



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ  
СОЮЗА ССР

---

# МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДУ  
ИСПЫТАНИЯ НА НАГРЕВОСТОЙКОСТЬ

ГОСТ 27710—88  
(СТ СЭВ 4127—83)

Издание официальное

Цена 20 коп. БЗ 5.-88/349



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ  
Москва

## МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ

Общие требования к методу испытания  
на нагревостойкость

ГОСТ 27710—88

(СТ СЭВ

4127—83)

Electrical insulating materials. General requirements  
for thermal endurance test method

ОКСТУ 3409

Срок действия с 01.01.89

до 01.01.94

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт устанавливает основные принципы разработки методов испытаний твердых электроизоляционных материалов и их простых сочетаний для оценки нагревостойкости.

## 1. ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Температурный индекс (ТИ) — характеристика нагревостойкости электроизоляционного материала, численно равная значению температуры в градусах Цельсия, полученному из графика сроков службы при времени срока службы 20000 ч.

1.2. Диапазон нагревостойкости (ДН) — характеристика нагревостойкости электроизоляционного материала, определяемая тремя значениями температур в градусах Цельсия, соответствующими срокам службы 20000 и 5000 ч и нижнего доверительного интервала с вероятностью 95 % для температуры, соответствующей сроку службы 5000 ч.

1.3. Относительный температурный индекс (ОТИ) — температурный индекс неизвестного материала, получаемого из времени, соответствующему признанной эксплуатационной температуре известного материала, при условии, что оба материала подвергаются сравнительным испытаниям согласно принципам, установленным в настоящем стандарте.

## 2. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Метод заключается в определении изменений проверяемых характеристик материалов в процессе ускоренного теплового старения и в оценке на базе проведенных испытаний характеристик нагревостойкости.

## 3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

3.1. Методы испытаний, приведенные в настоящем стандарте, позволяют определить изменение характеристик электроизоляционных материалов и их простых сочетаний в процессе длительного теплового старения.

Результаты испытаний позволяют проводить сравнение материалов с целью отбора их для дальнейшей оценки в изоляционной системе.

3.2. Испытание, насколько возможно, должно имитировать функцию материала в реальных условиях эксплуатации действительной работы. Свойство, контролируемое при испытании, должно соответствовать требованиям условий эксплуатации.

3.3. Испытания должны проводиться в следующей последовательности:

- 1) выбор проверяемых характеристик;
- 2) выбор критериев конечной точки для этих характеристик;
- 3) изготовление необходимых образцов;
- 4) определение исходных уровней проверяемых характеристик (при необходимости);
- 5) проведение ускоренного старения образцов, по крайней мере, при трех повышенных температурах либо непрерывно, либо периодами — циклами, между которыми образцы охлаждаются до комнатной температуры;
- 6) периодический контроль состояния образцов путем определения проверяемой характеристики и изображение результатов испытаний в виде графика срока службы;
- 7) определение расчетным путем температурного индекса и диапазона нагревостойкости из графика срока службы.

3.4. Критерий конечной точки должен характеризовать степень разрушения материала, которая снижает его способность выдерживать нагрузки, возникающие в реальных условиях эксплуатации системы изоляции. При этом степень разрушения, определяемая критерием конечной точки, должна быть согласована с допустимым в условиях эксплуатации уровнем проверяемой характеристики. Критерий конечной точки должен быть выбран так, чтобы получались не слишком короткие (заниженные) промежутки времени до выхода материала из строя.

Критерий конечной точки определяют двумя способами:

1) процентное повышение или снижение измеряемого параметра по отношению к исходному. Этот способ позволяет сравнивать материалы, но он менее связан, чем метод 2), с допустимым уровнем свойства для обеспечения работоспособности материала\*. За исходное значение параметра принимают (если особо не оговорены иные условия) среднее арифметическое результатов испытаний не менее 10 образцов, подвергнутых термообработке при наименьшей температуре старения в течение 48 ч;

2) фиксированное значение параметра выбирается исходя из требований, предъявляемых условиями эксплуатации.

Рекомендации по выбору критериев конечной точки даны в приложении 1.

3.5. Испытываемые образцы должны подвергать действию не менее трех температур старения в достаточно широком диапазоне, необходимом для надежного определения диапазона нагревостойкости или температурного индекса. Испытательные температуры выбираются таким образом, чтобы при самой низкой температуре срок службы был не менее 5000 ч и при самой высокой температуре не менее 100 ч. Испытательные температуры выбирают обыкновенно с интервалом 20 °С. Если это приводит при более высоких из выбранных испытательных температур к короткому времени до достижения критерия или к превышению точки плавления или размягчения материала, или к изменению механизма старения, то интервал между температурами может быть уменьшен до 10 °С. Экстраполяция для определения диапазона на нагревостойкость или температурного индекса не должна превышать 25 °С.

Выбор испытательных температур предполагает знание приблизительного значения температурного диапазона, в котором находится температурный индекс испытываемого материала. Для неизвестного материала необходимо провести предварительные исследования, которые позволяют выбрать наилучшим образом температурные старения. Температурные области плавления, кристаллизации могут быть определены с помощью методов термического анализа или другим подходящим способом.

3.6. Предпочтительные температуры старения и соответствующие им длительности цикла приведены в табл. 1.

---

\* Выбор критерия конечной точки, основанный на произвольном процентном изменении измеряемого параметра, относительно его исходного значения, может привести к неправильной отбраковке материалов с высоким начальным значением, когда они сравниваются с материалами, имеющими более низкие исходные значения этого параметра.

# 4. ОБРАЗЦЫ

4.1. Количество, форма, размеры и метод подготовки испытуемых образцов должны соответствовать установленным в стандартах на конкретный вид материала.

Методы испытаний должны содержать указания по подготовке образцов и, в случае необходимости, должны прилагаться рисунки, чертежи и фотографии образцов.

Рекомендуемые виды и размеры образцов приведены в приложении 1, табл. 3.

4.2. При определении числа испытываемых образцов следует руководствоваться заданной степенью надежности с учетом рассеяния результатов испытаний при каждой отдельной температуре старения.

Таблица 1

Температура, °С

| Температура старения для диапазона температур, в которых находится предполагаемая температура, соответствующие сроку службы образцов 20(0) ч |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | Длительность одного цикла, сут |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| От 100 до 109                                                                                                                                | От 110 до 119 | От 120 до 129 | От 130 до 139 | От 140 до 149 | От 150 до 159 | От 160 до 169 | От 170 до 179 | От 180 до 189 | От 190 до 199 | От 200 до 209 | От 210 до 219 | От 220 до 229 | От 230 до 239 |                                |
| 170                                                                                                                                          | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 250           | 260           | 270           | 280           | 290           | 300           | 1                              |
| 160                                                                                                                                          | 170           | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 250           | 260           | 270           | 280           | 290           | 2                              |
| 150                                                                                                                                          | 160           | 170           | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 250           | 260           | 270           | 280           | 4                              |
| 140                                                                                                                                          | 150           | 160           | 170           | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 250           | 260           | 270           | 7                              |
| 130                                                                                                                                          | 140           | 150           | 160           | 170           | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 250           | 260           | 14                             |
| 120                                                                                                                                          | 130           | 140           | 150           | 160           | 170           | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 250           | 28                             |
| 110                                                                                                                                          | 120           | 130           | 140           | 150           | 160           | 170           | 180           | 190           | 200           | 210           | 220           | 230           | 240           | 49                             |

Примечание. На основе опыта проведения испытаний с аналогичными материалами или же после проведения предварительных испытаний, например, критерий конечной точки будет достигнут при температуре 145 °С после 20000 ч. Из табл. 1 выбирают температуру старения 160, 180 и 200 °С и им соответствующие длительности циклов 28,7 и 2 сут.

4.3. Размеры и форма испытываемых образцов должны, по возможности, соответствовать практическому использованию материала. Однако, так как электроизоляционные материалы имеют различное применение и подвергаются действию целого комплекса нагрузок и окружающих условий, часто используются образцы, применяемые при стандартных методах испытаний. Так как результаты испытаний материалов разной толщины не всегда можно сравнить, толщина образцов должна соответствовать установленной в стандарте на конкретный метод испытания.

## 5. АППАРАТУРА

5.1. В термостатах, применяемых для теплового старения, должна быть принудительная циркуляция воздуха. Количество и скорость циркулирующего воздуха должны быть такими, чтобы в течение 1 ч на 1 м<sup>2</sup> поверхности образцов поменялся почти весь объем воздуха. Отклонение температуры от заданного значения не должно превышать  $\pm 2^\circ\text{C}$  при температурах до  $180^\circ\text{C}$  включительно и  $\pm 3^\circ\text{C}$  при температурах выше  $180^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в термостате должна измеряться в непосредственной близости от образцов при установившемся режиме и считаться температурой образца. Для того, чтобы уменьшить влияние неравномерности распределения температуры в термостате на образцы, рекомендуется после каждого цикла или отбора менять их положение.

Примечание. Если образцы перемещаются после каждого цикла и учитываются все изменения в их расположении, это позволяет улучшить интерпретацию результатов испытаний, даже если распределение температур в термостате корректируется в процессе испытания.

5.2. Допускается проводить старение образцов, помещенных в закрытые ампулы (контейнеры), содержащие воздух, инертный газ, жидкость или другие вещества, если это устанавливает стандарт на конкретный вид материала.

## 6. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

Тепловое старение должно проводиться при 3 и более повышенных температурах цикличности, либо непрерывно до определенного изменения проверяемой характеристики (достижения критерия конечной точки), или до разрушения образцов.

### 6.1. Циклическое старение

Образцы помещают в термостат, заранее нагретый до испытательной температуры, и по истечении установленного времени старения вынимают из термостата и оставляют приблизительно на 2 ч в комнатной среде по ГОСТ 6433.1—71, если в стандарте на конкретный вид материала нет других указаний.

После охлаждения на всех образцах проводят измерение проверяемой характеристики и неповрежденные образцы возвращают в термостат для дальнейшего старения. При соответствующих указаниях в стандарте на конкретный вид материала образцы после охлаждения, перед измерением проверяемой характеристики, могут подвергаться механическим или электрическим нагрузкам, воздействию влаги и других факторов. Такие циклы повторяют до достижения критерия конечной точки проверяемой характеристики.

Продолжительность отдельных циклов выбирают так, чтобы при каждой температуре старения число циклов до достижения критерия конечной точки было приблизительно одинаковым. В этом случае образцы подвергаются при каждой температуре старения приблизительно одинаковому количеству испытательных воздействий.

Рекомендуется выбирать температуру и продолжительность циклов старения так, чтобы образцы подвергались приблизительно 10 циклам.

## 6.2. Непрерывное старение

Образцы помещают в термостат, нагретый до испытательной температуры. По истечении установленного времени определенное количество образцов извлекают из термостата и 2 ч выдерживают в комнатной среде по ГОСТ 6433.1—71, если в стандарте на конкретный вид материала не указано иначе. После охлаждения на образцах проводят измерение проверяемой характеристики. При необходимости после охлаждения, перед измерением проверяемой характеристики, образцы могут подвергаться механическим и электрическим нагрузкам, воздействию влаги или другим нагрузкам. Проверенные образцы не подвергают дальнейшему старению. Этот способ старения особенно целесообразен, когда измерение проверяемой характеристики сопровождается разрушением образцов.

Если испытанию подвергают неизвестный материал, не имея о нем предварительных сведений, процесс следует начинать старением половинны количества образцов при каждой температуре, и проводить измерения проверяемой характеристики после удлинения интервала времени старения, например, после каждого второго или третьего цикла по табл. 1. После получения нескольких результатов при различных сроках старения помещают оставшиеся образцы в термостат и старение этих образцов определяют по кривой старения, дополняя результатами их испытаний в зоне критерия конечной точки с целью надежного определения срока службы.

Интервалы старения образцов следует выбирать так, чтобы получить максимальное количество информации. Во многих случаях целесообразно, чтобы продолжительность старения возрастала в линейной прогрессии в соответствии с табл. 1.

Если целью испытаний является показать, что время разрушения материала превышает заданное, то следует применять только этот способ. Если целесообразно использовать геометрический закон распределения интервалов старения, рекомендуется исходить из ряда: 1, 2, 4, 7, 14, 28, 56, 112 и 182 сут.

## 7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

7.1. Определение времени достижения критерия конечной точки из графика сроков службы

7.1.1. При непрерывном измерении проверяемой характеристики время до разрушения каждого образца получают прямо из зарегистрированных величин в виде времени, за которое проверяемая характеристика достигает критерия конечной точки.

7.1.2. При циклическом старении, когда значение проверяемой характеристики определяют с помощью неразрушаемых испытаний, через определенные интервалы времени старения, зависимость проверяемой характеристики от времени старения изображают графически. Время до разрушения каждого образца определяют по графику, как время, за которое проверяемая характеристика этого образца достигает критерия конечной точки.

7.1.3. Время до разрушения каждого образца определяют как среднее из двух времен старения, после которого образец впервые не выдерживает проверочного испытания, и времени старения до непосредственно предшествующего разрушенному контрольного испытания, то есть за время до разрушения принимают среднюю точку последнего цикла, воздействию которого подвергают образец.

7.1.4. В случае одного определения на каждом образце строятся график зависимости характеристик от времени старения для каждой температуры и проводят линию наилучшего совпадения со всеми экспериментальными точками в четырех сроках старения, после которых результаты испытаний близки к точке пересечения линии наилучшего совпадения с линией критерия конечной точки. Через точки, соответствующие результатам испытаний отдельных образцов, проводят линии, параллельные линии наилучшего совпадения. Абсциссы точек пересечения этих линий с линией критерия конечной точки принимают за периоды времени до разрушения образцов.

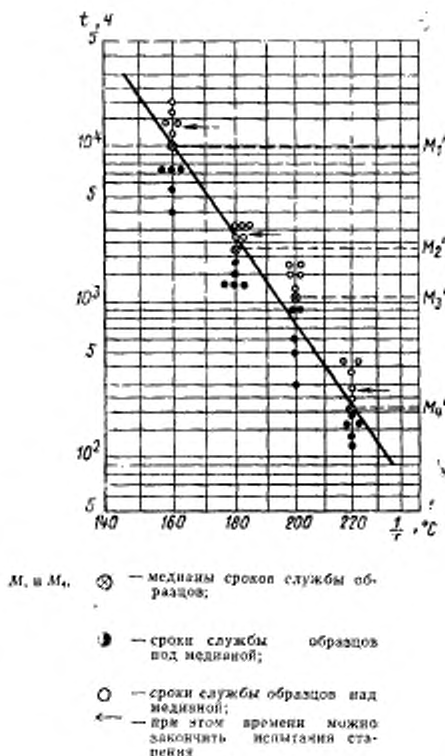
7.1.5. После циклического старения по п. 6.1 для построения графика сроков службы применяют медиану  $M$  значений времени  $t$  до разрушения отдельных образцов, которую определяют:

1) при четном числе образцов — как среднее арифметическое значение до достижения критерия конечной точки образцов с порядковыми номерами  $\frac{n}{2}$  и  $\frac{n}{2} + 1$ ;

2) при нечетном числе образцов — как время до достижения критерия образца порядковым номером  $\frac{n+1}{2}$ , где  $n$  — общее количество образцов при одной температуре старения в соответствии с черт. 1.

Примечание. Приведенный способ позволяет сократить испытания после достижения критерия конечной точки с порядковым номером  $\frac{n}{2} + 1$  или  $\frac{n+1}{2}$ . Испытания заканчивают, потому что время достижения критерия конечной точки других образцов не оказывает влияния на построение графика сроков службы.

Способ определения медианы срока службы образцов  $M$  при циклическом старении образцов

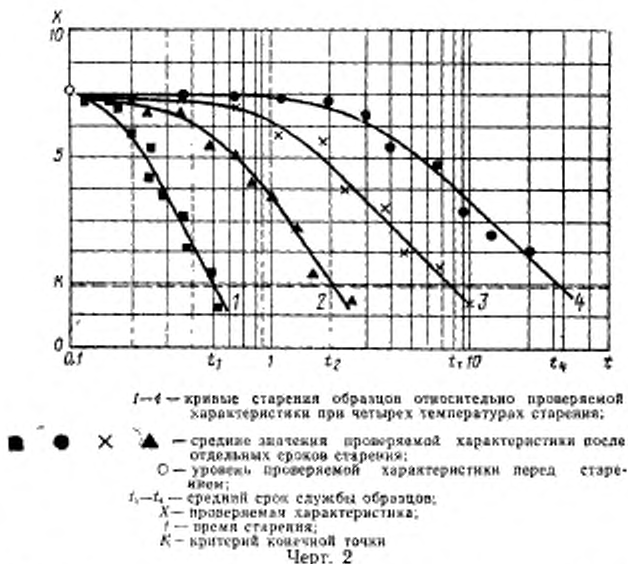


Черт. 1

7.1.6. При непрерывном старении по п. 6.2, где испытание имеет характер деструкции, для построения графика срока службы

применяют среднее значение сроков службы образцов  $t$  в соответствии с черт. 2, которое определяют из кривой старения, построенной по средним величинам.

Способ определения среднего срока службы образцов  $t_1—t_4$  из кривых старения при непрерывном старении



## 7.2. Определение температурного индекса

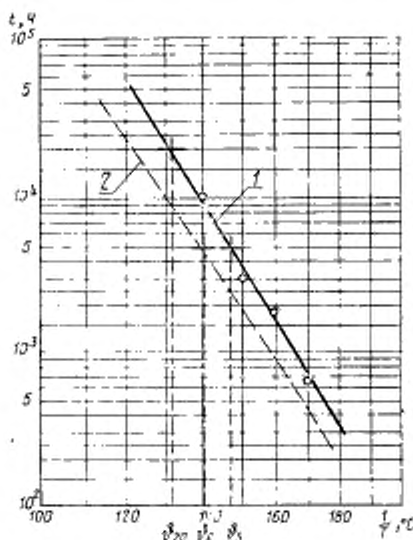
7.2.1. Температурный индекс (ТИ) для 20000 ч определяют из графика сроков службы в соответствии с черт. 3 и записывают в форме ТИ:  $\theta_{20}$  (например, ТИ: 132).

Если ТИ устанавливают для другого срока службы, то его записывают в форме  $\text{ТИ}_{5000}/\theta_5$  (например,  $\text{ТИ}_{5000}/148$ , где 5000 — срок службы 5000 ч, для которого ТИ установлен).

7.2.2. Для определения относительного температурного индекса (ОТИ) проводят сравнительные испытания нового и известного в эксплуатации материала при старении в одних термостатах, строят графики сроков службы обоих материалов на одном листе. На графике известного материала определяют время, соответствующее его признанной эксплуатационной температуре, и относительно этого времени определяют температурный индекс второго

материала. Относительный температурный индекс записывают в форме ОТИ/ $\theta$  (например, ОТИ/141).

График срока службы эмали-провода



ТИ: 132

ДН: 332/148 (140)

1 — определенный график сроков службы; 2 — нижняя граница доверительного интервала с вероятностью 95 %;  $\bigcirc$  — измеренные величины срока службы;  $\theta_{2000}$  — нагревостойкость при сроке службы 2000 ч;  $\theta_{5000}$  — нагревостойкость при сроке службы 5000 ч;  $\theta_{10000}$  — нагревостойкость на нижней границе доверительного интервала с вероятностью 95 % для 5000 ч

Черт. 3

### 7.3. Определение диапазона нагревостойкости

7.3.1. Перед расчетом диапазона нагревостойкости (ДН) необходимо проверить статистическую однородность результатов с помощью коэффициента вариации времени ( $C_v$ ), в процентах, соответствующего точке на линии со сроком службы 5000 ч по формуле

$$C_v = \frac{s_y \cdot 100}{\lg 5000} = \frac{s_y}{3,7} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $S_y^2$  — дисперсия (рассеяние) величины логарифма времени, соответствующего на графике срока службы температуре со сроком службы 5000 ч.

7.3.2. Если величина  $C_v$  более 1,5 %, она может быть снижена с использованием результатов дополнительных испытаний, проведенных при одном из следующих условий:

- 1) увеличить количество испытываемых образцов при каждой из испытательных температур;
- 2) провести дополнительные испытания при одной или нескольких температурах, которые должны быть ниже температур, использованных для старения в начале испытаний;
- 3) уточнить обработку экспериментальных результатов посредством высшей степени регрессионного анализа.

Если величина коэффициента вариации  $C_v$  более 1,5 %, ДН не определяют. Определяют только ТИ и значение  $C_v$  вносят в протокол.

Диапазон нагревостойкости определяют из графика сроков службы в соответствии с черт. 3 и записывают в форме ДН:  $\theta_{20}/\theta_5$  ( $\theta_c$ ), например, ДН: 132/148 (140).

7.3.3. Методы расчетов диапазонов нагревостойкости приведены в приложении 2.

Температура, соответствующая сроку службы 5000 ч ( $\theta_5$ ), является основной для сравнения экспериментальных данных без экстраполяции. Температура, соответствующая сроку службы 20 000 ч ( $\theta_{20}$ ), является основой для сравнения данных экстраполяции.

Значение температуры, соответствующее сроку службы 5000 ч на нижней границе ее доверительного интервала с вероятностью 95 % рассеяния, дает представление о рассеянии измеренных величин.

ДН является главной информацией нагревостойкости, а величина ТИ — лишь дополнительной сокращенной формой.

## 8. ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

Протокол испытания должен содержать:

- 1) маркировку материалов, описание образца, описание испытываемого материала (в том числе эталонного материала — если определяется ОТИ);
- 2) проверяемую характеристику;
- 3) метод проверочных испытаний;
- 4) критерий конечной точки;

- 5) график сроков службы в координатах логарифма времени и величины, обратной температуре ( $\lg t$ ;  $1/T$ );
- 6) способ определения ТИ и его величины;
- 7) способ определения ДН и его величины;
- 8) количество испытываемых образцов;
- 9) время достижения критерия конечной точки;
- 10) уравнение регрессии в виде  $\lg t = a + \frac{b}{T}$  с приведением коэффициентов  $a$ ,  $b$ ;
- 11) коэффициент вариации  $C_v$ .

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**  
**Обязательное**

**ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ И ИСПЫТАНИЙ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ**

**1. Общие сведения**

Для каждого конкретного материала может быть установлено несколько диапазонов нагревостойкости и температурных индексов в соответствии с выбранным свойством и критерием конечной точки. Поэтому важно иметь стандартизированные методы испытаний для оценки различных свойств данного материала или материалов одного типа. Это позволяет проводить сравнения по нагревостойкости материалов различного производства и аналогичных материалов одного типа. Это дает также возможность потребителю выбрать наиболее перспективные материалы для последующей оценки в электронизационной системе. В табл. 2 дана классификация различных типов материалов по их физическому состоянию и указано, какие испытания, приведенные в табл. 3, могут быть использованы для определения температурного индекса и диапазона нагревостойкости.

**Таблица 2**

| Тип материала                                                                        |                                |                                                     | Проверяемая характеристика | Условное обозначение метода испытания по табл. 3 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|
| Твердые изоляционные материалы, не подвергающиеся изменениям в течение их применения | Материалы неопределенной формы | Формующиеся мягкие массы, порошки, чешуйки, волокна | —                          |                                                  |

Продолжение табл. 2

| Тип материала                                                                                               |                                    | Прочерки или<br>характерис-<br>тика               | Условное<br>обозначе-<br>ние мето-<br>да испыта-<br>ния по<br>табл. 3 |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Твердые изоля-<br>ционные материа-<br>лы, не подвергаю-<br>щиеся изменени-<br>ям в течение их<br>применения | Твердые волок-<br>нистые материалы | Шнуры и жгуты                                     | Прочность<br>при разры-<br>ве                                         | 2.1.1           |
|                                                                                                             |                                    | Пропитанные<br>шнуры и жгуты                      | Относи-<br>тельное уд-<br>линение                                     | 2.1.1           |
|                                                                                                             | Твердые листо-<br>вые материалы    | Неорганические<br>листовые материа-<br>лы (слоды) |                                                                       |                 |
|                                                                                                             |                                    |                                                   | Пленки и листы                                                        | Потеря<br>массы |
|                                                                                                             |                                    | Прочность<br>при разры-<br>ве                     |                                                                       | 2.1.2           |
|                                                                                                             |                                    | Относи-<br>тельное уд-<br>линение                 |                                                                       | 2.2.2           |
|                                                                                                             |                                    | Бумаги, карто-<br>ны и т. п.                      | Пробив-<br>ное напря-<br>жение                                        | 1.1.1           |
|                                                                                                             |                                    |                                                   | Прочность<br>при разры-<br>ве                                         | 2.1.3           |
|                                                                                                             |                                    |                                                   | Сопротив-<br>ление раз-<br>диру                                       | 2.3.1           |
|                                                                                                             |                                    |                                                   | Сопротив-<br>ление про-<br>давливаю                                   | 2.4.1           |
|                                                                                                             |                                    |                                                   | Вискози-<br>метрическая<br>степень по-<br>лимеризации                 | 3.2.1           |

| Тип материала                                                                        |                            | Проверяемая характеристика                              | Условное обозначение метода испытания по табл. 3 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Твердые изоляционные материалы, не подвергающиеся изменениям в течение их применения | Твердые листовые материалы | Ткани и аналогичные материалы                           | —                                                |
|                                                                                      |                            |                                                         | —                                                |
|                                                                                      |                            |                                                         | —                                                |
|                                                                                      |                            | Бумаги и ткани, пропитанные или лакированные            | Прочность при разрыве                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | 2.1.2                                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | Сопротивление раздиру                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | 2.3.2                                            |
|                                                                                      |                            | Композиционные листовые материалы (лазопластик и т. п.) | Пробивное напряжение                             |
|                                                                                      |                            |                                                         | 1.1.1                                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | —                                                |
|                                                                                      | Твердые листовые материалы | Неорганические материалы (керамика, стекло и т. п.)     | Прочность при разрыве                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | 2.1.3                                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | Сопротивление раздиру <sup>1</sup>               |
|                                                                                      |                            |                                                         | 2.3.1                                            |
|                                                                                      |                            | Термореактивные пресс-массы                             | Пробивное напряжение                             |
|                                                                                      |                            |                                                         | 1.1.1                                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | —                                                |
|                                                                                      |                            | Термореактивные пресс-массы                             | Потеря массы                                     |
|                                                                                      |                            |                                                         | 3.1.2                                            |
|                                                                                      |                            |                                                         | Прочность при изгибе                             |
|                                                                                      |                            |                                                         | 2.5.1                                            |
|                                                                                      |                            | Термореактивные пресс-массы                             | Пробивное напряжение                             |
|                                                                                      |                            |                                                         | 1.1.2                                            |

Продолжение табл. 2

| Тип материала                                                                        |                              |                                               | Проверка характеристик                   | Условное обозначение метода испытания по табл. 3 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Твердые изоляционные материалы, не подвергающиеся изменениям в течение их применения | Твердые неслоистые материалы | Термопластичные пресс-массы                   | Пробивное напряжение <sup>1</sup>        | 1.1.2                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Прочность при разрыве <sup>2</sup>       | 2.1.1                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Прочность при изгибе <sup>4</sup>        | 2.5.1                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Ударная вязкость <sup>4</sup>            | 2.9.1                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Ударная энергия при разрыве <sup>3</sup> | 2.9.2                                            |
|                                                                                      |                              | Эластомеры (вулканизированный каучук и т. п.) | Прочность при разрыве                    | 2.1.4                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Относительное удлинение                  | 2.2.3                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Твердость                                | 2.6.1                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Пробивное напряжение                     | 1.1.3                                            |
|                                                                                      |                              | Другие неслоистые материалы                   | —                                        |                                                  |
| Твердые изоляционные материалы, не подвергающиеся изменениям в течение их применения | Твердые слоистые материалы   | Слоистые пластики                             | Потеря массы                             | 3.1.2                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Прочность при изгибе                     | 2.5.1                                            |
|                                                                                      |                              |                                               | Пробивное напряжение                     | 1.1.4                                            |

Продолжение табл. 2

| Тип материала                                                                                                             |                                                                                                                               | Проверяемая характеристика                                                                    | Условное обозначение метода испытания по табл. 3 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Твердые листовые изоляционные материалы для намотки или наслоения, полученные склейкой отдельных взаимно перекрытых слоев | Твердые листовые материалы, склеиваемые чувствительные к давлению связующих при нормальной или другой применяемой температуре | Пленки, бумаги, ткани и композиционные материалы с липким слоем                               | Потери массы<br>3.1.4                            |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                               | Адгезия к подложке<br>2.7.1                      |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                               | Пробивное напряжение<br>1.1.5                    |
| Твердые листовые изоляционные материалы для намотки или наслоения, полученные склейкой отдельных взаимно перекрытых слоев | Твердые листовые материалы, склеенные при нагреве                                                                             | Пленки, склеенные при нагреве                                                                 | —                                                |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               | Бумаги и ткани, склеенные при нагреве                                                         | —                                                |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               | Композиционные листовые материалы, склеенные при нагреве (главным образом слоистые материалы) | —                                                |
| Твердые листовые изоляционные материалы для намотки или наслоения, полученные склейкой отдельных взаимно перекрытых слоев | Твердые листовые материалы, склеенные при нагреве с помощью связующего, содержащего растворитель                              | Композиционные материалы, содержащие растворитель (главным образом слоистые материалы)        | —                                                |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               | Пленки и листы, склеенные простым плавлением                                                  | Потери массы<br>3.1.5                            |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                               | Адгезия к подложке<br>2.7.1                      |
|                                                                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                               | Пробивное напряжение<br>1.1.1                    |

Продолжение табл. 2

| Тип материала                                                                                                                                                                   |                                                                                                                   | Проверяемая характеристика                                                      | Условное обозначение метода испытания по табл. 3 |                           |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|-------|
| Изоляционные материалы, применяющиеся в виде жидкостей или паст для заполнения пустот, лакировки или склеивания и переходящие в твердое состояние после окончательной обработки | Листовые материалы, склеенные с помощью плавления и химической реакции                                            | Пленки и листы, склеенные с помощью плавления и химической реакции              | —                                                |                           |       |
|                                                                                                                                                                                 | Материалы, отверждающиеся за счет физических превращений (охлаждения, испарения растворителя или гелеобразования) | Плавкие материалы без наполнителя, переходящие в жидкое состояние при нагреве   | —                                                |                           |       |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   | Плавкие материалы с наполнителем, переходящие в жидкое состояние при нагреве    | —                                                |                           |       |
|                                                                                                                                                                                 | Материалы отверждающиеся за счет химической реакции (полимеризации, поликонденсации или аддитивной полимеризации) | Пигментированные и не пигментированные, термореактивные смолы, без растворителя | Покрывающие смолы                                | Потеря массы              | 3.1.6 |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   |                                                                                 |                                                  | Цементирующая способность | 2.8.1 |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   |                                                                                 |                                                  | Цементирующая способность | 2.8.2 |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   |                                                                                 |                                                  | Электрическая прочность   | 1.2.1 |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   |                                                                                 |                                                  | Электрическая прочность   | 1.2.2 |
| Потеря массы                                                                                                                                                                    |                                                                                                                   |                                                                                 |                                                  | 3.1.2                     |       |
| Листовые смолы                                                                                                                                                                  |                                                                                                                   | Прочность при изгибе                                                            | 2.5.1                                            |                           |       |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                   | Пробивное напряжение                                                            | 1.1.2                                            |                           |       |

| Тип материала                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                       | Прозрачная характеристика                                                                                    | Условное обозначение метода испытания по табл. 3 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Изоляционные материалы, применяющиеся в виде жидкостей или паст для заполнения пустот, лакировки или оклеивания и переходящие в твердое состояние после окончательной обработки | Материалы, отверждающиеся за счет химической реакции (полимеризации, поликонденсации или аддитивной полимеризации)                                                                    | Отверждающиеся пастообразные материалы, без растворителя (мастики и цементы)                                 | —                                                |
|                                                                                                                                                                                 | Материалы, отверждаемые за счет физических и химических превращений (испарения растворителя с последующим окислением, полимеризацией, поликонденсацией или аддитивной полимеризацией) | Непигментированные и пигментированные лаки, отверждаемые за счет испарения растворителя и химической реакции | Потеря массы                                     |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | 3.1.6                                            |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | Цементирующая способность                        |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | 2.8.1                                            |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | Цементирующая способность                        |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | 2.8.2                                            |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | Электрическая прочность                          |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | 1.2.1                                            |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | Электрическая прочность                          |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | 1.2.2                                            |
|                                                                                                                                                                                 | Лаки для обмоточных проводов                                                                                                                                                          | Лаки для обмоточных проводов                                                                                 | Электрическая прочность                          |
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                       | Клеи и мастики, отверждаемые испарением растворителя и химической реакцией                                   | 1.2.3                                            |

<sup>1</sup> При испытании произойдет полное разрушение листа композиционного материала.

<sup>2</sup> Если наблюдается значительное уменьшение толщины образца (например, из-за термопластичного течения), испытание считается недействительным.

<sup>3</sup> Не рекомендуется для армированных материалов.

<sup>4</sup> Рекомендуется для армированных материалов.

Таблица 3

| Условное обозначение метода испытания | Проверяемая характеристика | Метод испытания    | Вид и размеры испытываемых образцов, мм<br>1), 2) | Критерий конечной точки<br>3) |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1.1<br>1.1.1                          | Пробивное напряжение       | По ГОСТ 6433.3-71  | Не менее 150×150                                  | 50 %                          |
| 1.1.2                                 |                            |                    | —                                                 |                               |
| 1.1.3                                 |                            | По ГОСТ 27712-88   | —                                                 |                               |
| 1.1.4                                 |                            |                    | 150×150                                           |                               |
| 1.1.5                                 |                            |                    | Стержень длины 200, изолированный лентой          |                               |
| 1.2<br>1.2.1                          | Электрическая прочность    | По ГОСТ 27711-88   | Стеклоткань, пропитанная лаком                    | От 1,0 до 2,5 кВ              |
| 1.2.2                                 |                            | По ГОСТ 6433.3-71  | Стеклоткань, пропитанная лаком                    | 12 кВ/мм                      |
| 1.2.3                                 |                            | —                  | Крученые пары                                     | 50 %                          |
| 2.1<br>2.1.1                          |                            | —                  | —                                                 | 12 кВ/мм или 50 %             |
| 2.1<br>2.1.1                          | Прочность при разрыве      | По ГОСТ 11262-80   | Тип 1                                             | 50 %                          |
| 1.1.2                                 |                            | —                  | 15×200                                            |                               |
| 2.1.3                                 |                            |                    | 15×180                                            |                               |
| 2.1.4                                 |                            |                    | —                                                 |                               |
| 2.2<br>2.2.1                          | Относительное удлинение    | По ГОСТ 11262-80   | Тип 1                                             | 50 %                          |
| 2.2.2                                 |                            | —                  | 15×200                                            | 2 % остаточного удлинения     |
| 2.2.3                                 |                            | По ГОСТ 270-75     | —                                                 | —                             |
| 2.3<br>2.3.1                          |                            | По ГОСТ 13525.3-78 | 100×65                                            | 50 %                          |
| 2.3.2                                 | Сопротивление раздиру      | —                  | 100×65                                            | 50 %                          |
| 2.4<br>2.4.1                          |                            | —                  | Диаметр более 70                                  |                               |
|                                       |                            | —                  | —                                                 |                               |

| Условное обозначение метода испытания | Проверяемая характеристика               | Метод испытания                 | Вид и размеры испытуемых образцов, мм <sup>1), 2)</sup> | Критерий конечной точки <sup>3)</sup> |
|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 2.5<br>2.5.1                          | Прочность при изгибе                     | По ГОСТ 4648-71 и ГОСТ 27712-88 | 80×10×4                                                 | 50 %                                  |
| 2.6<br>2.6.1                          | Твердость                                | По ГОСТ 263-75                  | —                                                       | —                                     |
| 2.7<br>2.7.1                          | Адгезия к подложке                       | —                               | —                                                       | —                                     |
| 2.8<br>2.8.1                          | Цементирующая способность                | По ГОСТ 27711-88                | Спиральные катушки                                      | 50 %                                  |
| 2.8.2                                 |                                          | —                               | —                                                       | —                                     |
| 2.9<br>2.9.1                          | Стойкость к ударным нагрузкам            | По ГОСТ 4647-80                 | 6×4×50                                                  | 50 %                                  |
| 2.9.2                                 |                                          | —                               | —                                                       | —                                     |
| 3.1<br>3.1.1                          | Потеря массы <sup>1)</sup>               | —                               | 100×100                                                 | 5 %                                   |
| 3.1.2                                 |                                          | По ГОСТ 27712-88                | 50×50×3                                                 | 10 % <sup>2)</sup>                    |
| 3.1.3                                 |                                          | —                               | 50×50×3                                                 | 5 %                                   |
| 3.1.4                                 |                                          |                                 | Лента длины 100                                         | 10 или 20 %                           |
| 3.1.5                                 |                                          |                                 | 100×100                                                 | 10 %                                  |
| 3.1.6                                 |                                          | По ГОСТ 27711-88                | Стеклолакоткань 100×100                                 | 25 %                                  |
| 3.2<br>3.2.1                          | Вязкозиметрическая степень полимеризации | —                               | Приблизительно 2g                                       | 25 %                                  |

<sup>1)</sup> Если толщина испытуемого образца не регламентирована, она должна быть указана в протоколе испытаний.

<sup>2)</sup> При отсутствии специальных указаний, исходный уровень характеристик определяют не менее чем на 10 образцах, термообработанных при наименьшей температуре старения в течение 48 ч (см. п. 3.4).

<sup>3)</sup> При отсутствии дополнительных указаний, величины выражены в процентах, представляют остаточную величину характеристики в отношении к исходной.

<sup>4)</sup> Данные по потерям массы могут быть использованы для сравнения материалов аналогичного состава и в качестве проверки однородности партий ма-

териалов одного состава, но не используются для установления температурных индексов или диапазонов нагревостойкости.

<sup>3)</sup> Относится к органической части материала (определяемый выжиганием при 500 °С).

Методы испытаний должны соответствовать стандартам на конкретные виды материалов. Для отдельных видов материалов или для особых случаев применения допустимо использование других методов испытаний или других критериев конечной точки, которые позволяют получить дополнительную или более достоверную информацию. В этом случае необходимо, чтобы вся информация относительно метода и цели испытания была внесена в стандарт на конкретный вид материала или в протокол испытания. В табл. 2 приводятся рекомендуемые значения критериев конечной точки для всех проверяемых характеристик. Критерий конечной точки должен быть указан в стандарте на конкретный вид материала.

## 2. Руководство по применению табл. 2 и 3

В табл. 2 находят группу материалов, включающую испытуемый материал. Из проверяемых характеристик, рекомендуемых для данной группы в соответствии со ссылкой, в последней колонке таблицы определяются по табл. 3 методы испытаний, вид и размеры испытываемых образцов и критерии конечной точки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Обязательное

### РАСЧЕТ ДИАПАЗОНОВ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ

#### 1. Область распространения

В настоящем приложении даны подробные инструкции по расчету диапазонов нагревостойкости с применением статистических методов.

В процессе расчетов статистические переменные сопоставляются с табличными величинами, приведенными в табл. 6 и 7.

Примеры охватывают три случая:

Пример 1. Непрерывные измерения.

Пример 2. Циклическое проведение проверочных испытаний.

Пример 3. Разрушающие испытания.

#### 2. Общие положения

В основе статистических методов лежат следующие допущения:

1) наблюдаемые величины времени до разрушения образцов стохастически независимы.

Образцы для испытания на старение выбирают произвольно из исследуемого множества и обрабатывают одинаково;

2) логарифм времени до разрушения образцов имеет нормальное распределение с одинаковой дисперсией при всех температурах;

3) логарифм времени до разрушения образцов линейно зависит от величины обратной термодинамической температуры старения (уравнение Аррениуса), по крайней мере, во всем диапазоне, включающем все испытательные и экстраполируемые точки;

4) температура старения имеет незначительную погрешность и одинакова для всех образцов, одновременно подвергающихся тепловому воздействию.

### 3. Методы и результаты испытаний

Чтобы определить диапазон нагревостойкости (ДН) электроизоляционного материала в соответствии с заданным критерием конечной точки, необходимо определенное количество образцов подвергнуть циклически или непрерывно воздействию каждой из серии выбранных температур и определить время до разрушения образцов при каждой температуре.

Температуры выбирают согласно требованиям данного стандарта. Способ определения времени до разрушения, когда проверяемая характеристика достигнет уровня критерия конечной точки, зависит от метода испытания.

#### 3.1 Повторяющиеся испытания

Каждый образец периодически испытывают во время старения либо путем непрерывного измерения проверяемой характеристики, либо путем применения определенного контрольного воздействия в определенные периоды времени.

Если проверяемую характеристику измеряют непрерывно, время до разрушения каждого образца получают непосредственно из измерений в виде времени, за которое эта характеристика достигает критерия конечной точки.

Это относится ко всем случаям, когда характеристику измеряют непрерывно или достаточно часто во время старения путем испытания без разрушения образцов.

Если характеристику измеряют через определенные интервалы времени старения, то зависимость этой характеристики свойства (или некоторой функции ее) от времени (или функции времени) старения изображают графически. Время до разрушения каждого образца определяют по графику, как время, за которое характеристика этого образца достигает уровня критерия конечной точки.

Эта методика применима при непрерывном и циклическом старении, когда характеристику определяют с помощью неразрушающих измерений через длительные интервалы времени (например, в конце циклов старения). В некоторых случаях достаточно принять критерий конечной точки за контрольную величину и использовать методику, описанную ниже.

Если контрольное испытание проводят через определенные периоды времени старения, то время до разрушения каждого образца определяют как среднее из двух значений времени старения, после которого образец впервые не выдерживает проверочного испытания, и времени старения до непосредственно предшествующего разрушения контрольного испытания, то есть за время до разрушения принимают среднюю точку последнего цикла, воздействию которого подвергают образец.

Эту методику применяют в циклических испытаниях, когда все образцы в конце каждого цикла подвергаются контрольным испытаниям, после чего проходят новые циклы и так до тех пор, пока значение проверяемой характеристики не достигнет уровня критерия конечной точки.

#### 3.2 Однократное измерение на каждом образце

В этом случае строят график зависимости характеристики от времени старения для каждой температуры и проводят линию наилучшего совпадения со всеми экспериментальными точками в четырех сроках старения, после которых, когда результаты испытаний близки к точке пересечения линии наилучшего совпадения с линией критерия конечной точки, через точки, соответствующие результатам испытаний отдельных образцов, проводят линии, параллельные

линии наилучшего совпадения. Абсциссы точек пересечения этих линий с линией критерия конечной точки принимаются за пределы времени до разрушения образцов.

Эта методика используется в тех случаях, когда проверяемую характеристику определяют методом разрушающих испытаний и в случаях непрерывного старения, когда после фиксированного периода времени из термостата извлекают определенное количество образцов и после измерения выбрасывают.

#### 4. Статистические расчеты и решения

Для каждого значения температуры воздействия  $\theta_i$  в °C, при которой проводят старение ( $i=1, 2, \dots, k$  при  $k \geq 3$ ), вычисляют величину, обратную термодинамической температуре ( $x_i$ ) по формуле

$$x_i = \frac{1}{\theta_i + 273}, \quad (2)$$

десятичный логарифм (Бригга) времени до разрушения образца ( $y_{ij}$ ) по формуле

$$y_{ij} = \lg t_{ij}, \quad (3)$$

где  $t_{ij}$  — время до разрушения образца номер  $j$ , при температуре  $\theta_i$  для  $j=1, 2, \dots, n_i$ , где

$n_i$  — количество образцов, подвергаемых старению при  $\theta_i$ .

Общее количество образцов равно  $N = \sum n_i$ .

##### 4.1. Проверка равенства дисперсий $y_{ij}$

Вычисляют дисперсию ( $s_{ij}^2$ ) при различных величинах  $x_i$  по формуле

$$s_{ij}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i}, \quad (4)$$

где  $f_i = n_i - 1$  — число степеней свободы  $s_{ij}^2$ , и суммарную дисперсию ( $s_1^2$ ) по формуле

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{ij}^2}{\sum f_i}, \quad (5)$$

а соответствующее число степеней свободы ( $f_1$ ) по формуле

$$f_1 = \sum f_i = N - k.$$

Дисперсии сравнивают по методу Бартлетта.

Вычисляют промежуточную постоянную ( $c$ ) по формуле

$$c = 1 + \frac{\left( \sum \frac{1}{f_i} \right) - \frac{1}{f_1}}{3(k-1)} \quad (6)$$

и стохастическую переменную распределения ( $\chi^2$ ) по формуле

$$\chi^2 = 2,3 \cdot \frac{f_1 \cdot \lg s_1^2 - \sum (f_i \cdot \lg s_{ij}^2)}{c}. \quad (7)$$

Переменную  $\chi^2$  сравнивают с ее 0,95 квантилей распределений  $\chi^2$  (0,95,  $k-1$ ).

Если  $\chi^2 > \chi^2(0,95, k-1)$ , величину  $\chi^2$  вносят в протокол вместе с диапазоном нагревостойкости.

#### 4.2. Определение коэффициентов регрессии

Исходя из общего уравнения регрессии

$$Y = a + bx \quad (8)$$

и из определенных взвешенного среднего значения  $x_i$

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{N} \quad (9)$$

выборочного среднего значения  $y_i$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{ii}}{n_i} \quad (10)$$

и, следовательно, суммарного среднего значения  $y_i$

$$\bar{y} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{N} \quad (11)$$

определяются коэффициенты уравнения регрессии по формулам:

$$b = \frac{N \sum (x_i \sum y_{ii}) - (\sum n_i x_i) \cdot (\sum \sum y_{ii})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \quad (12)$$

и

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (13)$$

Линию регрессии вычерчивают на графике срока службы.

#### 4.3. Проверка линейности

Вычисляют дисперсию около линии регрессии по формуле

$$s_2^2 = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N \bar{y}^2) - b(\sum n_i x_i \bar{y}_i - N \bar{x} \bar{y})}{f_2} \quad (14)$$

где  $f_2 = k - 2$  — число степеней свободы  $s_2^2$ , а стохастическую переменную в распределении Фишера из формулы

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2} \quad (15)$$

Переменную величину  $F$  сравнивают с 0,95 квантилей распределений  $F(0,95, f_n, f_d)$  (табл. 7).

Если  $F > F(0,95, f_n, f_d)$  величину  $F$  вносят в протокол вместе с диапазоном нагревостойкости.

Суммарную оценку дисперсии ( $s^2$ ) вычисляют по формуле

$$s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f} \quad (16)$$

где  $f = N - 2$  — число степеней свободы  $s^2$ .

#### 4.4. Доверительная граница для $Y$

Для выбранных величин  $X$  определяют из уравнения (8) значения  $Y$

$$Y = a + bX \quad (17)$$

и ее дисперсию

$$s_y^2 = s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right] \quad (18)$$

Определяют  $t=t(0,95, f)$  из табл. 6 и вычисляют нижнюю одностороннюю границу доверительного интервала ( $Y_c$ ) для  $y$  по формуле

$$Y_c = Y - t s_y, \quad (19)$$

где  $s_y$  — квадратный корень из дисперсии  $s_y^2$

Взаимно связанные величины  $X$  и  $Y_c$  наносят на график срока службы (см. п. 4.2) и проводят кривую, образующую нижнюю одностороннюю границу доверительного интервала с вероятностью 95 % для истинного значения  $Y$  при данной величине  $X$ .

#### 4.3. Коэффициент вариации

Из уравнения регрессии вычисляют величину  $X_5$ , соответствующую  $Y_5=3,7$  (время до разрушения, равное 5000 ч)

$$X_5 = \frac{Y_5 - a}{b} \quad (20)$$

и соответствующую дисперсию для  $Y_5$

$$s_y^2 = s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right] \quad (21)$$

Если коэффициент вариации  $C_v$  в процентах, определяемый из формулы

$$C_v = \frac{s_y}{\bar{y}} \cdot 100, \quad (22)$$

больше 1,5 %, вычисления прекращают и строят только график сроков службы.

4.6. Определение температур, соответствующих времени 20 000 ч ( $\theta_{20}$ ) и 5000 ч ( $\theta_5$ ) до разрушения образца

Применяя формулы (2) и (8) вычисляют

$$\theta_{20} = \frac{b}{4,3 - a} - 273 \quad (23)$$

$$\theta_5 = \frac{b}{3,7 - a} - 273, \quad (24)$$

#### 4.7. Определение доверительной границы для $\theta_5$

Вычисляют промежуточную постоянную  $b_r$

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \quad (25)$$

и ее дисперсию  $s_r^2$

$$s_r^2 = s^2 \left[ \frac{b_r}{N b} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right] \quad (26)$$

и находят верхнюю одностороннюю границу для  $X$

$$X_c = \bar{x} + \frac{Y_5 - \bar{y}}{b_r} + \frac{t s_r}{b_r} \quad (27)$$

где  $t=t(0,95, f)$  и находят нижнюю одностороннюю границу доверительного интервала с вероятностью 95 % для  $\theta_5$

$$\theta_c = \frac{1}{X_c} - 273,$$

## 4.8. Диапазон нагревостойкости

Диапазон нагревостойкости записывают в соответствии с требованиями п. 7.3.2:

$$\Delta t_{20}/\theta_1(\theta_c).$$

## 5. Примеры расчета диапазона нагревостойкости

Примеры расчетов, которые выполняют последовательно на простом настольном калькуляторе или с помощью логарифмической линейки и таблицы логарифмов.

Для удобства используют следующие сокращения:

$S$  — сумма;

$D$  — разность;

$Q$  — квадрат числа;

$P$  — произведение;

$M$  — среднее значение;

$V$  — вариация;

$R$  — обратная величина.

Например,  $SQD$  обозначает сумму квадратов разностей. Индексы помещают в скобки. Условные обозначения использованы в таблицах.

## 5.1. Пример 1 (Непрерывные измерения)

Материал испытывают путем непрерывного измерения проверяемой характеристики (например, сопротивление изоляции).

Время до разрушения определяют для каждого образца как время старения, после которого сопротивление изоляции снижается до уровня нормированной величины (критерия конечной точки).

Предполагаемый температурный диапазон, соответствующий экстраполированному времени до выхода из строя порядка 20 000 ч, составляет от 160 до 169 °C. Из табл. 1 выбирают три температуры воздействия: 220, 200 и 180 °C, то есть  $k=3$  ( $i=1, 2, 3$ ).

Готовят не менее 15 образцов ( $N=15$ ) и по 5 из этих образцов, выбранных произвольно, подвергают старению при каждой температуре  $n_i=5$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ).

Время до разрушения  $t_{ij}$ , ч приведено в табл. 4, где показан также расчет величины, обратной термодинамической температуре  $x_i$  и величин  $y_{ij} = \lg t_{ij}$ . Для удобства величины  $x$  умножают на 1000.

В табл. 5 показаны этапы расчета диапазона нагревостойкости.

5.1.1. Дисперсии  $s_{ij}^2$  вычисляют в соответствии с номером этапа (14)  $V(1, i)$  с  $f(i)=4$  степенями свободы, суммарную дисперсию  $s_1^2$  в соответствии с номером этапа (26),  $V(1)$  с  $f(1)=12$  степенями свободы. Исследуемую переменную  $\chi^2=0,17$ , номер этапа (34) — сравнивают с  $\chi^2(0,95; 2)=6,0$  номер шага (35), полученным из табл. 6. Так как  $\chi^2 < \chi^2(0,95; 2)$ , величина  $\chi^2$  не значима на 5 %-ном уровне значимости.

5.1.2 Вычисляются коэффициенты регрессии  $a = -7,604$ , номер этапа (53), и  $b = 5,174$ , этап (51). Линию регрессии

$$y = -7,604 + 5,174 x$$

вычерчивают на графике сроков службы (черт. 4).

5.1.3. Сопоставляют исследуемую переменную  $F=0,7$ , номер этапа (63) с  $F(0,95; 1; 12)=4,8$ , номер этапа (64). Так как  $F < F(0,95; 1; 12)$ , величина  $F$  не значима на 5 %-ном уровне значимости.

5.1.4. Выбирают температуру 220, 200, 180 и 160 °C, этап (70), определяют границу доверительного интервала с вероятностью 95 %  $t_c$ , номер этапа (83), для соответствующих величин  $t$  номер этапа (84), с коэффициентом Стьюдента  $t(0,95; 13)=1,77$ , номер этапа (69), и наносят на график службы.

Таблица 4

| Расчетный параметр                                            | Значение параметра для $t$ |       |       |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|-------|
|                                                               | 1                          | 2     | 3     |
| Количество образцов $n$                                       | 5                          | 5     | 5     |
| Температура воздействия $\theta$ , °C                         | 220                        | 200   | 180   |
| Термодинамическая температура $(273+\theta)$ , °K             | 493                        | 473   | 453   |
| Переменная $x = 1000/\theta$ , K                              | 2,028                      | 2,114 | 2,208 |
| Время до разрушения $t$ , ч для образцов $j$ :                |                            |       |       |
| 1                                                             | 1100                       | 2400  | 7410  |
| 2                                                             | 740                        | 1820  | 6610  |
| 3                                                             | 720                        | 1660  | 6170  |
| 4                                                             | 620                        | 1740  | 5500  |
| 5                                                             | 910                        | 2700  | 8910  |
| Логарифм времени до разрушения $y = \lg t$ для образцов $j$ : |                            |       |       |
| 1                                                             | 3,04                       | 3,38  | 3,87  |
| 2                                                             | 2,87                       | 3,26  | 3,82  |
| 3                                                             | 2,80                       | 3,22  | 3,79  |
| 4                                                             | 2,79                       | 3,24  | 3,74  |
| 5                                                             | 2,96                       | 3,43  | 3,95  |

В табл. 6 и 7 даны величины  $\chi^2 (0,95; f)$ ,  $t (0,95; f)$  и  $F (0,95; f_n, f_d)$ , где  $f_n$  — количество степеней свободы числителя и  $f_d$  — знаменателя в выражении  $F = \frac{s_n^2}{s_d^2}$ .

5.1.5. Вычисляют коэффициент вариации  $C_v = 0,9\%$ , этап (97). Так как коэффициент вариации  $C_v < 1,5\%$ , вычисления продолжают.

5.1.6. Величины  $\theta_1 = 185^\circ\text{C}$  и  $\theta_{12} = 162^\circ\text{C}$  вычисляют по этапу (90).

5.1.7. Границу доверительного интервала с вероятностью 95% вычисляют по этапу (113):  $\theta_c = 182^\circ\text{C}$ .

5.1.8. Диапазон нагревостойкости имеет вид

$$\text{ДН: } 162/185 \text{ (182)}.$$

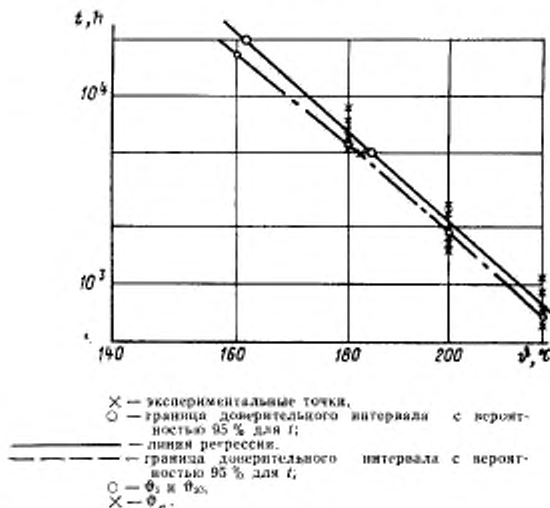
5.2. Пример 2 (Циклическое применение проверочного испытания)

Материал подвергается проверочным испытаниям (например, испытанию заданным напряжением в течение 1 мин в соответствии с табл. 3, испытание II).

Предполагаемый температурный диапазон, соответствующий экстраполированному времени до разрушения, равному 20 000 ч, от 140 до 149 °C. Из табл. 1 выбирают 3 температуры воздействия и соответствующие длительности воздействия этих температур в циклах, как указано в табл. 8.

Подготавливают не менее 30 образцов ( $N=30$ ) и предварительно проводят проверочные испытания. Все неисправные образцы заменяют. По 10 произвольно выбранных образцов подвергают старению при каждой из трех температур, то есть  $k=3$  ( $i=1, 2, 3$ ) и  $n_i=10$  ( $j=1, 2, \dots, 10$ ).

График сроков службы



Черт. 4

После каждого нормированного периода теплового воздействия  $t_p$ , ч образцы вынимают из термостата и проводят проверочные испытания. Образцы, выдержавшие испытание, снова помещают в термостат для следующего цикла, а для разрушившихся образцов регистрируют количество проведенных циклов старения  $p$  в соответствии с табл. 8. Время до разрушения определяют как среднюю точку последнего цикла, т. е.

$$t = t_p(p - 0,5). \quad (28)$$

В табл. 9 показан расчет переменных  $y = \lg t$  и  $x$  равной величины обратной термодинамической температуры.

Для удобства величины  $x$  умножают на 1000.

После этого расчеты выполняют, как в примере 1 (см табл. 10, где числа в скобках относятся к соответствующим этапам в табл. 5).

### 5.3. Пример 3 (Разрушающие испытания)

Материалы подвергаются разрушающим испытаниям (например, определяются пределы прочности при растяжении в соответствии с табл. 3, испытание 2.1). За критерий конечной точки принимают снижение прочности на 50 % от начальной величины.

На основе имеющегося опыта предполагается, что логарифм показателя предела прочности при растяжении является линейной функцией времени.

Таблица 5

| Номер этапа расчета | Этап расчета             | Расшифрованное задание (через номер шага) | Числовые значения |          |          |          | при температуре стирания |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|--------------------------|
|                     |                          |                                           | для $f$           |          |          |          |                          |
|                     |                          |                                           | 1                 | 2        | 3        |          |                          |
| (1)                 | $n(i)$                   | Из табл. 4                                | 5                 | 5        | 5        | 5        |                          |
| (2)                 | $x(i)$                   | Из табл. 4                                | 2,028             | 2,114    | 2,208    | 2,208    |                          |
| (3)                 | $Qx(i)$                  | (2) в квадрате                            | 4,112784          | 4,468996 | 4,875264 | 4,875264 |                          |
| (4)                 | $y(i, i)$                | Из табл. 4                                | 3,04              | 3,38     | 3,87     | 3,87     |                          |
|                     |                          |                                           | 2,87              | 3,26     | 3,82     | 3,82     |                          |
|                     |                          |                                           | 2,86              | 3,22     | 3,79     | 3,79     |                          |
|                     |                          |                                           | 2,79              | 3,24     | 3,74     | 3,74     |                          |
|                     |                          |                                           | 2,96              | 3,43     | 3,95     | 3,95     |                          |
| (5)                 | $Qy(i, i)$               | (4) в квадрате                            | 9,2416            | 11,4244  | 14,9769  | 14,9769  |                          |
|                     |                          |                                           | 8,2369            | 10,6276  | 14,5924  | 14,5924  |                          |
|                     |                          |                                           | 8,1796            | 10,3684  | 14,3641  | 14,3641  |                          |
|                     |                          |                                           | 7,7841            | 10,4976  | 13,9876  | 13,9876  |                          |
|                     |                          |                                           | 8,7616            | 11,7649  | 15,6025  | 15,6025  |                          |
| (6)                 | $Sy(i)$                  | (4) в сумме                               | 14,52             | 16,53    | 19,17    | 19,17    |                          |
| (7)                 | $SQy(i)$                 | (5) в сумме                               | 42,2038           | 54,6829  | 73,5215  | 73,5215  |                          |
| (8)                 | $n(i) \cdot SQy(i)$      | (1) · (7)                                 | 211,0190          | 273,4145 | 367,6175 | 367,6175 |                          |
| (9)                 | $QSy(i)$                 | (6) в квадрате                            | 210,8304          | 273,2409 | 367,4889 | 367,4889 |                          |
| (10)                | $n(i) \cdot SQy(i)$      | (8) - (9)                                 | 0,1886            | 0,1736   | 0,1286   | 0,1286   |                          |
| (11)                | $SQy(i)$                 | (10)/(1)                                  | 0,03772           | 0,03472  | 0,02572  | 0,02572  |                          |
| (12)                | $f(i)$                   | (1) - 1                                   | 4                 | 4        | 4        | 4        |                          |
| (13)                | $Rf(i)$                  | 1/(12)                                    | 0,25              | 0,25     | 0,25     | 0,25     |                          |
| (14)                | $V(i, i)$                | (11)/(12)                                 | 0,00943           | 0,00868  | 0,00643  | 0,00643  |                          |
| (15)                | $\lg V(i, i)$            | $\lg$ (14)                                | 0,975-3           | 0,939-3  | 0,808-3  | 0,808-3  |                          |
| (16)                | $f(i) \cdot \lg V(i, i)$ | (12) · (15)                               | 3,900-12          | 3,756-12 | 3,232-12 | 3,232-12 |                          |
| (17)                | $Mg(i)$                  | (6)/(1)                                   | 2,90              | 3,31     | 3,83     | 3,83     |                          |
| (18)                | $n(i) \cdot Qx(i)$       | (1) · (3)                                 | 20,56392          | 22,34498 | 24,37632 | 24,37632 |                          |
| (19)                | $n(i) \cdot x(i)$        | (1) · (2)                                 | 10,14             | 10,57    | 11,04    | 11,04    |                          |
| (20)                | $x(i) \cdot Sy(i)$       | (2) · (6)                                 | 29,44656          | 34,94442 | 42,32716 | 42,32716 |                          |
| (21)                | $QSy(i) \cdot n(i)$      | (9)/(1)                                   | 42,16608          | 54,64818 | 73,49778 | 73,49778 |                          |

Продолжение табл. 5

| Номер этапа расчета                                                                                  | Этап расчета                                                                                                                      | Расшифрованное действие (через номер шага)                                                                                                                                                | Числовые значения                                                                                                              |   |   | при температуре старения |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--------------------------|
|                                                                                                      |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                           | для t                                                                                                                          |   |   |                          |
|                                                                                                      |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                           | 1                                                                                                                              | 2 | 3 |                          |
| (22)<br>(23)<br>(24)<br>(25)<br>(26)<br>(27)<br>(28)<br>(29)<br>(30)<br>(31)<br>(32)<br>(33)         | $SSQDy$<br>$SRf$<br>$I(I)$<br>$Rf(I)$<br>$V(I)$<br>$lg V(I)$<br>$L(I)$<br>$L$<br>$L(I)-L$<br>$RF$<br>$RF/3(h-I)$<br>$\varepsilon$ | (11) в сумме<br>(13) в сумме<br>(12) в сумме<br>$1/(24)$<br>(22)/(24)<br>$lg(26)$<br>(24)·(27)<br>(16) в сумме<br>(28)·(29)<br>(23)·(25)<br>(31)/3(k-1)<br>$1+(32)$                       | 0,0916<br>0,75<br>12<br>0,083<br>0,0082<br>0,9143<br>10,96836<br>10,88836<br>0,080<br>0,67<br>0,11<br>1,11                     |   |   |                          |
| (34)<br>(35)<br>(36)<br>(37)<br>(38)<br>(39)<br>(40)<br>(41)<br>(42)<br>(43)<br>(44)<br>(45)<br>(46) | $\chi^2$<br>$\chi^2(0,95; k-1)$<br>$N$<br>$Sx$<br>$Mx$<br>$SQx$<br>$NSQx$<br>$QSx$<br>$NSQDx$<br>$SQDx$<br>$Sy$<br>$My$<br>$SPxy$ | 2,3(10)/(33)<br>Из табл. 6<br>(1) в сумме<br>(19) в сумме<br>(37)/36<br>(18) в сумме<br>(36)·(39)<br>(37) в квадрате<br>(40)·(41)<br>(42)/(36)<br>(6) в сумме<br>(44)/(36)<br>(2) в сумме | 0,17<br>6,0<br>15<br>31,75<br>2,1167<br>67,28522<br>1,0092783<br>1,0080625<br>1,2158<br>0,08105<br>50,22<br>3,348<br>106,71834 |   |   |                          |

Продолжение табл. 6

| Номер этапа расчета | Этап расчета        | Расшифрованное действие (через номер шага) | Числовое значение |            |     | при температуре старения |
|---------------------|---------------------|--------------------------------------------|-------------------|------------|-----|--------------------------|
|                     |                     |                                            | 1                 | 2          | 3   |                          |
| (47)                | $N \cdot SPxy$      | (36)·(46)                                  | -                 | 1,600,7751 |     |                          |
| (48)                | $Sx \cdot Sy$       | (37)·(44)                                  |                   | 1,594,4850 |     |                          |
| (49)                | $N \cdot SPDxy$     | (47)·(48)                                  |                   | 6,2901     |     |                          |
| (50)                | $SPDxy$             | (49)/(36)                                  |                   | 0,41934    |     |                          |
| (51)                | $b$                 | (50)/(43)                                  |                   | 5,174      |     |                          |
| (52)                | $b \cdot Mx$        | (51)·(38)                                  |                   | 10,952     |     |                          |
| (53)                | $a$                 | (45)·(52)                                  |                   | -7,604     |     |                          |
| (54)                | $SQy$               | (21) в сумме                               |                   | 170,3120   |     |                          |
| (55)                | $N \cdot SQy$       | (36)·(54)                                  |                   | 2,554,680  |     |                          |
| (56)                | $QSy$               | (44) в квадрате                            |                   | 2,522,048  |     |                          |
| (57)                | $N \cdot SQDy$      | (55)·(56)                                  |                   | 32,632     |     |                          |
| (58)                | $SQDy$              | (57)/(36)                                  |                   | 2,17547    |     |                          |
| (59)                | $B \cdot SPDxy$     | (51)·(50)                                  |                   | 2,16967    |     |                          |
| (60)                | $SQDMy$             | (58)·(59)                                  |                   | 0,00680    |     |                          |
| (61)                | $f(2)$              | $k-2$                                      |                   | 1          |     |                          |
| (62)                | $V(2)$              | (60)/(61)                                  |                   | 0,0068     |     |                          |
| (63)                | $F$                 | (62)/(26)                                  |                   | 0,7        |     |                          |
| (64)                | $F(0,95; k-2; N-k)$ | Из табл. 7                                 |                   | 4,8        |     |                          |
| (65)                | $SSSQDy$            | (22)·(60)                                  |                   | 0,10396    |     |                          |
| (66)                | $f$                 | (36)·2                                     |                   | 13         |     |                          |
| (67)                | $V$                 | (65)/(66)                                  |                   | 0,00800    |     |                          |
| (68)                | $1/N$               | 1/(36)                                     |                   | 0,0667     |     |                          |
| (69)                | $t(0,95; N-2)$      | Из табл. 6                                 |                   | 1,77       |     |                          |
| (70)                | $\theta, ^\circ C$  | (70)+273                                   | 220               | 200        | 180 | 160                      |
| (71)                | $\theta, K$         |                                            | 493               | 473        | 453 | 433                      |

Продолжение табл. 5

| Номер этапа расчета | Этап расчета             | Расширенное действие (через номер шага) | Числовые значения |         |         | при температуре старения |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------|---------|---------|--------------------------|
|                     |                          |                                         | для $t$           |         |         |                          |
|                     |                          |                                         | 1                 | 2       | 3       |                          |
| (72)                | $X$                      | 10/(71)                                 | 2,028             | 2,114   | 2,208   | 2,309                    |
| (73)                | $b \cdot X$              | (51)·(72)                               | 10,493            | 10,938  | 11,424  | 11,947                   |
| (74)                | $Y$                      | (73) + (53)                             | 2,869             | 3,334   | 3,820   | 4,343                    |
| (75)                | $DX$                     | (72) - (38)                             | -0,0887           | -0,0027 | 0,0913  | 0,1923                   |
| (76)                | $QDX$                    | (75) в квадрате                         | 0,00787           | 0,00001 | 0,00834 | 0,3698                   |
| (77)                | $QDX/SQDX$               | (76)/(43)                               | 0,09710           | 0,00012 | 0,10290 | 0,45626                  |
| (78)                | $C$                      | (68) + (77)                             | 0,1638            | 0,0668  | 0,1696  | 0,5230                   |
| (79)                | $V(Y)$                   | (67)·(78)                               | 0,00131           | 0,00053 | 0,00136 | 0,00118                  |
| (80)                | $s(Y)$                   | Квадратный корень (79)                  | 0,036             | 0,023   | 0,037   | 0,065                    |
| (81)                | $t_s(Y)$                 | (69)·(80)                               | 0,064             | 0,041   | 0,065   | 0,115                    |
| (82)                | $Y(c)$                   | (74)·(81)                               | 2,825             | 3,293   | 3,755   | 4,228                    |
| (83)                | $t(c)$                   | $\lg^{-1}$ (82)                         | 668               | 1960    | 5890    | 16900                    |
| (84)                | $t$                      | $\lg^{-1}$ (74)                         | 774               | 2160    | 6610    | 22000                    |
| (85)                | $T, ^\circ\text{C}$      |                                         | 5,000             |         | 20000   |                          |
| (86)                | $Y$                      |                                         | 3,699             |         | 4,301   |                          |
| (87)                | $Y - a$                  | $\lg$ (85)                              | 11,101            |         | 11,905  |                          |
| (88)                | $X$                      | (86) - (53)                             | 2,185             |         | 2,301   |                          |
| (89)                | $\theta, ^\circ\text{C}$ | (87)/(51)                               | 458               |         | 435     |                          |
| (90)                | $\theta, ^\circ\text{C}$ | $10^3/(88)$                             | 185               |         | 162     |                          |
| (91)                | $DX$                     | (88) - (38)                             | 0,0683            |         |         |                          |
| (92)                | $QDX$                    | (91) в квадрате                         | 0,00466           |         |         |                          |
| (93)                | $QDX/SQDX$               | (92)/(43)                               | 0,0576            |         |         |                          |
| (94)                | $C$                      | (68) + (93)                             | 0,1243            |         |         |                          |
| (95)                | $V(Y)$                   | (67)·(94)                               | 0,00099           |         |         |                          |
| (96)                | $s(Y)$                   | Квадратный корень (95)                  | 0,032             |         |         |                          |
| (97)                | $C_v$                    | (96)/(86)                               | 0,009             |         |         |                          |

Продолжение табл. 6

| Номер этапа расчета | Этап расчета              | Расширенное действие (через номер шага) | Числовое значение |   |   | при температуре старения |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------|---|---|--------------------------|
|                     |                           |                                         | 1                 | 2 | 3 |                          |
| (98)                | $Q_t$                     | (69) в квадрате                         | 1,11              |   |   |                          |
| (99)                | $V \cdot Q_t$             | (67)·(98)                               | 0,025             |   |   |                          |
| (100)               | $V \cdot Q_t / SP D_{xy}$ | (99)/(50)                               | 0,060             |   |   |                          |
| (101)               | $b(r)$                    | (51) - (100)                            | 5,114             |   |   |                          |
| (102)               | $b(r)/b$                  | (101)/(51)                              | 0,988             |   |   |                          |
| (103)               | $B(r)/b \cdot N$          | (102)·(68)                              | 0,0659            |   |   |                          |
| (104)               | $C(r)$                    | (103) + (93)                            | 0,1235            |   |   |                          |
| (105)               | $V(r)$                    | (67)·(104)                              | 0,00099           |   |   |                          |
| (106)               | $s(r)$                    | Квадратный корень (105)                 | 0,0314            |   |   |                          |
| (107)               | $t \cdot s(r)$            | (69)·(106)                              | 0,0536            |   |   |                          |
| (108)               | $t \cdot s(r)/b(r)$       | (107)/(101)                             | 0,0109            |   |   |                          |
| (109)               | $DY$                      | (86) - (45)                             | 0,351             |   |   |                          |
| (110)               | $DY/b(r)$                 | (109)/(101)                             | 0,0686            |   |   |                          |
| (111)               | $X(c)$                    | (38) + (110) + (108)                    | 2,196             |   |   |                          |
| (112)               | $\theta(c), K$            | $10^3 \cdot (111)$                      | 455               |   |   |                          |
| (113)               | $\theta(c), ^\circ C$     | (112) - 273                             | 182               |   |   |                          |

Таблица 6

| Количество степеней свободы $f$ | 0,95 квантилей распределения |      | Количество степеней свободы | 0,95 квантилей распределения |      |
|---------------------------------|------------------------------|------|-----------------------------|------------------------------|------|
|                                 | $\chi^2$                     | $t$  |                             | $\chi^2$                     | $t$  |
| 1                               | 3,8                          | 6,31 | 13                          | 22,4                         | 1,77 |
| 2                               | 6,0                          | 2,92 | 14                          | 23,7                         | 1,76 |
| 3                               | 7,8                          | 2,35 | 15                          | 25,0                         | 1,75 |
| 4                               | 9,5                          | 2,13 | 16                          | 26,3                         | 1,75 |
| 5                               | 11,1                         | 2,02 | 17                          | 27,6                         | 1,74 |
| 6                               | 12,6                         | 1,94 | 18                          | 28,9                         | 1,73 |
| 7                               | 14,1                         | 1,90 | 19                          | 30,1                         | 1,73 |
| 8                               | 15,5                         | 1,86 | 20                          | 31,4                         | 1,73 |
| 9                               | 16,9                         | 1,83 | 25                          | 37,7                         | 1,71 |
| 10                              | 18,3                         | 1,81 | 30                          | 43,8                         | 1,70 |
| 11                              | 19,7                         | 1,80 | 40                          | 55,8                         | 1,68 |
| 12                              | 21,0                         | 1,78 | 50                          | 67,5                         | 1,68 |
|                                 |                              |      | 100                         | 124,3                        | 1,66 |
|                                 |                              |      | 500                         | 553,2                        | 1,65 |

Таблица 7

| Количество степеней свободы<br>знаменателя $f_d$ | 0,95 квантилей распределения для $F$<br>при количестве степеней свободы<br>числителя $f_n$ |     |     |     |     | Количество степеней свободы<br>числителя $f_n$ | 0,95 квантилей распределения для $F$<br>при количестве степеней свободы<br>числителя $f_n$ |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                                  | 1                                                                                          | 2   | 3   | 4   | 5   |                                                | 1                                                                                          | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 1                                                | 161                                                                                        | 230 | 216 | 225 | 230 | 14                                             | 4,6                                                                                        | 3,7 | 3,3 | 3,1 | 3,0 |
| 2                                                | 19                                                                                         | 19  | 19  | 19  | 19  | 15                                             | 4,5                                                                                        | 3,7 | 3,3 | 3,1 | 2,9 |
| 3                                                | 10,1                                                                                       | 9,6 | 9,3 | 9,1 | 9,0 | 16                                             | 4,5                                                                                        | 3,6 | 3,2 | 3,0 | 2,9 |
| 4                                                | 7,7                                                                                        | 6,9 | 6,6 | 6,4 | 6,3 | 17                                             | 4,5                                                                                        | 3,6 | 3,2 | 3,0 | 2,8 |
| 5                                                | 6,6                                                                                        | 5,8 | 5,4 | 5,2 | 5,1 | 18                                             | 4,4                                                                                        | 3,6 | 3,2 | 2,9 | 2,8 |
| 6                                                | 6,0                                                                                        | 5,1 | 4,8 | 4,5 | 4,4 | 19                                             | 4,4                                                                                        | 3,5 | 3,1 | 2,9 | 2,7 |
| 7                                                | 5,6                                                                                        | 4,7 | 4,4 | 4,1 | 4,0 | 20                                             | 4,4                                                                                        | 3,5 | 3,1 | 2,9 | 2,7 |
| 8                                                | 5,3                                                                                        | 4,5 | 4,1 | 3,8 | 3,7 | 25                                             | 4,2                                                                                        | 3,4 | 3,0 | 2,8 | 2,6 |
| 9                                                | 5,1                                                                                        | 4,3 | 3,9 | 3,6 | 3,5 | 30                                             | 4,2                                                                                        | 3,3 | 2,9 | 2,7 | 2,5 |
| 10                                               | 5,0                                                                                        | 4,1 | 3,7 | 3,5 | 3,3 | 40                                             | 4,1                                                                                        | 3,2 | 2,8 | 2,6 | 2,5 |
| 11                                               | 4,8                                                                                        | 4,0 | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 50                                             | 4,0                                                                                        | 3,2 | 2,8 | 2,6 | 2,4 |
| 12                                               | 4,8                                                                                        | 3,9 | 3,5 | 3,3 | 3,1 | 100                                            | 3,9                                                                                        | 3,1 | 2,7 | 2,5 | 2,3 |
| 13                                               | 4,7                                                                                        | 3,8 | 3,4 | 3,2 | 3,0 | 500                                            | 3,9                                                                                        | 3,0 | 2,6 | 2,4 | 2,2 |

Предполагаемый температурный диапазон, соответствующий экстраполированному времени до разрушения, равному 20000 ч, от 150 до 159 °С.

Из табл. 1 выбирают 3 температуры воздействия  $\theta$  °С и периоды воздействия  $t_p$  — 48 при 210 °С, 168 ч при 190 °С и 672 ч при 170 °С.

Подготавливают около 200 образцов. 10 образцов, выбранных произвольно, подвергают старению в течение 48 ч при 170 °С, после чего их испытывают, чтобы определить начальную величину предела прочности при растяжении. Оставшиеся образцы делят произвольно на три группы в термостатах при температурах 212, 190 и 171 °С. В конце каждого периода старения на 5 образцах

определяют предел прочности при растяжении, после чего их выбрасывают. Предел прочности при растяжении выражают в виде  $\lg p$  — логарифма отношения измеренной величины к начальному значению. Тогда критерий конечной точки принимает вид  $\lg p_c = \lg 0,5 = 0,6990 - 1$ .

Полученные таким образом величины  $\lg p$  приведены в табл. 11 для 4 сроков старения, после которых среднее значение измерений величины проверяемой характеристики наиболее близко к критерию конечной точки, как показано на черт. 5, для случая  $\theta = 212^\circ\text{C}$ .

Для более точного построения зависимости изменения проверяемой характеристики от времени старения при каждой из трех температур результаты испытаний обрабатывают по методу наименьших квадратов следующим образом.

Рассчитывают коэффициенты в уравнении

$$y = a + bx,$$

где  $y = \lg p$ .

$x$  — продолжительность старения до момента измерения  $t_m$ ;

$$a = \frac{\sum y_i}{k} - b\bar{x}; \quad (29)$$

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (30)$$

где

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{k},$$

а

$$\bar{y}_1 = \frac{\sum y_{i1}}{n_1},$$

$k = 4$ , количество сроков старения, после которых использованы результаты испытаний для построения графика изменения свойства при каждой температуре ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) и  $n_i = 5$ , количество образцов, испытанных после каждого срока старения ( $j = 1, 2, \dots, 5$ ).

Расчеты приведены в табл. 12. По результатам расчета проводят линию наилучшего совпадения с экспериментальными точками.

Для каждого образца через точку, выражающую результат его испытания, проводят линию, параллельную линии наилучшего совпадения, как показано на черт. 5 для случая  $\theta = 212^\circ\text{C}$ .

Время, соответствующее точке пересечения линии отдельного образца с линией критерия конечной точки, принимают за время до разрушения этого образца. Время до разрушения образца вычисляют по формуле

$$t = t_m + \frac{\lg p_c - \lg p}{b}, \quad (31)$$

где  $t_m$  — время до момента измерения и  $\lg p_c = 0,6990 - 1$  — критерий конечной точки.

Таблица 8

| Расчетный параметр                       | Значение параметра для $t$ |     |     |
|------------------------------------------|----------------------------|-----|-----|
|                                          | 1                          | 2   | 3   |
| Температура воздействия $\theta$ , °C    | 200                        | 180 | 160 |
| Продолжительность цикла $t_p$ , ч        | 48                         | 168 | 672 |
| Количество циклов $p$ для образцов $j$ : |                            |     |     |
| 1                                        | 14                         | 7   | 7   |
| 2                                        | 10                         | 13  | 7   |
| 3                                        | 8                          | 7   | 6   |
| 4                                        | 10                         | 6   | 7   |
| 5                                        | 14                         | 9   | 9   |
| 6                                        | 11                         | 8   | 7   |
| 7                                        | 9                          | 11  | 9   |
| 8                                        | 12                         | 12  | 11  |
| 9                                        | 8                          | 6   | 8   |
| 10                                       | 9                          | 10  | 8   |

Таблица 9

| Расчетный параметр                                                      | Значение параметра для $t$ |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|-------|
|                                                                         | 1                          | 2     | 3     |
| Количество образцов $n$                                                 | 10                         | 10    | 10    |
| Температура воздействия $\theta$ , °C                                   | 200                        | 180   | 160   |
| Переменная $x = \frac{1000}{\theta + 273}$                              | 2,114                      | 2,208 | 2,309 |
| Время до разрушения, $t$ , ч, для образца $j$ :                         |                            |       |       |
| 1                                                                       | 648                        | 1092  | 4368  |
| 2                                                                       | 456                        | 2100  | 4368  |
| 3                                                                       | 360                        | 1092  | 3696  |
| 4                                                                       | 456                        | 924   | 4368  |
| 5                                                                       | 648                        | 1428  | 5712  |
| 6                                                                       | 504                        | 1260  | 4368  |
| 7                                                                       | 408                        | 1764  | 5712  |
| 8                                                                       | 552                        | 1932  | 7056  |
| 9                                                                       | 360                        | 924   | 5040  |
| 10                                                                      | 408                        | 1596  | 5040  |
| Переменная $y = \lg t$ логарифм времени до разрушения для образца $j$ : |                            |       |       |
| 1                                                                       | 2,81                       | 3,04  | 3,64  |
| 2                                                                       | 2,66                       | 3,32  | 3,64  |
| 3                                                                       | 2,56                       | 3,04  | 3,57  |
| 4                                                                       | 2,66                       | 2,97  | 3,64  |

Продолжение табл. 9

| Расчетный параметр | Значение параметра для $i$ |      |      |
|--------------------|----------------------------|------|------|
|                    | 1                          | 2    | 3    |
| 5                  | 2,81                       | 3,15 | 3,76 |
| 6                  | 2,70                       | 3,10 | 3,64 |
| 7                  | 2,61                       | 3,25 | 3,76 |
| 8                  | 2,74                       | 3,29 | 3,85 |
| 9                  | 2,56                       | 2,97 | 3,70 |
| 10                 | 2,61                       | 3,20 | 3,70 |

Таблица 10

| Номер этапа<br>расчета | Числовое значение |          |           | при температуре<br>старения |
|------------------------|-------------------|----------|-----------|-----------------------------|
|                        | для $i$           |          |           |                             |
|                        | 1                 | 2        | 3         |                             |
| (1)                    | 10                | 10       | 10        |                             |
| (2)                    | 2,114             | 2,208    | 2,309     |                             |
| (3)                    | 4,468995          | 4,875264 | 5,331481  |                             |
| (4)                    | 2,81              | 3,04     | 3,64      |                             |
|                        | 2,66              | 3,32     | 3,64      |                             |
|                        | 2,56              | 3,04     | 3,57      |                             |
|                        | 2,66              | 2,97     | 3,64      |                             |
|                        | 2,81              | 3,15     | 3,76      |                             |
|                        | 2,70              | 3,10     | 3,64      |                             |
|                        | 2,61              | 3,25     | 3,76      |                             |
|                        | 2,74              | 3,29     | 3,85      |                             |
|                        | 2,56              | 2,97     | 3,70      |                             |
|                        | 2,61              | 3,20     | 3,70      |                             |
| (5)                    | 7,8961            | 9,2416   | 13,2496   |                             |
|                        | 7,0756            | 11,0224  | 13,2496   |                             |
|                        | 6,5536            | 9,2416   | 12,7449   |                             |
|                        | 7,0756            | 8,8209   | 13,2496   |                             |
|                        | 7,8961            | 9,9225   | 14,1376   |                             |
|                        | 7,2900            | 9,6100   | 13,2496   |                             |
|                        | 6,8121            | 10,5625  | 14,1376   |                             |
|                        | 7,5076            | 10,8241  | 14,8225   |                             |
|                        | 6,5536            | 8,8209   | 13,6900   |                             |
|                        | 6,8121            | 10,2400  | 13,6900   |                             |
| (6)                    | 26,72             | 31,33    | 36,90     |                             |
| (7)                    | 71,4724           | 98,3065  | 136,2210  |                             |
| (8)                    | 714,724           | 983,065  | 1362,210  |                             |
| (9)                    | 713,9584          | 981,5689 | 1361,6100 |                             |
| (10)                   | 0,7656            | 1,4961   | 0,6000    |                             |
| (11)                   | 0,07656           | 0,14961  | 0,06000   |                             |
| (12)                   | 9                 | 9        | 9         |                             |
| (13)                   | 0,111             | 0,111    | 0,111     |                             |
| (14)                   | 0,00851           | 0,01662  | 0,00667   |                             |
| (15)                   | 0,9303            | 0,2212   | 0,8243    |                             |
| (16)                   | 8,37027           | 1,98918  | 7,41627   |                             |
| (17)                   | 2,672             | 3,133    | 3,690     |                             |
| (18)                   | 44,68995          | 48,75264 | 53,31481  |                             |

| Номер этапа<br>расчета | Числовое значение |           |           | при температуре<br>старения |
|------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------------------------|
|                        | для $t$           |           |           |                             |
|                        | 1                 | 2         | 3         |                             |
| (19)                   | 21,14             | 22,08     | 23,09     |                             |
| (20)                   | 56,48608          | 69,17664  | 85,20210  |                             |
| (21)                   | 71,39584          | 98,15689  | 136,16100 |                             |
| (22)                   |                   | 0,28617   |           |                             |
| (23)                   |                   | 0,333     |           |                             |
| (24)                   |                   | 27        |           |                             |
| (25)                   |                   | 0,037     |           |                             |
| (26)                   |                   | 0,0106    |           |                             |
| (27)                   |                   | 0,0252    |           |                             |
| (28)                   |                   | 0,67554   |           |                             |
| (29)                   |                   | 17,77572  |           |                             |
| (30)                   |                   | 0,900     |           |                             |
| (31)                   |                   | 0,296     |           |                             |
| (32)                   |                   | 0,05      |           |                             |
| (33)                   |                   | 1,05      |           |                             |
| (34)                   |                   | 1,97      |           |                             |
| (35)                   |                   | 6,0       |           |                             |
| (36)                   |                   | 30        |           |                             |
| (37)                   |                   | 66,31     |           |                             |
| (38)                   |                   | 2,2103    |           |                             |
| (39)                   |                   | 146,7574  |           |                             |
| (40)                   |                   | 4402,7200 |           |                             |
| (41)                   |                   | 4397,0161 |           |                             |
| (42)                   |                   | 5,7059    |           |                             |
| (43)                   |                   | 0,19020   |           |                             |
| (44)                   |                   | 94,95     |           |                             |
| (45)                   |                   | 3,165     |           |                             |
| (46)                   |                   | 210,86482 |           |                             |
| (47)                   |                   | 6325,9446 |           |                             |
| (48)                   |                   | 6296,1345 |           |                             |
| (49)                   |                   | 29,8101   |           |                             |
| (50)                   |                   | 0,99367   |           |                             |
| (51)                   |                   | 5,224     |           |                             |
| (52)                   |                   | 11,547    |           |                             |
| (53)                   |                   | —8,382    |           |                             |
| (54)                   |                   | 305,71373 |           |                             |
| (55)                   |                   | 9171,4119 |           |                             |
| (56)                   |                   | 9015,5025 |           |                             |
| (57)                   |                   | 155,9094  |           |                             |
| (58)                   |                   | 5,19698   |           |                             |
| (59)                   |                   | 5,19093   |           |                             |
| (60)                   |                   | 0,00605   |           |                             |
| (61)                   |                   | 1         |           |                             |
| (62)                   |                   | 0,00605   |           |                             |
| (63)                   |                   | 0,6       |           |                             |
| (64)                   |                   | 4,2       |           |                             |
| (65)                   |                   | 0,29222   |           |                             |

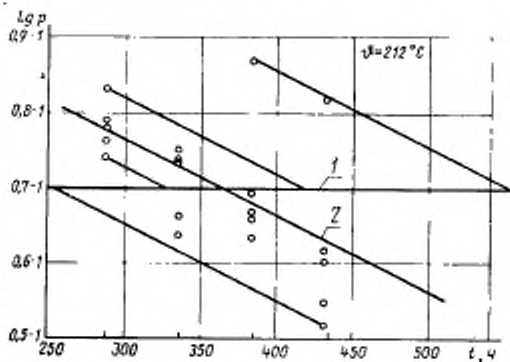
Продолжение табл. 10\*

| Номер этапа<br>расчета | Числовое значение |         |          | при температуре<br>старения |
|------------------------|-------------------|---------|----------|-----------------------------|
|                        | для $i$           |         |          |                             |
|                        | 1                 | 2       | 3        |                             |
| (66)                   | 28                |         |          |                             |
| (67)                   | 0,01044           |         |          |                             |
| (68)                   | 0,03333           |         |          |                             |
| (69)                   | 1,70              |         |          |                             |
| (70)                   | 200               | 180     | 160      | 140                         |
| (71)                   | 473               | 453     | 433      | 413                         |
| (72)                   | 2,114             | 2,208   | 2,309    | 2,421                       |
| (73)                   | 11,044            | 11,535  | 12,062   | 12,647                      |
| (74)                   | 2,662             | 3,153   | 3,680    | 4,265                       |
| (75)                   | -0,0963           | -0,0023 | 0,0987   | 0,2107                      |
| (76)                   | 0,00927           | 0,00001 | 0,000974 | 0,04439                     |
| (77)                   | 0,04874           | 0,00005 | 0,05121  | 0,23339                     |
| (78)                   | 0,0821            | 0,0334  | 0,0845   | 0,2667                      |
| (79)                   | 0,00086           | 0,00035 | 0,00088  | 0,00278                     |
| (80)                   | 0,029             | 0,019   | 0,030    | 0,053                       |
| (81)                   | 0,049             | 0,032   | 0,051    | 0,090                       |
| (82)                   | 2,613             | 3,121   | 3,629    | 4,175                       |
| (83)                   | 410               | 1320    | 4260     | 15000                       |
| (84)                   | 459               | 1420    | 4790     | 18400                       |
| (85)                   | 5000              |         |          | 20000                       |
| (86)                   | 3,699             |         |          | 4,301                       |
| (87)                   | 12,061            |         |          | 12,683                      |
| (88)                   | 2,313             |         |          | 2,428                       |
| (89)                   | 432               |         |          | 412                         |
| (90)                   | 159               |         |          | 139                         |
| (91)                   | 0,1027            |         |          |                             |
| (92)                   | 0,01055           |         |          |                             |
| (93)                   | 0,0555            |         |          |                             |
| (94)                   | 0,0888            |         |          |                             |
| (95)                   | 0,00093           |         |          |                             |
| (96)                   | 0,030             |         |          |                             |
| (97)                   | 0,008             |         |          |                             |
| (98)                   | 2,89              |         |          |                             |
| (99)                   | 0,030             |         |          |                             |
| (100)                  | 0,030             |         |          |                             |
| (101)                  | 5,194             |         |          |                             |
| (102)                  | 0,994             |         |          |                             |
| (103)                  | 0,0331            |         |          |                             |
| (104)                  | 0,0886            |         |          |                             |
| (105)                  | 0,00092           |         |          |                             |
| (106)                  | 0,0303            |         |          |                             |
| (107)                  | 0,0515            |         |          |                             |
| (108)                  | 0,0099            |         |          |                             |
| (109)                  | 0,534             |         |          |                             |
| (110)                  | 0,1028            |         |          |                             |
| (111)                  | 2,323             |         |          |                             |
| (112)                  | 430               |         |          |                             |
| (113)                  | 157               |         |          |                             |

Таблица 11

| $t_m, \text{ч}$ | $\lg p$                                             | $t_m, \text{ч}$ | $\lg p$                                             | $t_m, \text{ч}$ | $\lg p$                                             |
|-----------------|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| при 212 °С      |                                                     | при 190 °С      |                                                     | при 171 °С      |                                                     |
| 288             | 0,834—1<br>0,789—1<br>0,781—1<br>0,766—1<br>0,743—1 | 1344            | 0,754—1<br>0,784—1<br>0,709—1<br>0,835—1<br>0,709—1 | 5376            | 0,711—1<br>0,667—1<br>0,814—1<br>0,841—1<br>0,726—1 |
| 336             | 0,752—1<br>0,664—1<br>0,735—1<br>0,640—1<br>0,737—1 | 1512            | 0,750—1<br>0,602—1<br>0,750—1<br>0,772—1<br>0,668—1 | 6048            | 0,748—1<br>0,709—1<br>0,821—1<br>0,712—1<br>0,641—1 |
| 384             | 0,635—1<br>0,871—1<br>0,661—1<br>0,669—1<br>0,696—1 | 1680            | 0,602—1<br>0,718—1<br>0,599—1<br>0,613—1<br>0,599—1 | 6720            | 0,649—1<br>0,637—1<br>0,633—1<br>0,713—1<br>0,667—1 |
| 432             | 0,619—1<br>0,550—1<br>0,819—1<br>0,519—1<br>0,601—1 | 1848            | 0,636—1<br>0,544—1<br>0,506—1<br>0,601—1<br>0,662—1 | 7392            | 0,529—1<br>0,512—1<br>0,749—1<br>0,593—1<br>0,760—1 |

Определение предлагаемого времени до разрушения  
образца (разрушающие испытания)



1—линия критерия конечной точки, 2—линия наилучшего соопадения

Таблица 12

| Расчетный параметр    | Значение расчетного параметра при $\theta$ , °C |            |             |
|-----------------------|-------------------------------------------------|------------|-------------|
|                       | 212                                             | 190        | 171         |
| $\bar{y}_i$ при $i$ : |                                                 |            |             |
| 1                     | 0,7826 -1                                       | 0,7582-1   | 0,7518-1    |
| 2                     | 0,7056-1                                        | 0,7084-1   | 0,7262-1    |
| 3                     | 0,7064 -1                                       | 0,6262-1   | 0,6598-1    |
| 4                     | 0,6216-1                                        | 0,5938-1   | 0,6286-1    |
| $\bar{x}$             | 360                                             | 1596       | 6384        |
| $\bar{b}$             | -0,001005                                       | -0,0003425 | -0,00006488 |
| $\bar{a}$             | 0,0657                                          | 0,2183     | 0,1058      |

То есть, если предположить, что образец испытывается во время  $t$  вместо времени  $t_m$ , то измеренной величиной будет  $p_e$  вместо фактически измеренной величины  $p$ .

Полученное таким образом предполагаемое время до разрушения образца  $t_{ij}$  приведено в табл. 13.

Расчет диапазона нагревостойкости продолжают как в примере 1 с тремя температурами ( $k=3$ ) и 20-ю образцами при каждой температуре  $n_i = 4,5 = 20$  с общим числом  $N = k \cdot n_i = 60$  образцов.

Таблица 13

| Предполагаемые периоды времени до разрушения образца $t_{ij}$ , ч, при $\theta$ , °C |      |      | Предполагаемые периоды времени до разрушения образца $t_{ij}$ , ч при $\theta$ , °C |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| 212                                                                                  | 190  | 171  | 212                                                                                 | 190  | 171  |
| 422                                                                                  | 1505 | 5561 | 320                                                                                 | 1396 | 5950 |
| 378                                                                                  | 1592 | 4883 | 555                                                                                 | 1736 | 5765 |
| 370                                                                                  | 1373 | 7149 | 346                                                                                 | 1388 | 5703 |
| 355                                                                                  | 1741 | 7565 | 354                                                                                 | 1429 | 6936 |
| 332                                                                                  | 1373 | 5793 | 381                                                                                 | 1388 | 6227 |
| 389                                                                                  | 1661 | 6804 | 352                                                                                 | 1723 | 4772 |
| 301                                                                                  | 1229 | 6203 | 284                                                                                 | 1396 | 4510 |
| 372                                                                                  | 1661 | 7929 | 551                                                                                 | 1285 | 8163 |
| 277                                                                                  | 1725 | 6248 | 253                                                                                 | 1562 | 5759 |
| 374                                                                                  | 1422 | 5155 | 334                                                                                 | 1740 | 8333 |

В табл. 14 показан расчет, проведенный на настольном электронном калькуляторе с введенными статистическими программами для определения средней величины, стандартного отклонения и коэффициентов в уравнении регрессии при  $f_i = n_i - 1 = 19$ ,  $\bar{f}_i = k f_i = 57$ ,  $f = N - 2 = 58$ ,

$$c = 1 + \frac{\left( \frac{k}{\bar{f}_i} - \frac{1}{f_i} \right)}{3(k-1)} = 1,0234.$$

Диапазон нагревостойкости определяют как  
ДН:156/174(173).

Таблица 14

| Расчетный параметр                                                  | Значение расчетного параметра |            |            | для нижней<br>границы пред-<br>полагаемого<br>диапазона тем-<br>ператур, соот-<br>ветствующих<br>2000 ч |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                     | для $t$                       |            |            |                                                                                                         |
|                                                                     | 1                             | 2          | 3          |                                                                                                         |
| $\theta, ^\circ\text{C}$                                            | 212                           | 190        | 171        | —                                                                                                       |
| $x_i = \frac{1}{\theta + 273}$                                      | 0,002062                      | 0,002160   | 0,002252   |                                                                                                         |
| $\Sigma y_{if} = \Sigma \lg t_{if}$                                 | 51,0831                       | 63,5645    | 75,8151    |                                                                                                         |
| $\Sigma y_{if}^2$                                                   | 130,609655                    | 202,066656 | 287,509901 |                                                                                                         |
| $\bar{y}_i = \frac{\Sigma y_{if}}{n_i}$                             | 2,5542                        | 1,1782     | 3,7906     |                                                                                                         |
| $s_{if}^2 = \frac{n_i \Sigma y_{if}^2 - (\Sigma y_{if})^2}{n_{if}}$ | 0,0071290                     | 0,0023486  | 0,0059685  |                                                                                                         |
| $s_i^2 = \frac{\Sigma s_{if}^2}{k}$                                 | 0,0051487                     |            |            |                                                                                                         |
| $\chi^2 = \frac{f_i \ln s_i^2 - \Sigma f_i \cdot \ln s_{if}^2}{c}$  | 5,8                           |            |            |                                                                                                         |
| $\chi^2(0,95; k-1)$                                                 | 6,0                           |            |            |                                                                                                         |
| $\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{k}$                                    | 0,002158                      |            |            |                                                                                                         |
| $b = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x}) y_i}{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}$   | 6494                          |            |            |                                                                                                         |
| $a = \frac{\Sigma y_i}{k} - b \bar{x}$                              | -10,839                       |            |            |                                                                                                         |
| $Y_i = a + b x_i$                                                   | 2,5502                        | 3,1864     | 3,7866     |                                                                                                         |

Продолжение табл. 14

| Расчетный параметр                                                                            | Значение расчетного параметра |          |          |                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                               | для $t$                       |          |          | для нижней границы предполагаемого диапазона температур, соответствующих 20000 Ач |
|                                                                                               | 1                             | 2        | 3        |                                                                                   |
| $s_2^2 = \frac{\sum n_i (\bar{y} - Y_i)^2}{(k-2)}$                                            | 0,0019984                     |          |          | —                                                                                 |
| $F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$                                                                     | 0,4                           |          |          |                                                                                   |
| $F(0,95; k-2; f_1)$                                                                           | 4,0                           |          |          |                                                                                   |
| $s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + (k-2) s_2^2}{f}$                                                     | 0,0050944                     |          |          |                                                                                   |
| $s$                                                                                           | 0,0714                        |          |          |                                                                                   |
| $t(0,95; f)$                                                                                  | 1,68                          |          |          |                                                                                   |
| $\theta, ^\circ\text{C}$                                                                      | 210                           | 190      | 170      | 150                                                                               |
| $X$                                                                                           | 0,002070                      | 0,002160 | 0,002257 | 0,002364                                                                          |
| $Y = Q + bX$                                                                                  | 2,606                         | 3,186    | 3,820    | 4,513                                                                             |
| $\sum n_i (x_i - \bar{x})^2$                                                                  | $3,6526 \cdot 10^{-7}$        |          |          |                                                                                   |
| $s_y^2 = s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2}{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2} \right]$ | 0,000195                      | 0,000086 | 0,000226 | 0,000689                                                                          |
| $Y_c = Y - t s_y$                                                                             | 2,582                         | 3,171    | 3,794    | 4,468                                                                             |
| $t_c = \lg^{-1} Y$                                                                            | 403                           | 1540     | 6600     | 32600                                                                             |
| $t_c = \lg^{-1} Y_c$                                                                          | 382                           | 1480     | 6230     | 29400                                                                             |
| $T, ^\circ\text{C}$                                                                           | 5000                          |          |          | 20000                                                                             |
| $\theta = \frac{b}{\lg T - a} - 273$                                                          | 174                           |          |          | 156                                                                               |
| $X_1 = \frac{1}{\theta - 273}$                                                                | 0,002239                      |          |          | 0,002331                                                                          |

| Расчетный параметр                                                                                 | Значение расчетного параметра |   |   |                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                    | для $i$                       |   |   | для нижней<br>границы пред-<br>полагаемого<br>диапазона<br>температур,<br>соответствующ-<br>ших 20000 ч |
|                                                                                                    | 1                             | 2 | 3 |                                                                                                         |
| $s_y^2 = s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(X_1 - \bar{x})^2}{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2} \right]$    | 0,000178                      |   |   | —                                                                                                       |
| $C_v = \frac{s_y}{\lg T}$                                                                          | 0,004                         |   |   |                                                                                                         |
| $b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}$                                           | 6487                          |   |   |                                                                                                         |
| $s_r^2 = s^2 \left[ \frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_1 - \bar{x})^2}{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2} \right]$ | 0,000178                      |   |   | 0,000513                                                                                                |
| $X_c = \bar{x} + \frac{\lg T - \bar{y}}{b_r} + \frac{t_{sr}}{b_r}$                                 | 0,002242                      |   |   | 0,002338                                                                                                |
| $\vartheta_c = \frac{1}{X_c} - 273$                                                                | 173                           |   |   | 155                                                                                                     |

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК НАГРЕВОСТОЙКОСТИ

В данном приложении содержатся методы определения графика нагревостойкости, диапазона нагревостойкости и температурного индекса электроизоляционных материалов.

## 1. Общие положения

1.1. Методы применяются для определения нагревостойкости электроизоляционных материалов в соответствии с основной частью настоящего стандарта приложения 1.

1.2. График сроков службы электроизоляционных материалов представляет собой зависимость срока службы образцов от температуры старения, базирующуюся на результатах испытаний по определению уровня контролируемого показателя образцов в процессе или после старения при различных температурах.

1.3. К экспериментальным данным, которые необходимо статистически обработать, чтобы определить нагревостойкость материала, относится срок службы образцов.

Статистическая обработка результатов испытания основана на предположении, что существует линейная зависимость между логарифмом срока службы и величиной, обратной термодинамической температуре, которая, например, имеет место, если разрушение материала является следствием химической реакции первого порядка и подчиняется закону Аррениуса. Если измеренные величины четко указывают на отсутствие линейной зависимости, экстраполяция графика, необходимая для определения диапазона нагревостойкости, не производится. Кривые старения, выражающие зависимость контролируемого свойства материала от времени старения при различных температурах, могут дать в этих случаях ценную информацию, но температурный индекс можно получить только после испытаний при температуре старения, при которой средний срок службы составляет не менее 20000 ч.

Точность результатов в значительной степени зависит от числа образцов, подвергаемых воздействию каждой температуры.

Если вероятный разброс результатов испытаний предопределен, то можно вычислить число образцов, которое позволит обеспечить достаточную уверенность в результатах; в других случаях для определения необходимого количества образцов проводят предварительные испытания.

Если есть сомнение в принадлежности экспериментальных результатов к данной совокупности, они могут быть выделены как отклонения, посредством статистических методов, но только после тщательного изучения условия испытаний, а их значения должны быть внесены в протокол испытания. Количество результатов при различных температурах воздействия в таких случаях, как правило, бывает различным.

1.4. Способы обработки данных зависят в некоторой степени от метода проведения испытаний.

Следует различать следующие случаи:

- А. — способ старения;
- А.1 — непрерывное старение;
- А.2 — циклическое старение;

- Б. — оценка состояния образцов;
- Б.1 — измерение свойства (свойств) материала без разрушения образца;
- Б.1.1 — непрерывная проверка;
- Б.1.2 — циклические измерения;
- Б.2 — циклическое приложение заданного испытательного воздействия (проверочное испытание);
- Б.3 — определение свойства материала с разрушением образца.

Способ Б.1 может применяться в сочетании либо со способом А.1, либо со способом А.2. В каждом случае целью испытательного цикла может быть, например, воздействие на испытуемые образцы определенных тепловых ударов во время старения. Если измерения регистрируются непрерывно или часто (Б.1.1) данные срока службы можно получить непосредственным изучением зарегистрированных величин, а в случае циклических измерений (Б.1.2) они интерполируются на графиках кривой старения (п. 3.1). В обоих случаях срок службы определяется для каждого отдельного образца как непрерывная переменная и скорость изменения свойства определяется на основании измерений, что не относится к способам Б.2 и Б.3. Оценка результатов описана в разд. 3.

Способ Б.2 наиболее часто применяется в связи со способом А.2. Проверочное испытание определяет, остается или нет испытуемое свойство образца в пределах контрольного воздействия (критерий конечной точки). В случае применения проверочного испытания (например, в конце каждого цикла старения) срок службы, являющийся дискретной переменной, определяют как среднюю точку цикла (п. 3.1). Поскольку во время испытаний не удается проследить изменение свойств материала во времени, этот способ нельзя считать в такой же степени информативным, как способ Б.1. Статистические способы обработки результатов для получения диапазонов нагревостойкости аналогичны способу Б.1, описанному в разд. 3.

Способ Б.3 может применяться при любом из способов А.1 или А.2. При каждом из измерений проверяют заданное число образцов, которые затем выбрасывают. Так как измерения показателей свойства за разные периоды старения определяют на различных образцах, этот способ более чувствителен к различиям между образцами, чем ранее перечисленные способы. Получить таким путем срок службы отдельных образцов не представляется возможным, но результаты испытаний показывают общую тенденцию изменения свойства материала в зависимости от времени старения и средний срок службы при каждой температуре старения. Статистические способы определения диапазонов нагревостойкости в этом случае рассмотрены в разд. 4.

## 2. Статистические методы

2.1. Рассматриваемые статистические методы включают следующие этапы:

- 1) определение срока службы;
- 2) вычисление коэффициентов  $a$  и  $b$  линейного уравнения регрессии  $y = a + bx$ , связывающего логарифм срока службы ( $y = \lg t$ ) с величиной, обратной термодинамической температуре ( $X = \frac{1}{T}$ );
- 3) построение графика нагревостойкости;
- 4) определение температурного индекса (в тех случаях, когда это возможно);
- 5) проверка равенства дисперсий логарифма срока службы при различных температурах старения;
- 6) проверка линейности уравнения регрессии.

Примечание. Эта проверка распространяется только на диапазон измеренных точек, и доверительные интервалы, вычисленные для экстраполированных точек, основаны только на предположении о наличии вышеупомянутой линейности (п. 2.2, перечисление 4);

7) определение нижней односторонней границы 95 %-ного доверительного интервала для средних значений логарифмов времени до выхода из строя, взятых на линии регрессии;

8) вычисление величины температуры в градусах Цельсия, соответствующей сроку службы при работе в течение 5000 и 20000 ч по уравнению регрессии;

9) проверка коэффициента вариации логарифма срока службы в соответствии с уравнением регрессии при работе в течение 5000 ч;

10) вычисление нижней односторонней границы 95 %-ного доверительного интервала для температуры, соответствующей на линии регрессии сроку службы 5000 ч.

## 2.2. Допущения.

Допущения, лежащие в основе примененного статистического метода, сводятся к следующему:

1) наблюдаемые величины срока службы являются стохастически независимыми; образцы, используемые для испытаний на старение, являются произвольно взятыми из исследуемой совокупности и прошедшими одинаковую обработку;

2) зависимая переменная  $y$  (логарифм срока службы) имеет нормальное распределение при каждой величине независимой переменной  $x$  (величина, обратная термодинамической температуре);

3) дисперсия  $\sigma^2$  зависимой переменной  $y$  одинакова при всех величинах  $x$ ;

4) зависимая переменная  $y$  является линейной функцией аргумента  $x$  в диапазоне, включающем все испытательные и экстраполированные точки;

5) погрешностями  $\chi$  можно пренебречь, так как  $\chi$  имеет одинаковое точно известное значение для всех образцов, состарившихся при одной и той же температуре.

## 3. Неразрушающие методы измерений и проверочные испытания

Данные методы применимы в тех случаях, когда свойства контролируются с помощью неразрушающих измерений (разд. 1, способ Б.1) или с помощью определенного проверочного испытания (разд. 1, способ Б.2). Метод определения характеристик нагревостойкости в случае контроля свойства при разрушающем испытании (разд. 1, способ Б.3) приведен в разд. 4.

### 3.1. Срок службы

Общее количество образцов ( $N$ ) подвергается воздействию  $k$  различных температур  $\theta_i$  °C (где  $i=1 \dots k$ ). Число образцов  $n_i$ , подвергающихся воздействию при температуре  $\theta_i$  °C, обозначается  $n_i$  ( $N=\sum n_i$ ). Обычно эксперименты планируются с одинаковым числом ( $n$ ) образцов, подвергаемых воздействию при всех температурах ( $N=k \cdot n$ ), но возможны также вычисления в случаях, где  $n_i$  различны.

Для каждого образца срок службы обозначается  $t_{ij}$ , где  $i$  — соответствующая температура выдержки ( $\theta_i$  °C);  $j$  — номер, присваиваемый образцу в пределах группы образцов  $n_i$ , подвергаемых воздействию при этой температуре, т. е.  $j=1 \dots n_i$ .

#### 3.1.1. Непрерывная проверка

При непрерывной проверке измеренные значения показателя свойства регистрируются непрерывно или путем частого испытательного воздействия на образец. По полученным в этом случае данным можно непосредственно определить время, когда уровень показателя свойства образцов становится ниже критерия конечной точки, т. е. индивидуальный срок службы  $t_{ij}$ .

#### 3.1.2. Циклические измерения

Если измерения на образцах, подвергаемых старению при одной температуре, проводятся в заданные периоды времени  $t_1, t_2, \dots$ , индивидуальный срок

службы каждого образца  $t_{ij}$  можно определить из графика зависимости свойства от времени.

### 3.1.3. Проверочные испытания

Если проверочное испытание проводится через заданные периоды времени, результат испытания определяется временем  $t_f$ , после которого впервые был достигнут критерий конечной точки, и непосредственно предшествующим временем  $t_{f-1}$ , когда критерий конечной точки еще не был достигнут.

За срок службы для данного случая принимается средняя величина этих двух времен, т. е.

$$t_{if} = \frac{t_f + t_{f-1}}{2} \quad (32)$$

### 3.2. Уравнение регрессии

Для каждой величины температуры воздействия  $\theta_i$  вычисляется величина  $x_i$ , обратная термодинамической температуре  $\Theta_i = \theta_i + 273$

$$x_i = \frac{1}{\Theta_i} \quad (33)$$

логарифм срока службы  $t_{if}$

$$y_{if} = \lg t_{if} \quad (34)$$

и среднее значение  $y_i$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{if}}{n_i} \quad (35)$$

Коэффициенты уравнения регрессии

$$y = a + bx \quad (36)$$

определяются из уравнений

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (37)$$

$$b = \frac{N \sum (x_i \sum y_{if}) - (\sum n_i x_i)(\sum \sum y_{if})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \quad (38)$$

где  $\bar{x}$  — среднее взвешенное значение

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{\sum n_i}; \quad (39)$$

$\bar{y}$  — общее среднее значение

$$\bar{y} = \frac{\sum \sum y_{if}}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{\sum n_i} \quad (40)$$

### 3.3. График сроков службы

По уравнению регрессии строится график сроков службы с ординатой  $y = \lg t$  и абсциссой  $x = \frac{1}{\Theta}$ . Обычно  $x$  на графике возрастает справа налево, а соответствующие величины  $\theta$  °C отмечают на оси  $\Theta$  для этой цели используют специальную бумагу для графиков (см. черт. 4).

Отдельные величины  $y_{if} = \lg t_{if}$  и средние величины  $\bar{y}_i = \lg t_i$  (где  $\lg t_i$  — логарифмические средние величины времени до разрушения) наносятся на графике при соответствующих величинах

$$x_i = \frac{1}{\theta_i + 273} \quad (41)$$

## 3.4. Температурный индекс

Температурный индекс (ТИ) определяют из графика сроков службы (п. 3.3), как температуру  $\theta^\circ\text{C}$ , соответствующую на линии регрессии заданному времени  $t$ , равному обычно 20000 ч.

ТИ определяют только в тех случаях, если положение экспериментальных точек относительно линии регрессии оправдывает предположение линейной зависимости.

## 3.5. Проверка на равенство дисперсий

Для каждой величины  $i$  вычисляют дисперсии

$$s_{it}^2 = \frac{n_i \sum y_{it}^2 - (\sum y_{it})^2}{n_i f_i} \quad (42)$$

с  $f_i = n_i - 1$  степенями свободы и их среднее взвешенное значение

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{it}^2}{\sum f_i} \quad (43)$$

с  $f_1 = \sum f_i$  степенями свободы.

Равенство  $K$  дисперсий  $s_{it}^2$  проверяют методом Бартлетта на значащем уровне  $\alpha = 0,05$  путем сравнения испытательной стохастической переменной

$$\chi^2 = \frac{2,3[f_1 \lg s_1^2 - \sum (f_i \lg s_{it}^2)]}{c} \quad (44)$$

где промежуточная постоянная

$$c = 1 + \frac{\left( \sum \frac{1}{f_i} \right) - \frac{1}{f_1}}{3(k-1)} \quad (45)$$

и  $f_1 = \sum f_i$  с табулированным значением  $\chi^2(0,95, k-1)$ , где  $k-1$  есть число степеней свободы  $\chi^2$  (табл. 6 и 7).

Если  $\chi^2$  больше табулированного значения, расхождения в  $s_{it}^2$  следует считать значимыми и величину  $\chi^2$  указывают в протоколе испытаний. Оцененное значение  $s_1^2$  используют как суммарную оценку дисперсии в пределах  $K$  рядов измерений с  $f_1$  степенями свободы.

## 3.6. Проверка на линейность

По уравнению регрессии вычисляют расчетные средние величины  $y$  согласно линии регрессии

$$Y = a + b x_i \quad (46)$$

соответствующие  $K$  величинам  $x_i$ , и дисперсию

$$s_2^2 = \frac{\sum n_i (\bar{y}_i - Y_i)^2}{f_2} = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N \bar{y}^2) - b(\sum n_i x_i \bar{y}_i - N \bar{x} \bar{y})}{f_2} \quad (47)$$

с  $f_2 = k - 2$  степенями свободы.

Суммарную дисперсию  $s_1^2$  в пределах  $K$  рядов измерений сравнивают с дисперсией  $s_2^2$  около линии регрессии по методу Фишера на значащем уровне  $\alpha = 0,05$ .

Экспериментальное значение переменной величины  $F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$  сравнивают с табулированным значением  $F(0,95, f_n, f_x)$  (табл. 6 и 7). В этом случае  $f_n$

есть число степеней свободы числителя  $F$  и  $f_a$  — знаменателя, т. е.  $f_a$  равно  $f_1$ , вычисленному выше, и  $f_x$  равно  $f_1$  по п. 3.5.

Если  $F$  больше табулированной величины, отклонение от прямой линии считается значимым, и величина  $F$  должна быть внесена в протокол испытаний.

Суммарную оценку дисперсий вычисляют как

$$s^2 = \frac{(N-k) \cdot s_1^2 + (k-2)s_2^2}{N-2} \quad (48)$$

с  $f=N-2$  степенями свободы.

3.7. Доверительный интервал для  $\bar{y}$ .

Нижняя граница 95 %-ного доверительного интервала для истинного значения  $y$  при данном значении  $X$  имеет вид

$$Y_c = Y - t s_y, \quad (49)$$

где

$$Y = a + bx \quad (50)$$

$$s_y^2 = s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \right] \quad (51)$$

и  $t$  есть табулированная величина коэффициента Стьюдента  $t$  с  $f=N-2$  степенями свободы, соответствующая 95 %-ному доверительному интервалу  $t$  (0,95,  $f$ ) (табл. 6 и 7).  $Y_c$  вычисляют для нескольких связанных между собой величин  $Y$  и  $X$  уравнения регрессии в пределах интересующего диапазона и по точкам  $(X, Y_c)$  строят график.

3.8. Температуры, соответствующие срокам службы 5000 и 20000 ч.

Из уравнения регрессии

$$Y = a + bx \quad (52)$$

вычисляют величины  $X_5$  и  $X_{20}$ , соответствующие величинам

$$Y_5 = \lg 5000 = 3,70 \quad (53)$$

$$Y_{20} = \lg 20000 = 4,30 \quad (54)$$

и, следовательно, соответствующие температуры в  $^{\circ}\text{C}$

$$\theta_5 = \frac{1}{X_5} - 273; \quad (55)$$

$$\theta_{20} = \frac{1}{X_{20}} - 273. \quad (56)$$

3.9. Коэффициент вариации

Дисперсию  $Y_i$ , полученного из уравнения регрессии и соответствующего температуре  $\theta_i$ , вычисляют как

$$s_y^2 = s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \right] \quad (57)$$

и отсюда коэффициент вариации

$$C_v = \frac{s_y}{\lg 5000} = \frac{s_y}{3,7}. \quad (58)$$

Если коэффициент вариации  $C_v \leq 1,5\%$ , диапазон нагревостойкости определяют как в п. 3.11, в противном случае приводят только график нагревостойкости (п. 3.3) и там, где возможно, температурный индекс (п. 3.4).

### 3.10. Граница доверительного интервала по $\theta_2$

Нижнюю границу 95 %-ного доверительного интервала  $\theta_c$  для температуры, соответствующей времени 5000 ч до критерия конечной точки, вычисляют как

$$X_c = \bar{x} - \frac{Y_c - \bar{y}}{b_r} + \frac{ts_r}{b_r}, \quad (59)$$

где

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}; \quad (60)$$

$$s_r^2 = s^2 \left[ \frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_c - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right] \quad (61)$$

и  $t$  есть табулированное значение коэффициента Стьюдента с  $f = N - 2$  степенями свободы, соответствующее 95 %-ному доверительному интервалу  $t(0,95, f)$

(табл. 6 и 7)  $\theta_c = \frac{1}{X_c} \approx 273$ .

### 3.11. Диапазон нагревостойкости

Диапазон нагревостойкости (ДН) определяется числами, соответствующими температурам, дающим расчетные логарифмические средние значения сроков службы 20000 ч ( $\theta_{20}$ ) и 5000 ч ( $\theta_5$ ) (п. 3.8) и значением  $\theta_c$  (п. 3.10).

$$\text{ДН: } \theta_{20}/\theta_5 (\theta_c).$$

## 4. Разрушающие испытания

### 4.1. Общие положения

Когда определение изменения свойства проводят путем разрушающих испытаний (разд. 2, способ Б.3), число образцов, подвергаемых воздействию при каждой температуре, должно быть равно произведению числа образцов, испытанных в конце каждого интервала времени, и количества периодов времени  $t_1, t_2, \dots$ , при которых проводят эти измерения.

Если, например, предполагается испытать 10 образцов в каждый из 9 периодов времени при 3-х различных температурах, то общее количество образцов составит  $3 \times 8 \times 10 = 240$ . Целесообразно подвергать воздействию каждой температуры дополнительные группы из 10 образцов, чтобы испытать их при более длительных временах воздействия, чем планировалось первоначально, если испытания указывают на более длительный срок службы при одной или нескольких температурах.

Целесообразно также начать воздействие на дополнительные группы образцов несколько позднее по времени, чтобы провести испытание в промежуточные периоды воздействия или в более короткие периоды времени по сравнению с первоначально запланированными, если в этом возникает необходимость в ходе эксперимента.

Математическая функция, описывающая взаимосвязь показателей свойства и времени, зависит от типа испытываемого материала, т. е. от порядка химических процессов, происходящих при старении, и от взаимосвязи химического состава и проверяемого свойства.

При выборе точного метода оценки необходимо учитывать теоретические знания и предшествующий опыт использования таких процессов и связей. По-

скольку образцы после испытания не используются, то невозможно проследить изменение свойства отдельных образцов и определить однозначно срок службы для каждого образца.

#### 4.2. Срок службы

Для каждой испытательной температуры результаты наносятся на график зависимости измеряемой характеристики от времени старения. Пересечение построенной кривой с линией критерия конечной точки определяет срок службы при этой температуре  $t_f$ .

В стандартах на отдельные виды материалов может оговариваться специальная обработка результатов испытаний (например, вычерчивание логарифма показателей свойства в зависимости от времени или какой-либо другой функции свойства от логарифма времени с целью получения простого, например, приблизительно линейного графика). Кривая может быть приближена к экспериментальным точкам с помощью метода наименьших квадратов.

#### 4.3. Расчеты

Расчеты осуществляют в основном согласно разд. 3, но поскольку только одна величина срока службы может быть получена из графика изменения свойства при каждой температуре (п. 4.2),  $t_f$  становится равным единице.

Поэтому нельзя определить величину  $s_y^2$  (п. 3.5), которая основана на колебании  $y$  при фиксированной температуре; оценка  $s^2$  дисперсии  $y$  должна проводиться только на основе разброса величин  $t_f$  по линии регрессии с  $K-1$  степенями свободы.

Чтобы провести оценку степени соответствия кривых старения и линейности графика сроков службы, проводят грубую оценку дисперсии  $s_{t_f}^2$  при каждой температуре.

Предполагается, что кривые старения отдельных образцов идут параллельно средней кривой старения, полученной по п. 4.2 — во всяком случае в области, где кривая пересекает линию критерия конечной точки, — хотя в данном случае только одна точка каждой кривой может быть определена вследствие разрушающего характера испытания.

На графике зависимости изменения свойства от времени через точки, выражающие результаты испытаний отдельных образцов в периоды времени, близкие к времени достижения критерия конечной точки, проводят линии, параллельные средней линии, как показано на черт. 5, где линии проходят через пять точек, выражающих результаты при каждом из четырех периодов измерения, ближайших к времени  $t_f$ , где средняя линия (или линия наилучшего совпадения) пересекает линию, представляющую критерий конечной точки.

Периоды времени  $t_{if}$ , соответствующие точкам пересечения этих линий с линией критерия конечной точки, принимают за срок службы образцов при температуре  $\theta_i$  и используют в расчетах в соответствии с пп. 3.5 и 3.6.

Однако эти вычисления дают только грубые оценки.

#### 4.4. Температурный индекс

Температурный индекс (ТИ) в тех случаях, когда он применяется, определяют по п. 3.4.

#### 4.5. Диапазон нагревостойкости

Коэффициент вариации ( $C_v$ ) вычисляют в соответствии с п. 3.9. Если коэффициент вариации  $C_v \leq 1,5\%$ , диапазон нагревостойкости определяют по п. 3.11.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН Министерством электротехнической промышленности СССР

## ИСПОЛНИТЕЛИ

И. А. Соловьева, И. И. Кравцева

2. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ ПОСТАНОВЛЕНИЕМ Государственного комитета СССР по стандартам от 20.05.88 № 1401
3. Срок первой проверки — IV квартал 1992 г.  
Периодичность проверки — 5 лет
4. В стандарт введены международные стандарты МЭК 216—2—74, МЭК 216—3—80, МЭК 216—4—80  
Стандарт соответствует СТ СЭВ 4127—83
5. Введен впервые
6. ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

| Обозначение НТД, на который дана ссылка | Номер пункта, подпункта |
|-----------------------------------------|-------------------------|
| ГОСТ 263—75                             | Приложение 1            |
| ГОСТ 270—75                             | Приложение 1            |
| ГОСТ 4647—80                            | Приложение 1            |
| ГОСТ 4648—71                            | Приложение 1            |
| ГОСТ 6433.1—71                          | 6.1; 6.2                |
| ГОСТ 6433.3—71                          | Приложение 1            |
| ГОСТ 11262—80                           | Приложение 1            |
| ГОСТ 13523.3—78                         | Приложение 1            |

Редактор *С. И. Бибарский*  
Технический редактор *М. И. Максимова*  
Корректор *Л. В. Малинская*

Сдано в наб. 28.06.88 Подп. в печ. 15.08.88 3,5 усл. п. л. 3,5 усл. кр. отт. 3,46 уч.-изд. л.  
Тираж 8000 Цена 20 коп

---

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123840, Москва, ГСП,  
Новопресненский пер., 3,  
Калужская типография стандартов, ул. Московская, 256. Зак. 1408