельных изоляции осуществляется по концентрации карбонильных групп $C_{КАР}$. За предельно-допустимое значение $C_{КАР}$ в методике принята величина 0,8 моль/кг.

7.3 Для выполнения измерений по методике используется инфракрасный спектрофотометр с приставкой однократного НПВО для диапазона волновых чисел от 4000 см⁻¹ до 1200 см⁻¹.

7.4 От (С)ПЭ оболочки (изоляции) отбирают не менее трех проб в виде микросреза диаметром 2 мм или более, чтобы перекрыть пятно контакта используемой приставки НПВО, и толщиной более 10 мкм. Пробу кладут на контактное пятно приставки со стороны среза и записывают ИК спектр. Проводят коррекцию спектра с целью учета зависимости глубины проникновения светового пучка от длины волны. Рассчитывают степень окисления полиэтилена (концентрацию карбонильных групп) по формуле

$$C_{КАР} = \frac{\ln\left(\frac{T_0}{T}\right)}{\xi \cdot d}, \text{ моль/кг} \quad (7.1)$$

где $C_{КАР}$ - концентрация карбонильных групп, моль/кг;

T и T_0 - пропускание на длине волны 1720 см⁻¹ в максимуме полосы и базовой линии, в %;

ξ - коэффициент экстинкции, равный 200 кг/моль·см [6];

d - толщина образца в см. За толщину d принимается глубина проникновения светового пучка внутрь образца при неполном отражении на длине волны 1720 см⁻¹ и которая рассчитывается по формуле

$$d = \frac{\ln \left(\frac{T_0^{1463}}{T^{1463}} \right)}{985}, \text{ см} \quad (7.2)$$

где T^{1463} и T_0^{1463} - пропускание на длине волны сравнения 1463 см^{-1} в максимуме полосы и базовой линии, в %. Базовую линию проводят через точки спектра на длинах волн 1400 и 1500 см^{-1} . Полученные результаты заносят в таблицу по форме, приведенной на рисунке 7.1, рассчитывают среднее значение степени окисления, значение концентрации карбонильных на уровне значения $0,95$ верхней границы доверительного коридора $C_{кар}^{0,95}$, среднее квадратичное отклонение S . Расчет этих величин проводится аналогично расчетам при определении ПС в разделе 6.

Кол-во измерений N	Степень окисления, моль/кг	$\overline{C_{кар}}$, моль/кг	S , моль/кг	$C_{кар}^{0,95}$, моль/кг
1				
2				
3				
4				
5				

Рисунок 7.1 - Форма таблицы для занесения результатов измерения степени окисления полиэтилена

8 Методика оценки технического состояния кабелей на основе неразрушающего контроля состояния механических свойств пластмассовых оболочек кабелей

8.1 Оценка технического состояния и прогнозирования срока службы кабелей в настоящей методике проводятся на основе контроля механических свойств полимерных оболочек методом локального индентирования с использованием металлического зонда. Зонд перемещается с постоянной скоростью деформируя полимерную оболочку кабеля. Характерна линейная (или почти линейная) зависимость силы давления на материал от перемещения зонда. В методике определяется константа упругости при сжатии (коэффициент жесткости) M и параметр релаксации τ . Типичные зависимости силы давления зонда на материал от перемещения и времени изображен на рисунке 8.1. На участке А-В зонд

вдавливается в материал с постоянной скоростью. На этом участке для большинства полимерных изоляционных материалов, характерна линейная зависимость силы давления на материал от перемещения. Поэтому, модуль сжатия определяется как угловой коэффициент наклона прямой АВ и рассчитывается по формуле (8.1) (даже если зависимость не совсем линейна) в соответствии с [7, 8]

$$M = \frac{F(B) - F(A)}{x(B) - x(A)}, \quad (8.1)$$

где $F(B), F(A)$ - значения силы в точках B и A ;

$x(B), x(A)$ - значения перемещения зонда в точках B и A .

После режима равномерного перемещения зонда следует режим релаксации. Зонд останавливается и из-за релаксационных процессов в материале, сила давления на материал спадает (участок В-С). Зависимость силы от времени на этом участке хорошо описывается зависимостью

$$F = F_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8.2)$$

где F_0 - значение силы в начальный момент времени;

τ - параметр релаксации (время, за которое механическое напряжение в материале упадет в e раз).

По экспериментально снимаемой кривой (рисунок 8.1) этот параметр определяется по формуле

$$\tau = \frac{t(C) - t(B)}{\ln \frac{F(B)}{F(C)}}, \quad (8.3)$$

где $F(B), F(C)$ - значения силы в точках B и C ;

$t(B), t(C)$ - значение времени в точках B и C .

Расчет параметра релаксации по этой формуле производится всегда, даже в случае отклонения экспериментальной кривой от вида, изображенном на рисунке 8.1.

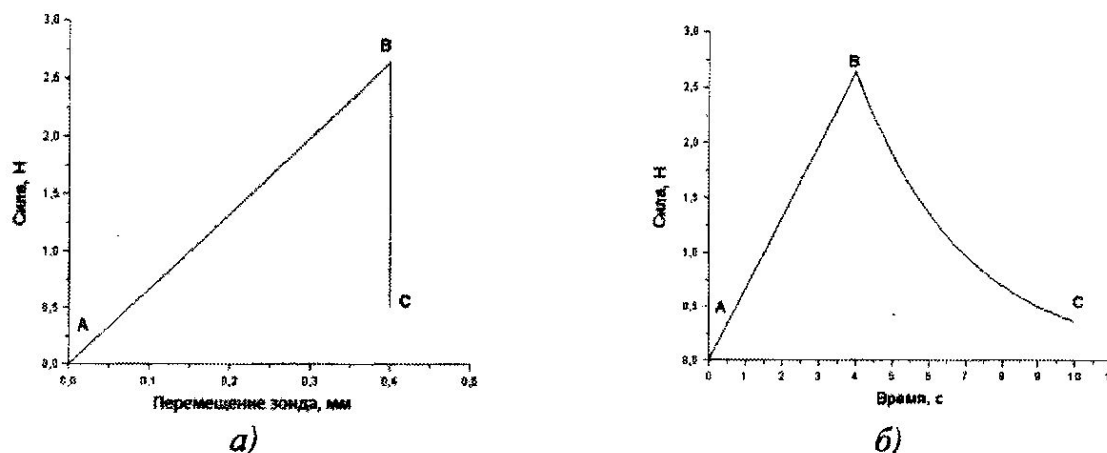


Рисунок 8.1 – Зависимость силы давления зонда на материал от перемещения (а) и времени (б)

8.2 Метод имеет высокую чувствительность к старению полимерных материалов, обусловленных деструкцией молекулярных цепей материалов, например, к окислительной деструкции кабельных резин, и других процессов, приводящих к охрупчиванию, например, десорбция пластификатора из ПВХ пластикутов. Низкую чувствительность метод показывает при оценке старения сшитых полимерных материалов, что качественно понятно.

8.3 Метод предназначен для оценки старения низковольтных кабелей с оболочками и изоляцией из ПВХ пластиката и кабельных резин. Метод применим для кабелей с ПВХ оболочкой и изоляцией напряжением до 6 кВ, например, типа ВВГ, при отсутствии превышения длительной допустимой температуры на жиле кабеля.

8.4 В данной методике используется зонд, изготовленный по стандарту ASTM_----- . Он имеет форму конуса с углом 35 градусов, его вершина срезана таким образом, что диаметр плоской поверхности равен 0,79 мм, радиус скругления от плоской поверхности к конусу по окружности приблизительно равен 0,1 мм.

8.5 Для работы с зондом в методике используется "Кабельный полимерный Индентор EPRI/OGDEN" марки IPAM-2 (далее "Индентор"). Применение "Индентора" позволяет осуществлять непосредственно в эксплуатации неразрушающую диагностику контрольных кабелей с оболочками из кабельных резин, ПВХ (когда преобладает тепловое старение кабеля). Принципиальная схема

индентора и способ измерения приведены на рисунках 8.2 а), б). Скорость перемещения зонда в приборе составляет 12,8 мм/мин.

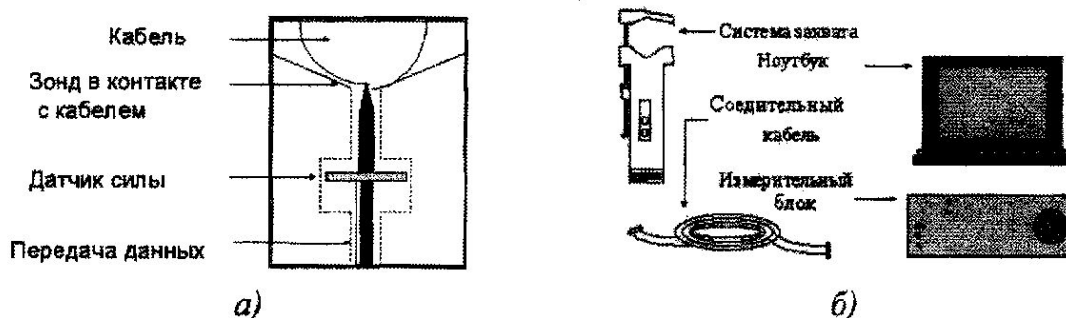


Рисунок 8.2 – Принцип действия кабельного полимерного «Индентора»

8.6 ПС в методе является коэффициент жесткости при сжатии (константа упругости) M , традиционно в данном случае используется размерность $[M] = \text{Н/мм}$. Параметр релаксации τ используется в качестве дополнительного показателя, $[\tau] = \text{с}$.

8.7 Выход из строя оболочек кабеля определяется по возрастанию коэффициент жесткости оболочек до предельно допустимой величины $M_{\text{пр}}$. Эта величина определяется предварительно при лабораторных испытаниях таких кабелей. Для наиболее широко используемых оболочечных материалов исходные M_0 и предельные значения $M_{\text{пр}}$ приведены в таблице 8.1.

Т а б л и ц а 8.1 – Исходные и предельные значения коэффициента жесткости M для различных кабельных оболочечных материалов

Тип материала	Предельно-допустимое значение $M_{\text{пр}}$, Н/мм	Исходное (несостаренное) значение M_0 , Н/мм	Примечание
ПВХ – пластикат, используемый в качестве изоляции и (или) оболочки кабелей КВВГ, КВВГнг, КПоБВнг и других кабелей эксплуатируемых на АС.	86,0	10,0 – 30,0	Для оболочек старых кабелей без "нг" значения M_0 близки к 10,0 Н/мм, в новых кабелях с индексами "нг", "LS", "HF", "FR" близки к 30 Н/мм
Кабельная резина для оболочек кабелей типа НГРШМ	22,0	4,0 – 7,0	
Кабельные резины для изоляции и оболочек кабелей типа КГН, КНР, МРШН и другие	15,0 – 40,0	4,0 – 18,0	Параметр M не является универсальным для всех типов кабельных резин. Для каждого типа кабелей следует предварительно определять исходные и предельные значения

8.8 При проведении работ на кабелях, находящихся в эксплуатации необходимо очистить поверхность кабеля в местах предполагаемых замеров и убедиться, что места измерений доступны для "Индентора" (визуально необходимо оценить возможность охвата кабеля в месте измерения системой захвата).

8.9 Измерения проводить в температурном диапазоне от 18 °С до 28 °С. Допускается проведение измерений при температурах больше 28 °С, при установленной заранее опытным путем зависимости M от температуры. Для ПВХ оболочек кабелей КВВГнг, КПОБВнг и других с ПВХ оболочкой пересчет модуля $M(T)$, измеренного при температуре $T > 20$ °С, к его значению $M(20)$ при 20 °С производить по формуле

$$M(20) = M(T) - 0,037 \cdot T \cdot \exp \{ -4,25 [1000 / (T + 273) - 2,77] \}, \text{ Н/мм.} \quad (8.4)$$

8.10 Измерения следует проводить в разных точках по оболочке кабеля, но не менее трех измерений; результаты занести в протокол.

8.11 Измерения проводить согласно инструкции по эксплуатации прибора "Индентор", при этом допустимые нагрузки и пределы для расчета модуля сжатия выбрать в зависимости от типа оболочки согласно таблице 8.2.

Т а б л и ц а 8.2 - Максимально допустимые нагрузки на зонд и рекомендуемые пределы сил для расчета коэффициента упругости в зависимости от типа материала

Тип материала	Максимально допустимые нагрузки, Н	Пределы для расчета модуля, Н	
		нижний	верхний
Поливинилхлоридный пластикат	9,0	1,5	4,5
Хлорсульфированный полиэтилен	13	4,5	9,0
Этиленпропиленовая резина	9,0	1	3
Кремнеорганическая резина	4,5	1	3,5
Сшитый полиэтилен	9,0	1,5	3,5

8.12 По данным из протокола рассчитывают среднее значение модуля сжатия (M_{cp}), определяют среднее квадратичное (S) отклонение и рассчитывают значение модуля сжатия при уровне значимости 0,95 при одностороннем критерии по формуле

$$M^{0,95} = M_{cp} + (S/\sqrt{N}) \cdot t(\gamma), \text{ Н/мм} \quad (8.5)$$

где N – число измерений;

M_{cp} - среднее значение модуля;

S - среднее квадратичное отклонение;

$t(\gamma)$ – коэффициент Стьюдента.

Если величина $M(\partial)^{0,95}$ равна или превышает значение предельно-допустимой величины $M_{пр}$, то считается, что кабель выработал свой срок службы и подлежит замене.

Определяют остаточный срок службы кабеля по $M(\tau_{ост_M})$ по формуле

$$\tau_{ост_M} = \tau_0 \cdot \frac{M_{пр} - M(\partial)^{0,95}}{M(\partial)^{0,95} - M_0}, \text{ лет} \quad (8.6)$$

где τ_0 - срок службы кабеля на момент диагностирования в годах.

Если не определено начальное значение M_0 для конкретного типа кабеля, то для подстановки в формулу (8.6.) при прогнозировании из таблицы 8.1 выбирается наименьшее значение M_0 для обеспечения консервативного подхода.

9 Диагностика состояния и прогнозирование срока службы кабелей с изоляцией (оболочкой) из поливинилхлоридного пластика по результатам анализа ИК спектров поглощения

9.1 Настоящая методика устанавливает порядок определения ПС оболочки/изоляции кабелей в эксплуатации из ПВХ пластика по остаточной суммарной концентрации пластификаторов $C_{пл}$ и величине оптической плотности сопряженных связей $I_{C=C}$. Их определение связано с анализом и оценкой величины характерных линий поглощения ИК спектров микросрезов полимерных материалов на ИК Фурье спектрофотометре с приставкой НПВО.

9.2 Выбор в качестве ПС $C_{пл}$ и $I_{C=C}$ обусловлен доминирующими механизмами старения ППВХ кабелей в условиях эксплуатации на АЭС. При окружающей температуре ниже 100°C и отсутствии других деградиационных факторов старение изоляции/оболочки кабелей из ППВХ обусловлено десорбцией пластификаторов. Лимитирующей стадией десорбции для низкомолекулярных компонент-пластификаторов является стадия удаления их с поверхности. При более высоких температурах старение ППВХ обусловлено процессом дегидрохлорирования, в результате которого происходит реструктурирование полимера, образование сопряженных диеновых групп. При терморadiационном старении помимо процесса десорбции пластификатора протекают процессы прямого разрушения пластификаторов и стабилизаторов радиацией, деструкция и структурирование высокомолекулярных цепей.¹ Деструкция высокомолекулярных цепей ППВХ пластика возможна также при высокой окружающей влажности и повышенной температуре.

9.3 В качестве пластификаторов ППВХ используются сложные эфиры фталевой кислоты, себаценовой, фосфорной кислот с алифатическими (алил-) и ароматическими (арил-) спиртами. Наиболее распространенными из них являются:

- ди-(н-алкил)-фталат (ДАФ);
- ди-(2-этилгексил)-фталат (ДОФ);
- ди-(2-этилгексил)-себаценоат (ДОС);
- трикрезилфосфат (ТКФ).

9.4 Для анализа ИК и определения ПС спектров ППВХ в соответствии с [9 - 11] выбраны следующие характерные полосы поглощения:

- 1720 см⁻¹ от валентной двойной связи $>C=O$ сложноэфирной группы (интенсивность этой полосы характеризует суммарное содержание пластификаторов ДОФ, ДАФ, ДОС);

¹ В настоящее время не допускается применение кабелей с ППВХ изоляцией и оболочкой в полях ионизирующих излучений и в местах возможных проектных аварий

- 1190 см^{-1} от валентной связи $> P - O - C_{арил}$ (интенсивность этой полосы характеризует содержание ТКФ);
- 1650 см^{-1} от валентной связи $> C = C <$ (интенсивность этой полосы характеризует величину сопряженных связей).

9.5 Концентрация пластификатора ТКФ определяется по формуле

$$C_{\text{ТКФ}} = C(0)_{\text{ТКФ}} \frac{D^{1190}}{D_0^{1190}}, \quad (9.1)$$

где $C(0)_{\text{ТКФ}}$ - начальная концентрация ТКФ (~6%);

D_0^{1190} - начальная оптическая плотность характерной полосы ТКФ;

D^{1190} - текущая оптическая плотность характерной полосы ТКФ.

9.6 При отсутствии старения ППВХ за счет деструкции высокомолекулярных цепей величина оптической плотности сопряженных связей $I_{C=C}$ принимается равной 0,005. Предельная величина $I_{C=C}$ в настоящей методике равна 0,087.

9.7 Концентрация пластификатора ДОФ, ДАФ, ДОС определяется по корреляционной зависимости «оптическая плотность пика 1720 см^{-1} – концентрация пластификатора», указанной на рисунке 9.1.

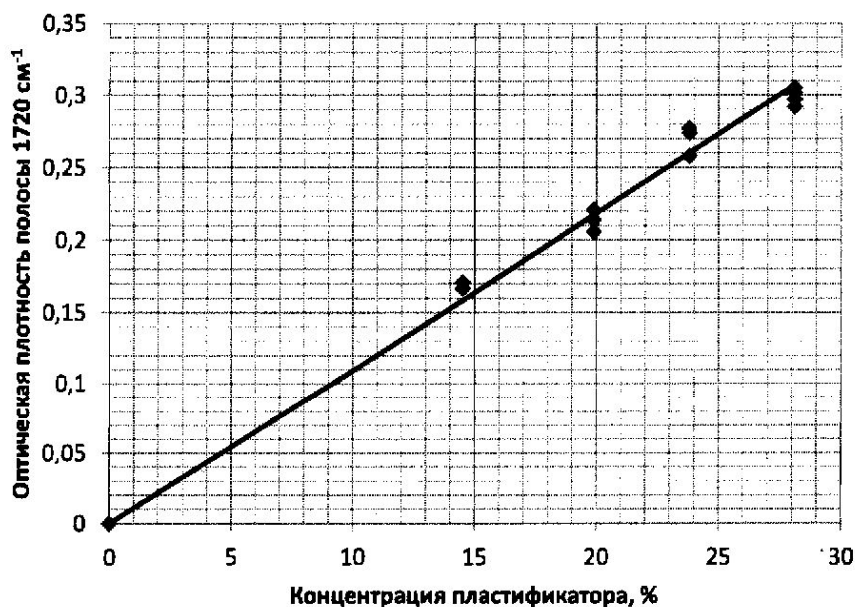


Рисунок 9.1 - Корреляционная зависимость между оптической плотностью пика 1720 см^{-1} и концентрацией пластификатора

9.8 За предельные значения остаточной концентрации пластификатора в данной методике приняты следующие величины:

13% - для оболочки/ изоляции кабеля, трасса которого проходит в помещении;

15% - для оболочки/ изоляции кабеля, трасса которого проходит по улице;

25% - для изоляции кабеля ППВХ с оболочкой, трасса которого проходит в гермообъеме энергоблока АЭС и попадает по проекту в зону проектных аварий.

9.9 Начальная концентрация пластификатора определяется маркой (рецептурой) ППВХ пластика в соответствии с [4] (см. таблицу 9.1).

Т а б л и ц а 9.1 - Начальная концентрации пластификаторов в различных рецептурах несостаренного ПВХ пластика, применяемых до 2004 года

Марка (рецептура)*	Типы пластификаторов**	Концентрация пластификаторов, %
И40-13А (8/2)	ДОФ	32
ИТ-105 (Т-50)	ДДДФ	38
О-40 (ОМ-40)	ДАФ+мел	32
О-40 (239)	ДАФ+ТКФ	34
О-40 (239/1)	ДАФ+ТКФ	35
О-40 (288)	ДОФ+ТКФ	37
О-50 (301)	ДОС+ТКФ	32
НГП40-32	ДОФ+ДОС	30
* Для марок ППВХ, применяемых после 2004 года, следует предварительно определять начальные и предельные значения концентрации пластификаторов		
** ДАФ – ди-(н-алкил)-фталат; ДДДФ – дидодецилфталат, ДОФ – ди-октил-фталат; ДОС – ди-октил-себацнат; ТКФ – трикрезилфосфат; НГП – не распространяющий горение пластикат –		

9.10 Для выполнения измерений применяется инфракрасный Фурье спектрофотометр с приставкой НПВО для микрообразцов в диапазоне волновых чисел от 4000 см^{-1} до 600 см^{-1} . Вспомогательные устройства:

- пробоотборник в виде металлической трубки с отверстием (диаметр внутренний равен 1,5 мм, диаметр внешний равен 1,65 мм, длина равна 60 мм);
- выталкиватель образцов в виде металлического стержня (длина равна 70-80 мм, диаметр меньше 1,5 мм);
- скальпель или нож с тонким лезвием.

9.11 Включают ПК и спектрометр. Время прогрева спектрометра – 60 мин. От оболочки/изоляции кабеля отбирают не менее двух образцов в виде микросрез

площадью от 1 до 1,5 см² и толщиной более 20 мкм. Перед каждым измерением спектра или после проводят измерение фона с целью учета поглощения воздуха при использовании однолучевого спектрофотометра. Подготовленный микросрез оболочки/изоляции помещают на твердую подложку внутренней поверхностью среза вверх, "вырезают" пробоотборником образец для измерения и помещают его на поверхность приставки спектрофотометра так, чтобы внутренняя поверхность среза попала на контактное окно спектрофотометра. Измеряют спектры для всех микрообразцов, количество которых должно быть не менее четырех. Обработывают полученные спектры при трех значениях волновых чисел: $\nu_1 = 1720 \text{ см}^{-1}$; $\nu_2 = 1650 \text{ см}^{-1}$; $\nu_3 = 1190 \text{ см}^{-1}$, записывая максимальные значения оптических плотностей соответствующих этим волновым числам. Результаты для всех "n" образцов заносят в таблицу по форме, приведенной на рисунке 9.2.

9.12 Рассчитывают концентрацию пластификатора по значениям оптической плотности при значениях волновых чисел ν_1 и ν_3 , используя корреляционную зависимость на рисунке 9.1 и формулу 9.1 соответственно. Оценивают суммарную остаточную концентрацию пластификатора, результаты заносят в таблицу по форме, приведенной на рисунке 9.3.

Номер образца	Оптическая плотность при разных значениях волновых чисел		
	1720 см ⁻¹	1190 см ⁻¹	1650 см ⁻¹
1			
...			
n			

Рисунок 9.2 – Форма таблицы для занесения результатов измерений микрообразцов

Номер образца	Концентрация пластификатора, %		
	ДОФ, ДАФ, ДОС	ТКФ	Суммарная концентрация пластификатора
1			
...			
n			

Рисунок 9.3 – Форма таблицы для занесения остаточной концентрации пластификатора в микрообразцах

9.13 Проводят обработку результатов из таблицы, форма которой представлена на рис. 9.2, аналогично п. 6.2, определяя среднее значение величин $C_{nl}(\delta)$ и $I_{C=C}$, их среднее квадратичное отклонение S , рассчитывают нижнюю доверительную границу для этих величин при уровне значимости 0,95 при одностороннем критерии.

9.14 Расчет остаточного срока по остаточной концентрации пластификатора C_{nl} проводят по формуле

$$\tau_{nl} = t(\delta) \cdot \frac{\ln C_{nl}^0 - \ln C_{nl}^{pp}}{\ln C_{nl}^0 - \ln C_{nl}^{0,95}(\delta)} \text{ годы,} \quad (9.2)$$

где $t(\delta)$ – время на момент диагностирования в годах;

C_{nl}^0 – исходное содержание пластификатора;

C_{nl}^{pp} – предельное содержание пластификатора;

$C_{nl}^{0,95}(\delta)$ – значение диагностируемого значения C_{nl} на уровне достоверности 0,95.

9.15 Прогнозирование по параметру $I_{C=C}$.

Определяют остаточный срок службы кабеля по $I_{C=C}$ по формуле

$$\tau_{C=C} = \tau_{\delta} \cdot \frac{I_{C=C}^{pp} - I_{C=C}(\delta)^{0,95}}{I_{C=C}(\delta)^{0,95} - I_{C=C}^0}, \text{ лет} \quad (9.3)$$

где τ_{δ} – срок службы кабеля на момент диагностирования в годах;

$I_{C=C}^{pp}$ – предельное значение;

$I_{C=C}^0$ – исходное значение;

$I_{C=C}(\partial)^{0,95}$ - диагностируемое значение на уровне достоверности 0,95 оптической плотности.

9.16 Сравнивают расчетные значения и, за остаточный срок службы принимают наименьшее значение из этих значений.

10 Оценка степени деструкции ПВХ пластиката на основе термогравиметрических испытаний микрообразцов

10.1 Настоящая методика предназначена для определения остаточного срока службы кабелей с изоляцией и оболочкой из ПВХ пластиката. Методика может быть применена:

- самостоятельно для прогнозирования срока службы кабелей в условиях воздействия внешних факторов, приводящих к старению ППВХ за счет доминирования процесса деструкции высокомолекулярных цепей, главным образом, в условиях воздействия ионизирующей излучений и/или повышенных влажности и температуре;
- совместно с методикой, представленной в разделе 9, для оценки степени деструкции высокомолекулярных цепей вместо или дополнительно к оценке, по проводимой по такому ПС как $I_{C=C}$.

10.2 В качестве ПС в методике используется показатель $TG5\%$, определяемый как температура на термогравиметрической кривой (ТГ), соответствующая потере массы образца на 5% по сравнению с исходной массой (см. рисунок 10.1) в соответствии с [7]. Изменение величины $TG5\%$ для образцов кабелей, состаренных под воздействием облучения при температурах ниже 70°C , описывается выражением в соответствии с [7]

$$TG5\% = TG5\%(0) \cdot \left(1 - r \cdot P^n \cdot t\right), \quad (10.1)$$

где $TG5\%(0)$ - значение величины $TG5\%$ для несостаренного образца;

r и n – константы для данного материала;

P – мощность дозы;

t - время старения.

Измерение параметра необходимо проводить в тигле термогравиметрического анализатора в отсутствие кислорода, например, в азоте. Параметр $TG5\%$, получаемый из ТГ, дает прямую оценку степени старения ППВХ вследствие деструкции молекулярных цепей и при температурах старения меньших 70°C не зависит от температуры (см. рисунок 10.2).

10.3 Для определения $TG5\%$ необходим термический анализатор для проведения термогравиметрического анализа микропроб образцов кабелей весом от 3 до 100 мг. Типичные значения параметра $TG5\%$ для несостаренного полимера от 270°C до 280°C , предельное значение – от 190°C до 200°C . Для ПВХ оболочек кабелей систем внутриреакторного контроля типа КПЭТИнг исходное значение $TG5\%$ равно 276°C , а предельное - 200°C .

10.4. Проводят обработку результатов аналогично п.6.2, определяя среднее значение величины $TG5\%(\bar{\theta})$, среднее квадратичное отклонение S , рассчитывают нижнюю доверительную границу $TG5\%(\bar{\theta})$ при уровне значимости 0,95.

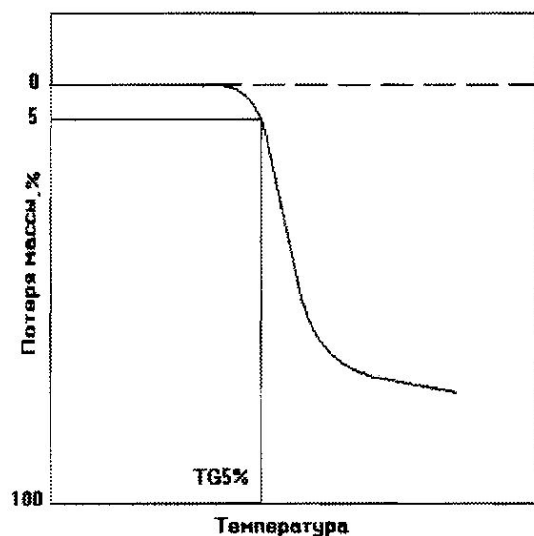
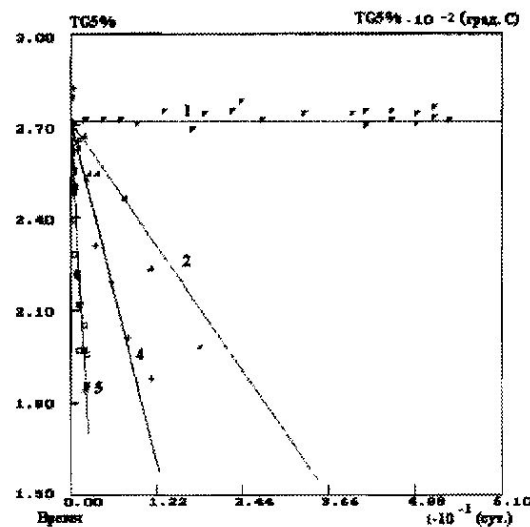


Рисунок 10.1 - Схема определения параметра $TG5\%$ из термогравиметрической кривой



- 1) тепловое старение при 87°C ;
- 2) $P=0,1$ Гр/с, $T=25^{\circ}\text{C}$;
- 3) $P=0,03$ Гр/с, $T=25^{\circ}\text{C}$;
- 4) $P=0,6$ Гр/с, $T=25$ и 55°C

Рисунок 10.2 - Изменение параметра $TG5\%$ в образцах из ППВХ-оболочки кабеля КПЭТИнг при разных режимах терморadiационного старения

10.5. Расчет остаточного срока по параметру $TG5\%$ проводится по формуле

$$\tau_{TG} = t(\partial) \cdot \frac{TG5\%(0) - TG5\%(Pr)}{TG5\%(0) - TG5\%(\partial)^{0,95}} \text{ годы,} \quad (10.2)$$

где $t(\partial)$ – время на момент диагностирования в годах;

$TG5\%(0)$ – исходное значение;

$TG5\%(Pr)$ - предельное значение $TG5\%$.

11 Методика диагностики технического состояния кабелей и проводов с политетрафторэтиленовой изоляцией

11.1 Методика предназначена для мониторинга технического состояния и оценки остаточного срока службы контрольных кабелей и проводов, в дальнейшем проводов, с политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) изоляцией на атомных электростанциях. Методика распространяется на кабели (провода), изолированные пленкой из фторопласта-4 (МК27-11, МП 37-11 и их модификаций), а также провода, изолированные фторопластом-4Д (МС16-13, МС37-11 и их модификаций).

11.2 ПТФЭ выпускается в двух основных модификациях: 1) фторопласт-4 в виде ориентированной или неориентированной пленки, которая в кабелях и проводах используется в качестве изоляции в виде обмотки с последующей термообработкой; 2) фторопласт-4Д, имеющий меньший молекулярный вес, в виде мелкодисперсного порошка, образующий суспензию после смешения с бензином, которая используется для наложения изоляции в прессе с последующей запечкой или для изготовления «сырой» ленты, и последующей обмотки провода и запечки. Первый материал используется для изоляции теплостойких, негерметичных проводов и для изоляции теплостойких радиочастотных кабелей. Второй – при изготовлении проводов с монолитной герметичной изоляцией.

11.3 ПТФЭ является типичным представителем полукристаллических деструктирующих полимеров с низкой радиационной стойкостью. При воздействии радиации в присутствии кислорода в нём происходит сложная схема структурных превращений с преобладанием разрыва цепей в аморфных участках. Затем новые концы макромолекул укладываются в кристаллиты, что приводит к увеличению степени кристалличности полимера, фиксируемому различными методами, в том

числе методом ДСК. При дозах $5 \cdot 10^3$ Гр ($5 \cdot 10^5$ рад) и выше концентрация разрывов цепей становится такой, что наряду с ростом первоначальных кристаллитов становится возможным образование в аморфных участках новых кристаллитов. В результате дополнительная кристаллизация становится превалирующим процессом, что приводит также к торможению подвижности цепей в аморфных участках. В результате физико-механические свойства полимера ухудшаются, происходит его охрупчивание, а плотность ПТФЭ возрастает, приводя к усадке материала. Последнее проявляется в виде растрескивания изоляции проводов. Рост степени кристалличности приводит к увеличению удельной теплоты плавления ΔH полимера в несколько раз (см. рисунок 11.1).

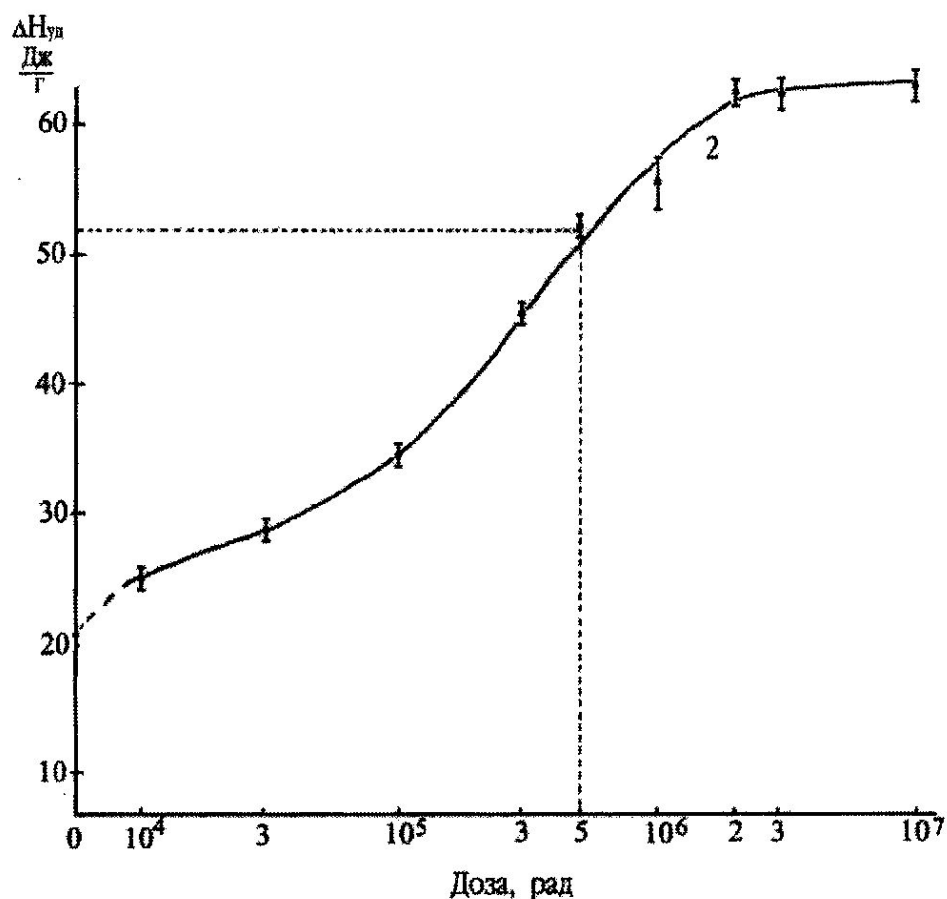


Рисунок 11.1 - Зависимость удельной теплоты плавления ΔH ПТФЭ марки Ф-4ЭО от дозы при мощности дозы 16,7 рад/с

Установлено:

- ΔH не зависит от мощности дозы;
- предельно допустимой для изоляции проводов из фторопласта доза равна $5 \cdot 10^5$ рад;
- предельно допустимая величина ΔH составляет 52 Дж/г.

11.4 Экспериментальные данные по термической стойкости изоляции из ПТФЭ позволили установить зависимость минимальной наработки, которая приведена на рисунок 11.2. Точки на графике соответствуют минимальной наработке проводов, записанной в НД на различные марки фторопластовых проводов. Под минимальной наработкой кабельных изделий понимается наработка, во время которой отказы практически отсутствуют.

11.5. Для оценки срока службы качества ПС в данном случае используется минимальная наработка проводов (кабелей) с изоляцией из ПТФЭ. При известном сроке эксплуатации на момент диагностирования и известной средней температуре провода (кабеля) при эксплуатации для оценки остаточного срока службы следует использовать график из рисунка 11.2, считая при этом, что при температуре ниже 70°C наработка провода по состоянию изоляции составляет около 10^6 часов. **ВНИМАНИЕ!** В данном случае необходимо проверить визуально (изменение цвета свидетельствует об окислении проводника) состояние токопроводящей жилы, которая может разрушиться раньше изоляции под влиянием агрессивных газов, паров, поскольку изоляция из пленки ПТФЭ (Ф-4ЭО) негерметична.

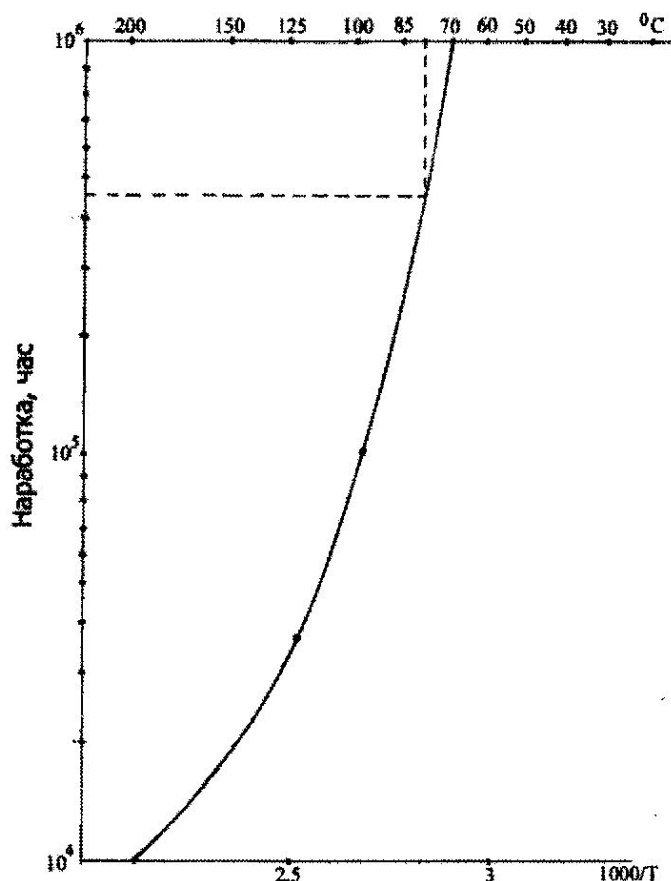


Рисунок 11.2 - Зависимость минимальной наработки проводов с изоляцией из ПТФЭ от температуры эксплуатации

11.6 Диагностическим параметром является удельная теплота плавления ΔH , а ПС - набранная доза D_0 за срок эксплуатации, которая определяется по корреляционной зависимости " $\Delta H - D_0$ ", указанной на рисунке 11.1. Эта зависимость (S-образная кривая) хорошо описывается формулой Колмогорова-Ерофеева вида

$$Y(x) = Y_{пред} + (Y_0 - Y_{пред}) \cdot \exp(-Kx^\lambda), \quad (11.1)$$

где Y_0 и $Y_{пред}$ – начальное и конечное значения кривой;

K – константа скорости, λ – коэффициент.

Здесь в качестве x следует использовать $\lg D$, поскольку абсцисса графика логарифмическая.

11.7 В качестве начального и конечного значений ΔH берём из графика величины 21 и 63,4 Дж/г.

11.8 S-образная кривая, описываемая вышеприведённой формулой, спрямляется в координатах $\ln \ln[(Y_0 - Y_{пред})/(Y - Y_{пред})]$ и $\ln x$. Пересечение прямой с осью ординат даёт значение $\ln K$, а тангенс угла наклона прямой равен λ . Обработка данных для ΔH в зависимости от дозы по такой методике даёт следующие значения параметров кривой: $K = 6,16 \cdot 10^{-7}$, $\lambda = 8,333$. В результате получим следующую формулу

$$\Delta H = 63,4 - 42,4 \exp[-6,16 \cdot 10^{-7} (\lg D)^{8,333}], \text{ Дж/г.} \quad (11.2)$$

11.9 Если при диагностировании измерена величина ΔH_0 , то можно определить набранную образцом провода дозу по формуле

$$\lg D_0 = \exp\{0,12 [\ln \ln(42,4/(63,4 - \Delta H_0)) + 14,3]\}, \quad (11.3)$$

которая получается из предыдущей после преобразований и подстановки численных значений. Разность между предельно допустимой дозой $D_{дон}$ и полученной величиной D_0 даёт остаточный ресурс изоляции. Разделив эту разность на среднюю мощность дозы при эксплуатации $P_{ср}$, получим прогнозируемый остаточный срок службы провода (кабеля)

$$\tau_{ост} = (D_{дон} - D_0) / P_{ср}. \quad (11.4)$$

11.10 За остаточный срок службы принимается наименьший из двух: либо определённый по формуле 11.4, либо графически из рисунка 11.2 за вычетом срока эксплуатации провода на момент диагностирования.

11.11 Диагностический параметр ΔH_0 определяется как удельная теплота (энтальпия) плавления небольшой пробы изоляции провода при дифференциальной сканирующей калориметрии. Параметр ΔH_0 рассчитывается по формуле

$$\Delta H_0 = \frac{\Delta H_{эт} \cdot M_{эт} \cdot S_{проб}}{M_{проб} \cdot S_{эт}} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{г}} \right], \quad (11.5)$$

где $\Delta H_{эт}$ - удельная теплота плавления эталона (свинца);

$M_{эт}$, $M_{проб}$ - массы эталона и исследуемой пробы;

$S_{эт}$, $S_{проб}$ - площадь пика плавления эталона и пробы.

11.12 Значение ΔH_0 при диагностировании сравнивают с предельно допустимым значением $\Delta H_{пред}$, которое для ПТФЭ равно 52 Дж/г.

11.13 От диагностируемого провода, не имеющего отказов при визуальном осмотре и электрических испытаниях с поверхности изоляции срезают пробы массой от 3 до 7 мг. Участки изоляции, с которой взяты пробы, защищают фторопластовой лентой СКЛ (ФУМ). Такой провод считается неповрежденным. Проб должно быть не менее трех.

11.14 Перед началом исследования проб проводят калибровку калориметра. Для этого в рабочую ячейку калориметра помещают подходящую по массе эталонную пробу вещества, температура плавления которого близка к температуре плавления ПТФЭ. Таким веществом является свинец. В ячейку сравнения помещают пустую чашку с обозначением "СО" из комплекта эталонов калориметра. Ячейки закрывают колпаком и включают нагрев со скоростью 8 или 10 град/мин. Записывают пик плавления свинца при масштабе от 2 до 4 град/см. Каким-либо способом находят площадь пика плавления $S_{эт}$. Операцию проделывают не менее трех раз. Находят среднее значение $S_{эт}$, которое в дальнейшем используют при вычислениях по формуле (11.5). Значение $M_{эт}$, $\Delta H_{эт}$ берут из паспорта на комплект эталонов.

11.15 Пробы взвешивают на весах с ценой деления не более 0,1 мг и помещают в алюминиевую чашку из комплекта калориметра. Масса чашки должна быть одинаковой с массой пустой чашки "СО" с точностью до 0,3%. Пробу размещают на чашке так, чтобы она находилась по возможности точно в центре, запечатывают алюминиевой крышкой на специальном станочке и опускают в рабочую ячейку калориметра при температуре $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$.

11.16 В ячейку сравнения помещают пустую чашку с обозначением "СО" из набора эталонов к калориметру. Ячейки закрывают колпаком и включают нагрев с постоянной скоростью подъема температуры 8 или 10 град/мин. При нагреве производят запись теплового эффекта (термограммы) на самописце или на мониторе компьютера. Все условия записи термограмм должны быть такими же, как и при

записи термограммы эталона. Нагрев продолжают до температуры 350 °С. В диапазоне от 310 °С до 340 °С наблюдают пик эндотермического эффекта, связанного с плавлением кристаллитов ПТФЭ. Каким-либо способом определяют площадь пика в произвольных единицах, но в таких же, как и при нахождении площади пика от эталона. Массу пробы и площадь пика плавления пробы используют для нахождения ΔH_d по формуле (11.5).

11.17 Полученные значения ΔH_d заносят в таблицу по форме, приведенной на рисунке 11.3. Проводят обработку результатов (аналогично 6.2), определяя среднее значение величины ΔH_d , среднее квадратичное отклонение S , рассчитывают верхнюю доверительную границу при одностороннем критерии и уровне значимости 0,95. Верхнюю границу $\Delta H_d^{0,95}$ используют для вхождения в формулу (11.3).

Кол-во измерений N	ΔH_d , Дж/г	$\Delta \bar{H}_d$, Дж/г	S , Дж/г	$\Delta H_d^{0,95}$, Дж/г
1				
2				
3				
4				
5				

Рисунок 11.3 – Форма таблицы для занесения результатов измерений ΔH_d

12 Рекомендации по оценке технического состояния кабелей с резиновыми оболочками и изоляцией

12.1 Резиновые оболочки кабелей изготавливают на основе различных типов каучуков и соответствующем подборе саж для целенаправленного получения определенных свойств, например, увеличения теплостойкости, маслостойкости, морозостойкости. Для повышения огнестойкости в оболочки добавляют различные наполнители на основе мела. Резину РШ-1 изготавливают на основе смеси натурального и бутадиенового каучуков марки СКБМ, а РШ-2 – на основе дивинилстирольного каучука марки СКС-30 или СКС-ЭОА и резины РШМ-2 и РШТМ-2 – на основе бутадиенового каучука марки СКБМ. Резины РШН-1 и РШН-2 изготавливают на основе хлоропренового каучука – наирита. Разнообразие резин является причиной, по которой не удастся создать универсального неразрушающего метода контроля для всех типов кабельных резин, выпускаемых промышленностью. Наиболее известным методом неразрушающего контроля для низковольтных кабелей с резиновыми оболочками является локальное индентирование оболочки с помощью металлического зонда для определения коэффициента жесткости или константы упругости M . Такой метод реализован в настоящем техническом документе в разделе 8. Этот метод нельзя считать универсальным, так как для каждой марки резины следует заранее в лабораторных условиях определить исходные и предельные значения для M .

12.2 При отсутствии данных об исходные и предельные значения для M следует дополнительно к методу локального индентирования использовать другие методы диагностики. Наиболее информативным и практически неразрушающим методом диагностики в данном случае является анализ спектров поглощения, измеряемых на ИК Фурье спектрометре с приставкой НПВО для микрообразцов. Во-первых, метод позволяет во многих случаях провести идентификацию кабельных изоляционных материалов руководствуясь ГОСТ 28665, во-вторых, по характерным полосам поглощения можно оценить степень окисления или расход стабилизаторов,

которые определяет срок службы изоляции. На рисунке 12.1 представлены ИК спектры поглощения:

- для сильно состаренного образца кабеля. ОУР для резиновой оболочки данного образца равно $(65 \pm 10)\%$;
- для образца кабеля со средней степенью старения. ОУР для резиновой оболочки образца равно $(244 \pm 28)\%$.

В ИК спектре для образца кабеля с ОУР = 244% фиксируется полоса поглощения на длине волны $1717,68 \text{ см}^{-1}$, которая соответствует наличию стабилизатора в соответствии с [9], для образца кабеля с ОУР = 65% данная полоса отсутствует, что свидетельствует о практически полном его расходе. Таким образом, по содержанию стабилизатора, используя ИК Фурье спектроскопию поглощения можно оценить степень старения резиновых изоляционных материалов.

12.3 При отсутствии полноты данных, необходимых для оценки фактического технического состояния и прогнозирования состояния неразрушающими методами контроля, следует проводить оценку по величине ОУР оболочек образцов представительных кабелей. Образцы следует вырезать из характерных кабельных трасс, прежде всего, в местах с наиболее интенсивным ВВФ. Предельное величина ОУР оболочек равна 50% в соответствии с [7, 8].

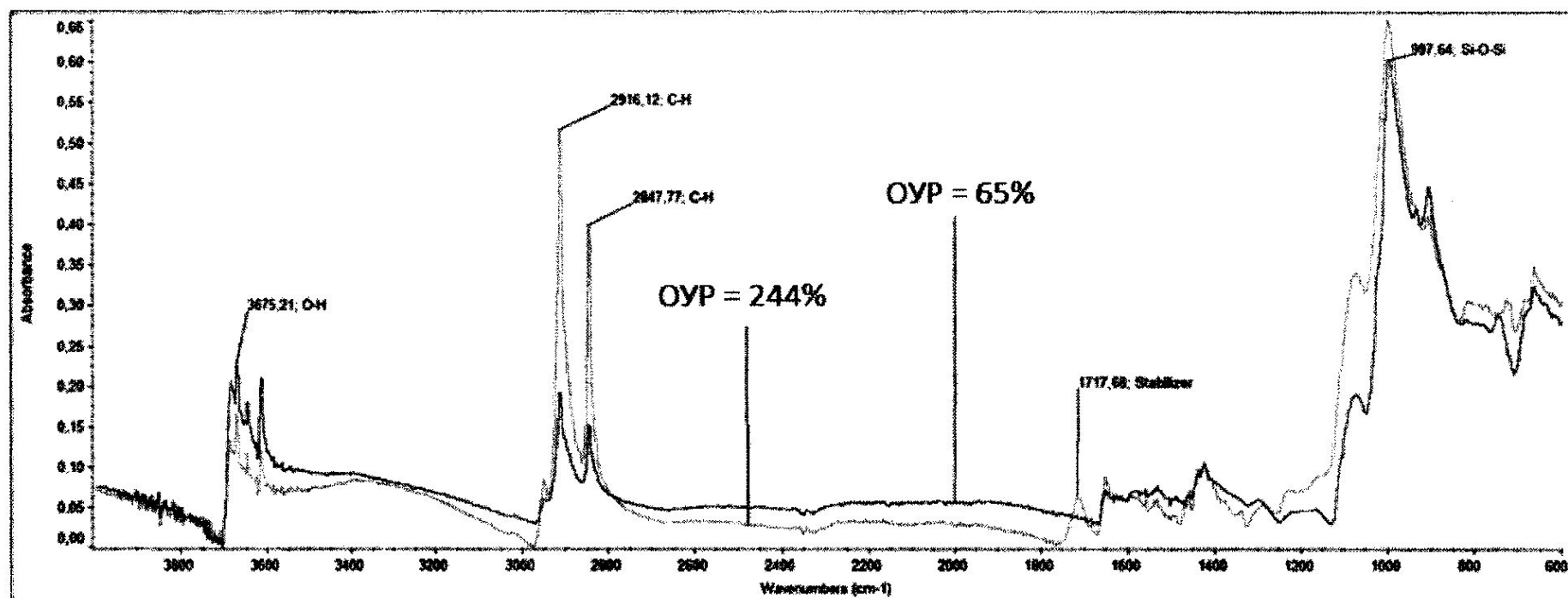


Рисунок 12.1 – Спектры ИК поглощения для резиновых оболочек кабелей с разной степенью старения

12.4 Для прогнозирования срока службы низковольтных кабелей с резиновыми оболочками следует провести ускоренные испытания термические испытания. Рекомендуется выбирать температуру ускоренных испытаний в температурном диапазоне от 110 °С до 130 °С. При этом постулируется, что доминирующим механизмом старения саженаполненной резиновой оболочки является термоокислительная деструкции каучука, которая описывается по закону в соответствии с [7]

$$OUP = OUP(0) \cdot \exp(-r_T \cdot t), \text{ где } r_T = r_0 \cdot \exp(-\frac{E_a}{kT}) \quad (12.1)$$

где r_T – скорость старения при температуре T ;

t – время эксплуатации.

Скорость старения r_T для каждого образца и для каждой заданной при прогнозировании температуры T следует определять по формуле

$$r_T = \frac{r_{исп}}{\exp[\frac{E_a}{k} \cdot (\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_{исп}})]}, \quad (12.2)$$

где $r_{исп}$ – скорость старения при температуре испытаний $T_{исп}$;

E_a – энергия активации;

k – постоянная Больцмана ($8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К);

T – температура прогнозирования.

12.5 Для прогнозирования теплового старения необходимо определить энергию активации E_a этого процесса. Рекомендуется использовать следующие способы для оценки энергии активации:

- на основе данных дополнительных тепловых испытаний образцов кабелей;
- на основе анализа литературных данных;
- по результатам испытания микрообразцов изоляции в ячейке прибора ДСК.

12.6 Для определения E_a на основе дополнительных испытаний, проводят испытания ускоренные образцов при двух-трех температурах, отличающихся

не менее, чем на 10 градусов, с периодическим измерением ОУР вплоть до достижения предельного значения этой величиной (50%). После получения экспериментальных результатов E_a определяют используя известное соотношение, получаемое из закона Аррениуса, между температурой старения и временем старения

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (12.3)$$

где t_1 – время старения (эксплуатации) при температуре T_1 ;

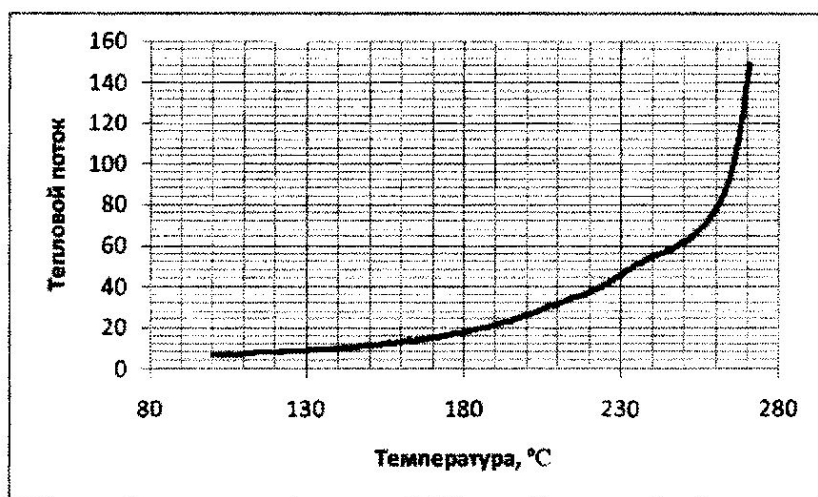
t_2 – время старения (испытаний) при температуре T_2 .

12.7 Для определения E_a на основе данных, представленных в технической литературе проводят анализ стандартов, публикаций в научных журналах и отчетах, например в ГОСТ 7866.1 – ГОСТ 7866.3 представлены зависимости срока службы различных типов судовых кабелей от эксплуатационной температуры. По этим данным были определены E_a , которые представлены в таблице 12.1. При отсутствии данных об энергии активации для конкретного кабеля в технической литературе документ ПО 1.2.1.02.999.0184 рекомендует в качестве E_a использовать величину 0,68 эВ. Такой подход обеспечивает консервативный подход при оценке срока службы кабелей.

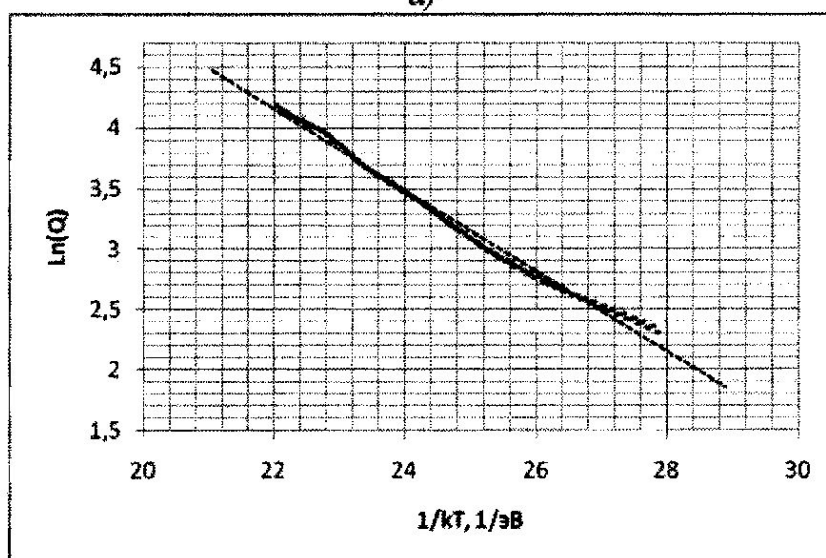
Т а б л и ц а 12.1 – Энергия активации для судовых кабелей с резиновыми оболочками

Марки кабелей	Средняя энергия активации E_a , эВ	E_1 , эВ	E_2 , эВ
Кабели с резиновой оболочкой и изоляцией марок НРШМ, НГРШМ, МРШМ, МЭРШН-100, КНР(Т,ТУ, ТЭ, и т.д.), СРМ и их аналоги	0,88	1,53	0,48
Кабели с резиновой изоляцией в оболочке из поливинилхлоридного пластика марок КНРк, КНРЭк и их аналоги	1,11	-	-
Кабели судовые с изоляцией из кренийорганической резины КРКВ, КРКВЭ или радиационно-сшитого полиэтилена в оболочке из поливинилхлоридного пластика КСРПВ, КСРПВЭ	1,23	-	-

12.8 При оценке E_a по результатам испытания микрообразцов изоляции в ячейке прибора ДСК принимается, что процесс окисления микропробы резиновой оболочки в ячейке прибора осуществляется за счет термоокислительной деструкции каучука. В ячейке прибора в атмосфере кислорода проводятся испытания микрообразца толщиной от 0,3 до 0,5 мм диаметром примерно равного диаметру ячейки прибора. В процессе испытаний образец нагревают со скоростью 2 град/мин в потоке кислорода до температуры 270 °С. Записывают кривую ДСК – зависимость теплового потока Q от температуры. Затем перестраивают полученную зависимость в координатах « $\ln Q - 1/kT$ ». Угловым коэффициентом наклона прямой, в этих координатах соответствует энергии активации E_a в эВ (см. рисунок 12.2). Определенная таким образом E_a будет иметь гарантировано заниженную величину, так как окисление полимера в ячейке прибора ДСК протекает в потоке кислорода при более высокой температуре, чем при эксплуатации кабеля. Другими словами, прогнозируемый срок службы резиновой оболочки, а значит и кабеля, по такому значению E_a будет гарантировано занижен.



а)



б)

Рисунок 12.2 – Кривая окисления ДСК (а) и ее логарифмическая анаморфоза (б)

Библиография

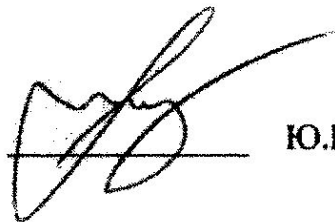
- [1] Москва: Химия, 1986, 252 с. Шляпников Ю. А., Кирюшкин С.Г., Марьин А.П. Антиокислительная стабилизация полимеров.
- [2] Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. В.1-2.,С.24-31., Москва., 1995. Быстрицкая Е.В., Быков Е.В., Кононенко А.И. "Разработка методов определения эксплуатационной устойчивости кабелей для атомных станций.
- [3] Высокомолекулярные соединения, 1987. Т.39 А, 77 С.1347. Быков Е.В. Быстрицкая Е.В., Карпухин О.Н. Толщина радиационно-окисленного слоя облученного полиэтилена.
- [4] Диссертация на соискание ученой доктора технических наук. Москва, ВНИИКТ, 1997 г., Боев М.А. Техническая диагностика кабельных изделий низкого напряжения с пластмассовой изоляцией.
- [5] Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Выпуск 2. С.68-71. Москва-2012 Кононенко А.И. Опыт применения дифференциальной сканирующей калориметрии для диагностики терморadiационного старения кабелей с полиэтиленовой изоляцией
- [6] Москва, издательство "Химия", 1976 Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров.
- [7] IAEA-TECDOC-1188, Volume 1-2, ISSN 1011-4289, Vienna: Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables IAEA, 2000
- [8] IAEA Nuclear Energy Series, No. NP-T-3.6, Vienna: IAEA, 2012 Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants

- [9] Ленинград: Химия, 1986.- 248 с., ил. Тарутина Л.И., Позднякова Ф.О. Спектральный анализ полимеров
- [10] ICONE19, May 16-19, 2011, Chiba, Japan Kononenko A.I., Chlenov A.M., Tsikanin A.G. "Nondestructive control of condition and prediction of cable life time at nuclear power plants". 19th International Conference on Nuclear Engineering
- [11] Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1986, 176С Большаков Г.Ф. Инфракрасные спектры насыщенных углеводородов

Лист согласования

МР 1.2.1.13.1037-2015 «Определение технического состояния и остаточного срока службы кабелей систем безопасности, контроля и измерений на атомных станциях. Методические рекомендации»

Заместитель директора по
производству и эксплуатации АЭС -
директор Департамента инженерной
поддержки



Ю.П. Тетерин

Заместитель директора Департамента
инженерной поддержки



Р.М. Султанов

Нормоконтролер



М.А. Михайлова

Лист визирования

МР 1.2.1.13.1037-2015 «Определение технического состояния и остаточного срока службы кабелей систем безопасности, контроля и измерений на атомных станциях. Методические рекомендации»

Директор Технологического филиала
ОАО "Концерн Росэнергоатом»



С.А. Карпутов

Начальник ЭТО ТФ
ОАО "Концерн Росэнергоатом»

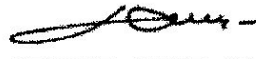


О.В. Паньшин

Лист визирування

МР 1.2.1.13.1037-2015 «Определение технического состояния и остаточного срока службы кабелей систем безопасности, контроля и измерений на атомных станциях. Методические рекомендации»

Заместитель директора по науке
ФГУП "НИИП"



В.Н. Улимов

Начальник управления диагностики и
испытаний и испытаний
электротехнических элементов АС и
ЯУ ФГУП "НИИП"



А.И. Кононенко

Начальник отдела испытаний
изоляционных материалов и
диагностики электротехнического
оборудования ФГУП "НИИП"



А.Г. Циканин