

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ
Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкостьElectric insulation systems
General requirements for methods of accelerated tests for thermal endurance

ОКСТУ 3409

*Срок действия с 01.01.90
до 01.01.95***ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ**

1. РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН п/я М-5266

ИСПОЛНИТЕЛИ:

М.Л. Оржаховский, В.М. Гуликова, А.Ф. Лопатин, В.В. Веселов

2. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28.03.88 № 820

3. Срок первой проверки - IV квартал 1993 г.
Периодичность проверки - 5 лет.4. В стандарт введен международный стандарт МЭК 611-78
Стандарт соответствует международному стандарту МЭК 493-1-74

5. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

6. ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Обозначение НТД, на который дана ссылка	Номер пункта, подпункта, приложения
ГОСТ 11.006-74	Приложение 4
ГОСТ 11.008-75	Приложение 4
ГОСТ 8865-87	4.6, 5.8
ГОСТ 10519-76	Приложение 3
ГОСТ 15150-69	4.5, 4.6
ГОСТ 17516-72	4.15
ГОСТ 21126-75	3.4, 4.6, 5.9, Приложение 1
ГОСТ 24683-31	Приложение 4 3.4, 4.6

Настоящий стандарт распространяется на системы электрической изоляции и простые комбинации материалов (далее - системы изоляции) и устанавливает общие требования к методам проведения и обработки результатов ускоренных испытаний на нагревостойкость.

Стандарт не распространяется на системы изоляции, несодержащие органических или элементоорганических компонентов.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Оценку нагревостойкости проводят путем определения зависимости между ресурсом системы изоляции и температурой. По результатам определения этой зависимости с требуемой доверительной вероятностью могут быть установлены:

класс нагревостойкости системы изоляции (при заданном ресурсе системы изоляции);
ресурс (средний или гамма-процентный) системы изоляции (при заданной температуре);
график нагревостойкости системы изоляции;
режим ускоренных контрольных испытаний системы изоляции при одном значении температуры.

1.2. Для предварительной ориентировочной оценки нагревостойкости комбинаций материалов допускается применять термогравиметрический метод.

1.3. Методы обработки результатов, установленные в стандарте, рекомендуется применять для электроизоляционных материалов, экспериментальное определение нагревостойкости которых проведено по соответствующему стандарту на методы испытаний электроизоляционного материала.

Пояснение терминов, встречающихся в стандарте, указаны в приложении 1.

2. МЕТОДЫ ОТБОРА ОБРАЗЦОВ

2.1. В стандартах или другой технической документации на методы испытаний конкретных систем изоляции (далее - стандартах) должны быть даны соответствующие указания по конструкции образцов для испытаний и способам их подготовки.

Размеры образцов выбирают с учетом размеров реальных конструкций, где предполагают применять систему изоляции. При этом размеры испытываемых образцов должны, по возможности, приближаться к реальной конструкции (выбранной в качестве типовой для данного вида изделий).

2.2. Для испытаний систем изоляции в качестве образцов следует применять макеты или отдельные узлы изделия, если это указано в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции. Допускается проводить испытания готовых изделий с оценкой отдельных узлов или изделия в целом. Для испытаний комбинаций материалов допускается применять образцы по соответствующему стандарту на методы испытаний электроизоляционного материала.

Конструкция макетов должна воспроизводить основные элементы конструкции готовых изделий или их реальных узлов.

Конструкция макетов и узлов должна позволять имитировать основные эксплуатационные воздействия, способствующие старению или его выявлению.

2.3. Если образцами являются готовые изделия и известно, что ресурс испытываемой системы изоляции выше ресурса других узлов изделия, в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции должен быть указан способ повышения ресурса этих узлов с тем, чтобы ресурс этих узлов был заведомо больше ресурса системы изоляции.

2.4. В стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции должны быть предусмотрены контрольные испытания, которым до начала испытаний на нагревостойкость подвергают образцы для проверки их качества и идентичности.

2.5. В стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции должно быть указано минимально допустимое число образцов, требуемое для получения необходимой статистической достоверности результатов. При выборе числа образцов учитывают требования п. 4.3.

3. ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Испытания проводят в камерах тепла.

В месте расположения образцов погрешность поддержания температуры в камере тепла для температур до 180 °С - ± 2 °С; допускаются отдельные кратковременные (не более 15 мин за 6 ч испытаний) отклонения до ± 5 °С. Перепад температуры внутри камеры в месте расположения образцов не должен превышать 2 °С.

Погрешность поддержания температуры в месте расположения образцов для температур свыше 180 °С - ± 3 °С.

3.2. В испытательных камерах тепла должны быть предусмотрены устройства для перемешивания воздуха со скоростью 1 - 2 м/с с обновлением его состава; рекомендуется, чтобы это обновление происходило в течение 1ч на каждый квадратный метр площади

поверхности образца.

3.3. Образцы должны быть расположены так, чтобы воздух внутри камеры тепла мог свободно их обдувать.

3.4. При необходимости проведения испытаний в особых условиях внешней среды в соответствии с п. 4.6, требования к испытательным камерам - по ГОСТ 21126-75 и ГОСТ 24683-81.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

4.1. При определении нагревостойкости основным воздействующим разрушающим фактором внешней среды является испытательная температура.

4.2. Испытания являются циклическими с повторяющимися циклами. Каждый цикл состоит из воздействия испытательной температуры и одновременного или попеременного воздействия дополнительных испытательных факторов, являющихся разрушающими или только выявляющими произведенное разрушение (диагностическими).

При этом следует учитывать, что одинаковые факторы (например, влажность воздуха) могут либо вызвать разрушение, либо только выявить уже произведенное разрушение, в зависимости от значения и продолжительности действия фактора, его сочетания с другими факторами и последовательности приложения испытательных воздействий.

Допускается проводить нециклические испытания в случаях, если заранее известно, что разрушение вызывают только одновременно воздействующие испытательные факторы, а остальные факторы только его выявляют.

Требования по измерению параметров-критериев отказа (в частности стадия цикла, периодичность) устанавливаются в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции в соответствии с ГОСТ 21126-75, разд. 4.

4.3. Испытания проводят до отказа всех образцов.

Если невозможно проводить испытания до наступления отказа, допускается проводить испытания путем определения зависимости величины и (или) распределения значений параметра (критерия отказа систем изоляции) от времени воздействия испытательных факторов, что должно быть указано в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции. В частности, если математическая функция зависимости параметра-критерия отказа от продолжительности воздействия температуры может быть представлена в виде прямой линии, применяют метод по ГОСТ 21126-75, приложение 2.

Допускается проводить предварительную оценку нагревостойкости по результатам испытаний при отказе части испытываемых образцов, если методы обработки результатов с обязательной оценкой доверительных вероятностей обеспечивают необходимую статистическую достоверность (в частности проводить испытания по ГОСТ 21126-75, разд. 4). При этом необходимо учитывать, что испытания до отказа только части образцов увеличивают статистический разброс результатов.

4.4. Виды и интенсивность испытательных воздействий должны быть указаны в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции.

4.5. Если готовые изделия или комбинации материалов предназначены для эксплуатации при нормальных значениях климатических факторов внешней среды по ГОСТ 15150-69, в испытательные циклы дополнительно к воздействию испытательной температуры включают также воздействия механических факторов, влажности и электрического напряжения. При испытании комбинаций материалов допускается исключать некоторые из этих воздействий.

4.6. Если готовые изделия или комбинации материалов предназначены для эксплуатации в особых условиях внешней среды по ГОСТ 15150-69, в испытательные циклы, помимо воздействия по п. 4.5, включают другие воздействия, действующие попеременно или одновременно с этими воздействиями. При этом для случая воздействия агрессивных сред испытания проводят по ГОСТ 21126-75 и ГОСТ 24683-81.

Результаты этих испытаний используют при определении нагревостойкости систем изоляции, предназначенных для работы в особых условиях окружающей среды, но не применяют для определения классов нагревостойкости по ГОСТ 8865-87.

Интенсивность других воздействий устанавливают сравнимой с их интенсивностью в условиях эксплуатации. Допускается увеличить интенсивность дополнительных воздействий по сравнению с условиями эксплуатации, если существуют установленные зависимости между интенсивностью воздействий и ресурсом.

4.7. В стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции должна быть оговорена

последовательность приложений испытательных воздействий.

При испытании систем изоляции, предназначенных для работы при нормальных значениях климатических факторов внешней среды, применяют следующую последовательность воздействий: термическое старение, механические воздействия, увлажнение, испытательное напряжение.

4.8. Испытательные температуры и длительность их воздействия в каждом цикле приведены в приложении 2, причем табл. 2 этого приложения является предпочтительной при испытании систем изоляции, а табл. 1 - при испытании комбинаций материалов. При испытании комбинаций материалов применяют продолжительности по табл. 2 или при испытании комбинаций материалов и систем изоляции - другие продолжительности, если известно или предполагается, что при использовании этих продолжительностей могут быть выполнены требования п. 4.10.

Наименьшая испытательная температура должна быть на 15-30 °С выше предельной допустимой температуры предполагаемого для системы изоляции класса нагревостойкости, допускается иное значение по п. 4.2.

Наибольшая испытательная температура ограничивается температурой размягчения материалов (для термопластов), температурой кипения для жидких диэлектриков или температурой, при которой один доминирующий процесс разрушения заменяется другим. В последнем случае наибольшую испытательную температуру допускается определять при помощи косвенных критериев.

При этом следует учитывать, что изменение процесса разрушения, определенное по косвенному критерию, не всегда воспроизводится при определении по прямому критерию. Если наибольшая испытательная температура не известна, допускается проводить испытания по п. 5.4.

Рекомендуется, чтобы при наибольшей испытательной температуре средний ресурс составлял 100 ч или более.

Значения дополнительных испытательных факторов в каждом цикле не изменяют.

4.9. Образцы должны испытываться не менее чем при трех испытательных температурах, отличающихся друг от друга не менее чем на 20 °С. Если максимально допустимая температура испытаний, выбранная по п. 4.8, не позволяет сохранить интервал температур, допускается уменьшить его до 10°С.

4.10. Поскольку число циклов может влиять на ресурс образцов, получаемый при данных испытаниях, достоверными можно считать испытания, при которых средние числа циклов, полученные при каждой температуре испытаний, не отличаются друг от друга более чем в 2 раза, при этом среднее число циклов при любой из испытательных температур должно быть не менее 7 и не более 20.

Среднее число циклов вычисляют как среднее арифметическое число циклов до отказа каждого образца, включая цикл, в котором произошел отказ.

Рекомендуется, чтобы среднее число циклов при каждой температуре составляло 10. Для этого в процессе испытаний при необходимости корректируют продолжительность выдержки в цикле при соответствующей испытательной температуре или изменяют испытательную температуру.

Если время выдержки в одном цикле испытаний устанавливалось не по табл. 1 или 2, то время выдержки рекомендуется увеличивать в 2 раза. Когда предполагаемый ресурс на основе предварительной информации установить нельзя, время выдержки в каждом цикле выбирают исходя из необходимости получения достаточной информации в результате измерения параметров образцов после каждого цикла. При этом время выдержки предпочтительно устанавливать различным: меньшее на первых циклах и большее - на последующих.

4.11. Воздействие испытательной температуры при испытании комбинаций материалов и макетов обеспечивается путем помещения образцов в камеры тепла.

Образцы загружают в камеру тепла, предварительно нагретую до испытательной температуры, и выгружают без охлаждения камеры тепла в случаях, когда резкие смены температур являются требуемым испытательным воздействием, или для сокращения общей продолжительности испытаний (если резкие смены температур существенно не влияют на результаты). Если предполагается, что доминирующей причиной отказа макетов являются резкие смены температур при испытаниях, не отражающие условия эксплуатации, то макеты загружают (и соответственно выгружают) в предварительно охлажденные камеры тепла. Допускается загружать (и выгружать) образцы в предварительно охлажденные камеры тепла для удобства проведения испытаний, если резкая смена температур не является требуемым

испытательным воздействием.

Если при испытании макетов необходимо учесть температурные градиенты, возникающие в реальных изделиях, или по другим причинам, предусматривают воздействие испытательной температуры путем пропускания тока через токоведущие части макета.

4.12. Способ воздействия испытательной температуры для различных типов готовых изделий указывают в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции.

4.13. Термическое старение в каждом цикле должно проводиться непрерывно. При технической необходимости допускаются перерывы в испытаниях не более 24 ч за каждый период продолжительности испытаний не менее 10 сут, если известно или предполагается, что изменение температуры при этих перерывах не влияет на ресурс образцов в пределах, соответствующих числу циклов, указанных в п.4.10.

При испытании готовых изделий или макетов путем пропускания тока применяют устройства для непрерывного измерения температуры обмоток или других токоведущих частей, соприкасающихся с изоляцией, или же, если это невозможно, проводят измерение температуры обмоток не менее шести раз в сутки, при этом допускается кратковременное отключение изделия от источника тока.

4.14. Если в испытательный цикл введено увлажнение, то для образцов систем изоляции режимы увлажнения выбирают в соответствии с ГОСТ 21126-75.

Системы изоляции изделий категорий 1, 2 по ГОСТ 15150-69 испытывают по режимам, предусмотренным для категории 5.

При испытании систем изоляции изделий категорий 1, 2 и 5 по ГОСТ 15150-69 или изоляции изделий категории 3 на напряжение до 2000 В включительно относительная влажность должна быть 100% с конденсацией влаги на обмотке, а при испытаниях систем изоляции изделий категории 3 на напряжение свыше 2000 В - (93 ± 3) % без конденсации влаги.

4.15. При включении в испытательный цикл механических воздействий в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции должны быть указаны их интенсивность, направление и время действия.

Интенсивность механических воздействий при испытании должна несколько превышать интенсивность при эксплуатации. При выборе интенсивности и времени действия механических воздействий при испытании систем изоляции должны учитываться требования ГОСТ 17516-72.

Интенсивность механических воздействий может значительно превышать интенсивность механических воздействий в эксплуатации только в том случае, если известна закономерность изменения ресурса от интенсивности механических воздействий.

4.16. Для систем изоляции электротехнических изделий за критерий отказа принимают пробой при воздействии испытательного напряжения. Значение испытательного напряжения выбирают в зависимости от функции, которую материалы выполняют в конструкции и (или) исходя из напряжения, которому изоляция подвергается в изделии. Значение испытательного напряжения должно быть достаточным для установления критической степени деструкции изоляции, но не являться старящим.

При выборе испытательных напряжений при необходимости учитывают размерный фактор и величины отклонений напряжения от номинального. Если на системы изоляции в эксплуатации могут воздействовать различные виды напряжений (например, длительно действующее рабочее напряжение и кратковременные перенапряжения), то в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции могут быть указаны несколько значений испытательных напряжений различных видов.

Длительность приложения испытательного напряжения и на какой стадии цикла оно прикладывается должны быть указаны в стандартах на методы испытаний конкретных систем изоляции. В частности, если испытание напряжением проводится после таких воздействий, влияние которых изменяется во времени, должно быть оговорено время, в течение которого после указанного воздействия должно быть приложено испытательное напряжение.

Для систем изоляции не электротехнических изделий за критерий отказа принимают пробой при воздействии испытательного напряжения или изменение других параметров (например, удельного объемного сопротивления, волновых параметров, тангенса угла диэлектрических потерь или же механической прочности), если этими критериями в большей степени, чем приложенным напряжением, определяется работоспособность системы изоляции.

4.17. При выборе критерия отказа учитывают фиксированное значение измеряемого параметра, а не степень его изменения по отношению к исходному значению. При исследовании систем изоляции для которых в различных видах изделий критичными могут быть разные уровни измеряемого параметра, рекомендуется в качестве критерия отказа принимать несколько

уровней параметра и соответственно определять разные ресурсы.

Допускается при сравнении комбинаций материалов использовать при выборе критерия степень изменения измеряемого параметра по отношению к исходному значению. При этом следует учитывать, что этот способ может привести к необоснованной отбраковке образцов с более высокими начальными значениями параметра, но с несколько большей скоростью его изменения. За исходное значение параметра при этом способе принимают (если иное не установлено в стандартах на испытания конкретных материалов) среднее арифметическое результатов испытаний не менее 10 образцов, подвергнутых термообработке при наименьшей температуре старения в течение 48 ч.

4.18. При испытании систем изоляции отказом образца считают первый отказ любого компонента системы.

Допускается продолжение испытаний образца для оценки поведения остальных компонентов. При этом принимают во внимание возможность частичного повреждения остальных компонентов при отказе первого. Ресурс этих остальных компонентов учитывают отдельно и не включают в ресурс образца.

В тех случаях, когда необходимо получить данные по одному компоненту системы изоляции, допускается усиление других компонентов, не влияющих на нагревостойкость изучаемого компонента в системе изоляции.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

5.1. Результаты испытаний выражают в виде математической зависимости ресурса L от температуры T (К).

$$L = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

$$\text{или } \lg L = A' + \frac{B'}{T}, \quad (2)$$

где A, B, A', B' - постоянные коэффициенты.

Рекомендуется также выражать результаты в виде графика нагревостойкости.

Необходимо учитывать, что для каждого электроизоляционного материала или системы изоляции может быть получено более одной зависимости ресурса от температуры, при этом каждая из зависимостей определяется выбранными критериями, их уровнями, а также видами, уровнями и способами приложения испытательных воздействий.

Под ресурсом L понимают ресурс образца материала или системы изоляции или ресурс материала или системы изоляции в изделии.

5.2. По результатам ускоренных испытаний проводят экстраполяцию результатов в область заданных температур эксплуатации и (или) заданных ресурсов L . Экстраполяцию следует проводить не более чем на 50 % разности между максимальным и минимальным значениями испытательных температур в масштабе $1/T$. Допускается расширять средние пределы экстраполяции, если в результате изучения механизма возникновения отказа выявлено, что в расширенных пределах не должно происходить изменения коэффициентов формул (1) или (2), или при выполнении условий п. 4.8.

5.3. Экспериментальные данные для получения аналитической зависимости между ресурсом L и температурой обрабатывают по методу наименьших квадратов с вычислением среднего логарифмического ресурса L , коэффициентов зависимостей (п. 5.1), нижних доверительных границ для среднего и, если требуется, нижних доверительных границ для гамма-процентных ресурсов, температурных индексов, и температур, характеризующих нагревостойкость.

Типовые графики зависимости от температуры среднего ресурса системы изоляции электрических машин и аппаратов приведены в приложении 3.

Метод расчетов приведен в приложениях 4, 5.

Пример обработки экспериментальных данных приведен в приложении 6.

5.4. Если зависимость среднего ресурса L от температуры, определяемая по приложению 4 и вычисленная по формуле (2), резко отлична от линейной, то для окончательного установления нагревостойкости материалов или систем изоляции проводят дополнительно испытания при одной или более значениях испытательных температур, не совпадающих с прежними, причем нижнее значение испытательной температуры не должно отличаться от температуры, характеризующей предполагаемый температурный индекс или класс нагревостойкости, более чем на 20 °С (рекомендуется, чтобы дополнительные значения лежали между первоначальными). При этом рекомендуется проводить параллельные испытания материалов и

систем изоляции, характер зависимости ресурса которых от температуры не вызывает сомнений.

Допускается не проводить дополнительных испытаний, если первоначальные испытания проводились не менее чем при четырех значениях испытательных температур и при соблюдении остальных требований в части общего числа и интервалов значений температуры. Экспериментальные данные в соответствии с п. 5.3 обрабатывают в этом случае по линейной части зависимости логарифма ресурса от величины обратной абсолютной температуры, причем не менее чем по трем экспериментальным точкам, поочередно исключая из рассмотрения более высокие значения температуры.

5.5. За температуру, характеризующую нагревостойкость системы изоляции, или за температурный индекс материала принимают температуру, полученную путем экстраполяции по п. 5.2 и соответствующую единому стандартному ресурсу, базовому для данной группы однотипных материалов систем изоляции. При этом для каждого электроизоляционного материала при одном и том же базовом ресурсе могут быть получены разные температурные индексы в зависимости от толщины и (или) значений критериев отказа.

Для систем изоляции базовый ресурс определяют на основании требований, предъявляемых к изделию, и результатов испытаний системы изоляции по стандартам на методы испытаний конкретного типа системы изоляции.

При определении указанного базового ресурса испытаниям подвергают систему изоляции, целиком состоящую из изоляционных материалов, нагревостойкость которых не вызывает сомнений (базовая система).

Рекомендуется, чтобы класс нагревостойкости выбранной для этой цели системы изоляции соответствовал предполагаемому классу нагревостойкости испытываемой системы изоляции, а по остальным свойствам выбранная для определения базового ресурса система изоляции была возможна более близка к испытываемой.

Этот базовый ресурс указывают в стандарте на испытания конкретного типа системы изоляции, за исключением случаев, указанных в пп. 5.6 и 5.7.

Для определения базового ресурса образца материала допускается применять такую же методику, как для систем изоляции.

5.6 В отдельных технически обоснованных случаях допускается в стандарте на испытания конкретного типа системы изоляции не указывать единого базового ресурса, а руководствоваться требованиями п. 5.7.

5.7. До разработки указанных в пп. 5.5 и 5.6 стандартов на методы испытаний конкретного типа систем изоляции и определения соответствующих стандартных базовых ресурсов следует определять температуру, характеризующую нагревостойкость, путем проведения сравнительных параллельных испытаний, причем для сравнения используют аналогичную систему изоляции, нагревостойкость которой однозначно установлена путем длительных испытаний или опыта эксплуатации. Тип этой системы изоляции должен быть согласован с предполагаемым заказчиком и базовой организацией по стандартизации электроизоляционных материалов и указан в программе испытаний, утвержденной в установленном порядке, рекомендуется согласовать тип этой системы с другими заинтересованными организациями.

5.8. Систему изоляции относят к данному классу нагревостойкости, если полученная согласно пп. 5.5 или 5.7 температура не ниже, чем температура данного класса, и не выше, чем температура следующего, более высокого класса за вычетом 1 °С. Под температурой класса понимают температуру, соответствующую классу нагревостойкости по ГОСТ 8865-87.

Полученные указанным методом и соответствующие данным табл. 2, приложения 2 типовые графики зависимости от температуры ресурсов систем изоляции электрических машин и аппаратов с обмоткой из круглых проводов с эмалевой, эмалево-волокнистой или волокнистой изоляцией приведены в приложении 3.

5.9. Если результаты испытаний используют для установления режима ускоренных контрольных испытаний при одном значении температуры, коэффициент ускорения испытаний определяют по ГОСТ 21126-75, при этом под τ_0 понимают базовый ресурс для системы изоляции или материала.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
(Справочное)

ПОЯСНЕНИЕ ТЕРМИНОВ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В СТАНДАРТЕ

Система изоляции - изоляционный материал или совокупность изоляционных материалов, рассматриваемых вместе с относящимися к ним токоведущими частями, применительно к отдельному типу, типоразмеру или части электротехнического изделия.

Нагревостойкость системы изоляции - способность системы изоляции выполнять свои функции при воздействии на каждый материал, входящий в данную систему изоляции, рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации изделий, при обусловленных (аналогичных эксплуатационным) величинах остальных эксплуатационных воздействий.

Температура, характеризующая нагревостойкость системы изоляции - предельно допустимая в наиболее нагретом месте системы температура при работе системы изоляции в нормальных для данного вида электротехнических изделий эксплуатационных условиях и при ресурсах, сравнимых с ресурсами электротехнических изделий общего применения.

Ресурс материала, системы изоляции в изделии - суммарное время в течение которого материал, система изоляции могут выполнять свои функции в работающем изделии.

Ресурс образца материала, системы изоляции - по ГОСТ 21126-75.

График нагревостойкости систем изоляции - графическое изображение зависимости логарифма ресурса системы изоляции от обратного значения абсолютной температуры.

Критерий отказа - по ГОСТ 21126-75*.

Критическое значение критерия отказа - по ГОСТ 21126-75*.

Коэффициент ускорения испытаний - по ГОСТ 21126-75.

* В некоторой нормативно-технической документации - проверяемая характеристика или характеристический показатель.

** В некоторой нормативно-технической документации - критерий конечной точки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 (Рекомендуемое)

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ В КАЖДОМ ЦИКЛЕ ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА НАГРЕВОСТОЙКОСТЬ

Таблица 1

Температура старения для диапазона температур, в которых находятся предполагаемые температуры, соответствующие ресурсу образцов 20000 ч														Длительность одного цикла, сут.
от 100	от 110	от 120	от 130	от 140	от 150	от 160	от 170	от 180	от 190	от 200	от 210	от 220	от 230	
до 109	до 119	до 129	до 139	до 149	до 159	до 169	до 179	до 189	до 199	до 209	до 219	до 229	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

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

Таблица 2

Температуры испытаний, °C	Продолжительность термического старения, сутки, при ожидаемом классе нагревостойкости
---------------------------	---

	90(Y)	105(A)	120(E)	130(B)	155(F)	180(H)	200*	220*	250*
310	-	-	-	-	-	-	-	-	2
300	-	-	-	-	-	-	-	-	4
290	--	-	-	-	-	-	-	-	7
280	-	-	-	-	-	-	-	2	14
270	-	-	-	-	-	-	-	4	28
260	-	-	-	-	-	-	2	7	-
250	-	-	-	-	-	-	4	14	-
240	-	-	-	-	-	2	7	28	-
230	-	-	-	-	-	4	14	-	-
220	-	-	-	-	2	7	28	-	-
210	-	-	-	-	4	14	-	-	-
200	-	-	-	2	6	28	-	-	-
190	-	-	2	4	10	-	-	-	-
180	-	1	4	6	17	-	-	-	-
170	-	2	6	10	28	-	-	-	-
160	1	4	10	17	-	-	-	-	-
150	2	6	17	28	-	-	-	-	-
140	4	10	28	-	-	-	-	-	-
130	6	17	-	-	-	-	-	-	-
120	10	28	-	-	-	-	-	-	-
110	17	-	-	-	-	-	-	-	-
100	28	-	-	-	-	-	-	-	-

* Продолжительность равна примерно 1/10 ожидаемого ресурса при базовом ресурсе 20000 ч.

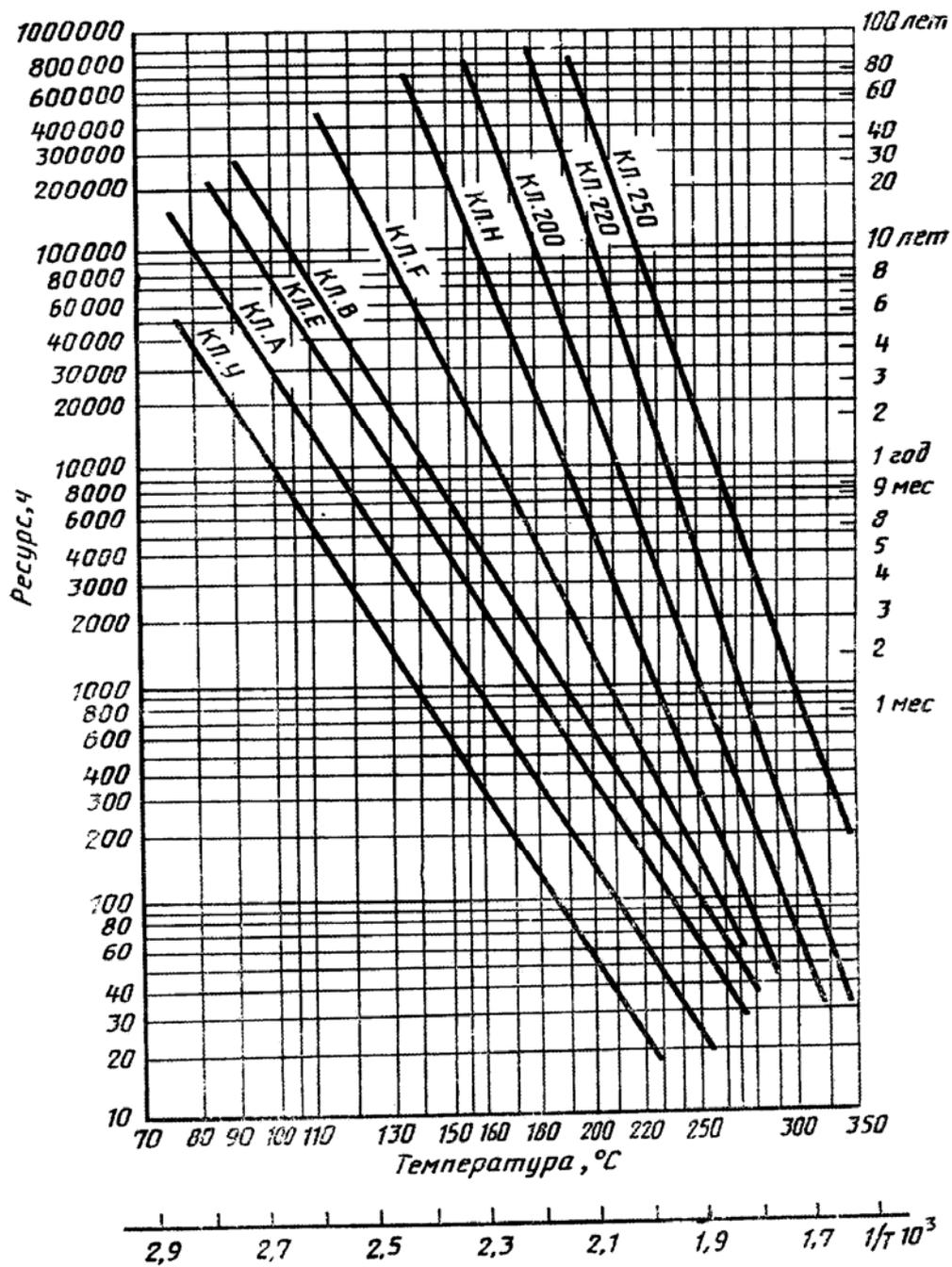
ПРИЛОЖЕНИЕ 3
(Рекомендуемое)

ТИПОВЫЕ ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДНЕГО РЕСУРСА СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ С ОБМОТКОЙ ИЗ КРУГЛЫХ ПРОВОДОВ С ЭМАЛЕВОЙ, ЭМАЛЕВО-ВОЛОКНИСТОЙ И ВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Графики составлены в соответствии с табл.2 приложения 2 к настоящему стандарту и представляют собой обобщение результатов испытаний материалов и систем изоляции по методикам ГОСТ 10519-76 или по другим соответствующим методикам (см. черт.). Графики могут быть использованы для ориентировочных расчетов допустимых превышений температуры обмоток в изделиях со средним ресурсом, отличающимся (в меньшую* или большую сторону) от среднего ресурса изделий общего назначения, а также для сравнения результатов определения нагревостойкости новых материалов и систем изоляции.

Если для конкретных систем изоляции имеются графики зависимости от температуры среднего ресурса этих систем изоляции, следует пользоваться графиками для конкретных систем изоляции.

* При этом должны быть учтены имеющиеся данные по ограничению наибольших температур в соответствии с п. 4.8.



ПРИЛОЖЕНИЕ 4
(Обязательное)

**ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ РЕСУРСОМ И ТЕМПЕРАТУРОЙ**

1. Зависимость ресурса от температуры выражают формулой (3), полученной из формулы (2).

$$u = a_1 + a_2 x, \quad (3)$$

где $u = \lg L$; $x = \frac{1}{T}$; $a_1 = A'$; $a_2 = B'$.

2. Результаты испытаний начинают обрабатывать с вычисления ресурса, полученного при испытаниях каждого образца.

Ресурс образцов, которые испытывают в лабораторных камерах тепла и у которых приложение воздействия производят после извлечения образцов из камеры, вычисляют в часах как суммарное время воздействия испытательной температуры во всех циклах испытаний за вычетом половины длительности воздействия в последнем цикле, после которого наступил отказ образцов. Половину длительности не вычитают, если методика определения параметров образца позволяет определить момент наступления отказа в процессе воздействия температуры (например, при испытаниях путем работы под током, при этом время воздействие испытательной температуры считают с момента включения образцов до момента отключения).

3. После того как все образцы отказали, вычисляют ресурс при каждой испытательной температуре. Для предварительной оценки при испытаниях при наименьшей испытательной температуре допускается принимать значение ресурса 50 %-ного образца. Для предварительной оценки результатов испытаний вычисляют средний ресурс как среднее арифметическое ресурсов всех образцов, испытывавшихся в данном режиме.

После этого вычисляют логарифмы каждого ресурса u_i и среднелогарифмический ресурс в каждом испытательном режиме (среднее арифметическое логарифмов ресурсов) \bar{u}_{ic}

$$\bar{u}_{ic} = \frac{1}{n_{ic}} \sum u_i, \quad (4)$$

где n_{ic} - число образцов, испытывавшихся в каждом испытательном режиме.

4. При необходимости затем результаты испытаний корректируют, исключая из рассмотрения образцы с резко выделяющимися значениями логарифмов ресурсов, согласно приложению 5.

Для каждого испытательного режима вычисляют среднелогарифмический скорректированный ресурс (среднее арифметическое логарифмов ресурсов всех оставшихся для рассмотрения образцов) \bar{u}_i .

5. Следующим этапом обработки данных является вычисление коэффициентов формулы (3).

Сначала определяют средние значения \bar{u}_{xk} и \bar{x}_{ik}

$$\bar{u}_{xk} = \frac{\sum \bar{u}_i}{n_{xi}} \quad (5)$$

$$\bar{x}_{ik} = \frac{\sum \bar{x}_{ik}}{n_{xi}}, \quad (6)$$

где n_{xi} - число испытательных режимов (число значений температур);

\bar{x}_{ik} - значения \bar{x} для каждой температуры испытаний;

u_i - скорректированный среднелогарифмический ресурс при каждой температуре испытаний;

$$a_2 = \frac{\sum (\bar{u}_i - \bar{u}_{xk})(x_{ik} - \bar{x}_{ik})}{\sum (x_{ik} - \bar{x}_{ik})^2}; \quad (7)$$

$$a_1 = \bar{u}_{xk} - a_2 \bar{x}_{ik}. \quad (8)$$

При испытаниях готовых изделий путем работы под током в тех случаях, когда фактические температуры обмоток, испытывавшихся при одинаковой номинальной испытательной температуре, различаются более чем на 3°C, коэффициент a'_2 определяют по формуле

$$a'_2 = \frac{\sum (u_i - \bar{u}_{xk})(x - \bar{x}'_{ik})}{\sum (x - \bar{x}'_{ik})^2}, \quad (9)$$

где N - общее число оставшихся для рассмотрения образцов во всех испытательных режимах испытаний;

x - величина x для каждого образца;

$$\bar{x}'_{ik} = \frac{\sum x}{N}; \quad (10)$$

$$a_1 = \bar{u}_{xk} - a'_2 \bar{x}'_{ik}. \quad (11)$$

6. Определяют дисперсии ресурсов u .

6.1. Вычисляют дисперсию для каждого испытательного режима

$$S_i^2 = \frac{\sum (u_i - \bar{u}_i)^2}{n_i - 1}, \quad (12)$$

где n_i - число образцов, оставленных для рассмотрения в каждом испытательном режиме.

Если в случае измерения параметров-критериев отказа в конце цикла или в конце заданного - интервала времени между измерениями (далее - цикла) все отказы в каком-либо из режимов произошли только в одном или двух циклах, то дисперсию для данного режима S_i^2 вычисляют по ГОСТ 21126-75 (приложение 5).

6.2. Вычисляют средневзвешенную дисперсию S_{ik}^2 экспериментальных точек относительно средних для них значений и \bar{u}_i .

$$S_{ik}^2 = \frac{\sum f_i \cdot S_i}{f_{uk}}, \quad (13)$$

где $f_i = n_i - 1$ (степень свободы данного режима);

$$f_{uk} = \sum_{n_{xi}} (n_i - 1). \quad (14)$$

6.3 Проводят проверку гипотезы однородности дисперсий.

Проверку проводят с использованием критерия Барлета в соответствии с ГОСТ 21126-75.

6.4 Вычисляют дисперсию S_{uk}^2 средних значений \bar{u}_i относительно соответствующих

значений линии регрессии \hat{u}_i

$$S_{uk}^2 = \frac{\sum n_i (\bar{u}_i - \hat{u}_i)^2}{n_{xi} - 2}. \quad (15)$$

\hat{u}_i вычисляют по формуле 20, принимая $x_{тр} = x_i$.

Число степеней свободы здесь $f_{3k} = n_{xi} - 2$.

6.5 Вычисляют общую дисперсию, то есть дисперсию всех экспериментальных точек относительно вычисленной линии регрессии (формула 3 коэффициенты a_1 и a_2 соответственно по формулам 8 или 11 и 7 или 9)

$$S^2 = \frac{\left(f_{uk} \cdot \bar{S}_{ik}^2 + f_{3k} \cdot S_{uk}^2 \right)}{f_c}, \quad (16)$$

где $f_c = N - 2$

6.6 Вычисляют дисперсию средних значений линии регрессии (дисперсию, характеризующую возможное смещение генерального среднего относительно линии регрессии, которая вычислена по выборочным данным)

$$S_{uk}^2 = S^2 \cdot b, \quad (17)$$

$$\text{где } b = \frac{1}{N} + \frac{(x_{тр} - \bar{x}_i)^2}{\sum_{n_{xi}} n_i (x_{ik} - \bar{x}_i)^2}; \quad (18)$$

$x_{тр}$ - значение x при требуемой температуре.

7 Проводят проверку гипотезы линейности.

Вычисляют дисперсионное отношение F

$$F = \frac{S_{\text{ук}}^2}{\overline{S}_{ik}^2} . \quad (19)$$

Сравнивая это дисперсионное отношение F с $F_{\text{табл}}$ для необходимого уровня значимости, принимают или отвергают гипотезу линейности в соответствии с требованиями ГОСТ 21126-75 (приложение 5).

8. Определяют вид статистического распределения экспериментальных данных (логарифмически-нормальное распределение или распределение Вейбулла) в соответствии с ГОСТ 11.008-75 или ГОСТ 11.006-74.

Если данные могут быть описаны обоими видами распределений или вид распределения неопределенный, дальнейшую обработку проводят как для логарифмически-нормального распределения.

9 Определяют ресурсы.

9.1 Определяют среднелогарифмический ресурс (математическое ожидание логарифма ресурса) при требуемой температуре

$$\hat{u}_{\text{тр}} = a_1 + a_2 \cdot x_{\text{тр}} . \quad (20)$$

9.2. Определяют средний ресурс при требуемой температуре $\hat{L}_{\text{тр}}$ как антилогарифм $\hat{u}_{\text{тр}}$

$$\hat{L}_{\text{тр}} = 10^{\hat{u}_{\text{тр}}} . \quad (21)$$

9.3 Определяют среднее значение (математическое ожидание) гамма-процентных ресурсов:

9.3.1. Для логарифмически-нормального распределения отказов.

9.3.1.1. Определяют u_{γ} математическое ожидание логарифма гамма-процентного ресурса, соответствующее требуемой вероятности безотказной работы по формуле

$$u_{\gamma} = \hat{u}_{\text{тр}} - Su_{\gamma} , \quad (22)$$

где u_{γ} - квантиль нормированного нормального распределения, определенная для требуемой вероятности безотказной работы (для требуемой величины γ).

9.3.1.2. Определяют математическое ожидание гамма-процентного ресурса

$$L_{\gamma\text{ли}} = 10^{\left(u_{\gamma} + 1,1513 \cdot S^2\right)} . \quad (23)$$

9.3.1.3. Для распределения Вейбулла.

$$L_{\gamma\text{в}} = 10^{\left(\hat{u}_{\text{тр}} + 1,1513 \cdot S^2\right)} \cdot 10^{\frac{0,1592}{b} \left[\lg \frac{1}{\gamma}\right]^{\frac{1}{b}}} , \quad (24)$$

где b - параметр формы распределения Вейбулла, определяемый по таблице 3 для коэффициента вариации ϑ_b , определяемого по формуле:

$$\vartheta_b = \sqrt{\exp(5,3018 \cdot S^2) - 1} . \quad (25)$$

10. Определяют нижние доверительные границы для ресурсов.

10.1. Определяют нижнюю доверительную границу средне-логарифмических значений ресурсов при заданной доверительной вероятности P^* (или уровне значимости $\alpha = 1 - P^*$).

$$u_{P^*} = \hat{u}_{\text{тр}} - t \cdot S_{\hat{u}} , \quad (26)$$

где u_{P^*} - нижняя доверительная граница средне-логарифмического ресурса при заданной доверительной вероятности;

t - распределение доверительных отклонений в малой выборке (распределение Стьюдента), определяемое по статистическим таблицам для за данного уровня доверительной вероятности P^* (например ГОСТ 2126 - 75, приложение 8) и числа степеней свободы f_s ;

$\hat{u}_{\text{тр}}$ - значение средне-логарифмического ресурса при требуемом значении температуры, определенное по формуле 20 или по построенному графику нагревостойкости.

10.2. Определяют нижнюю доверительную границу среднего ресурса L_{P^*} при заданной

доверительной вероятности P^* как антилогарифм u_{P^*}

$$L_{P^*} = 10^{u_{P^*}} \quad (27)$$

Таблица 3

g_b	b	g_b	b	g_b	b
15,84	0,20	0,399	2,70	0,221	5,20
5,408	0,30	0,387	2,80	0,217	5,30
3,141	0,40	0,375	2,90	0,213	5,40
2,236	0,50	0,363	3,00	0,210	5,50
1,758	0,60	0,353	3,10	0,206	5,60
1,462	0,70	0,343	3,20	0,203	5,70
1,260	0,80	0,333	3,30	0,200	5,80
1,113	0,90	0,325	3,40	0,197	5,90
1,000	1,00	0,316	3,50	0,194	6,00
0,910	1,10	0,308	3,60	0,191	6,10
0,837	1,20	0,301	3,70	0,188	6,20
0,776	1,30	0,294	3,80	0,185	6,30
0,724	1,40	0,287	3,90	0,183	6,40
0,679	1,50	0,280	4,00	0,180	6,50
0,640	1,60	0,274	4,10	0,177	6,60
0,605	1,70	0,268	4,20	0,175	6,70
0,575	1,80	0,263	4,30	0,173	6,80
0,547	1,90	0,257	4,40	0,170	6,90
0,523	2,00	0,252	4,50	0,168	7,00
0,500	2,10	0,247	4,60	0,158	7,50
0,480	2,20	0,242	4,70	0,148	8,00
0,461	2,30	0,238	4,80	0,140	8,50
0,444	2,40	0,233	4,90	0,133	9,00
0,428	2,50	0,229	5,00	0,126	9,50
0,413	2,60	0,225	5,10	0,120	10,00

10.3. Для логарифмически нормального распределения определяют u_P - логарифм ресурса, соответствующий требуемой вероятности безотказной работы, при заданной доверительной вероятности P^* (нижнюю логарифмическую доверительную границу для ресурса при заданной доверительной вероятности P^* и заданной вероятности безотказной работы P).

$$u_P = u_{P^*} - Su_\alpha \left(1 + \frac{z_P}{\sqrt{2(N-1)}} \right), \quad (28)$$

где u_α - квантиль нормированного нормального распределения, определенная для требуемой вероятности безотказной работы P (см., например ГОСТ 21126-75, приложение 8);

z_P - квантиль удвоенной нормированной функции Лапласа, определенная для требуемой доверительной вероятности P^* .

10.4. Для логарифмически нормального распределения определяют нижнюю границу гамма-процентного ресурса при заданной доверительной вероятности P^* .

$$L_{P_{\gamma_{\text{дн}}}} = 10^{\left(u_{P^*+1,1513 \cdot S^2} \right)}. \quad (29)$$

105. Для распределения Вейбулла определяют нижнюю границу гамма-процентного ресурса при заданной доверительной вероятности P^* .

$$L_{P_{\gamma_{\text{в}}}} = 10^{\left(u_{P^*+1,1513 \cdot S^2} \right)} \cdot 10^{\frac{0,1592}{b} \left[\ln \frac{1}{\gamma} \right]^{\frac{1}{b}}}. \quad (30)$$

(Обязательное)

МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ РЕЗКО ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ЗНАЧЕНИЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Метод исключения основан на критерии Ирвина. Метод применим для случая, когда испытательные температуры образцов, испытываемых при одной и той же температуре испытаний, различаются в пределах $\pm 3^\circ\text{C}$.

1. Определяют некорректированную дисперсию логарифмов ресурсов при каждом испытательном режиме S_{ic}^2

$$S_{ic}^2 = \frac{1}{n_{ic} - 1} \sum (u_i - \bar{u}_{ic})^2, \quad (31)$$

где n_{ic} , u_i , \bar{u}_{ic} - то же, что в формуле 4.

2. Все полученные значения располагают в ряд $u_1, u_2, u_3 \dots u_{ni}$ по степени возрастания величин (вариационный ряд).

3. Проверяют сомнительные значения на одном или двух краях ряда, составленного по п.2. Проверку начинают от края ряда и проверяют поочередно каждое следующее (по направлению к середине ряда) сомнительное значение.

4. Для проверки вычисляют функцию λ_{kc}

$$\lambda_{kc} = \frac{u_{kc} - u_{(k-1)c}}{S_{ic}}$$

где u_{kc} - вызывающее сомнение значение ресурса;

$u_{(k-1)c}$ - следующее от края ряда значение ресурса;

k - номер по порядку от края ряда.

5. Сравнивают полученные значения λ_{kc} с приведенными в таблице 4 значениями $\lambda_{\text{табл}}$. Если хотя бы для одного вызывающего сомнение значения ресурса λ_{kc} больше $\lambda_{\text{табл}}$, в расчет не принимают все вызывающие сомнение значения ресурса от края ряда до u_{kc} включительно.

6. Проверку продолжают до тех пор, пока не будут получены значения $\lambda_{kc} \leq \lambda_{\text{табл}}$.

Таблица 4

P_{ic}	λ табл. при доверительных границах		P_{ic}	λ табл. при доверительных границах	
	95%	99%		95%	99%
5	1,9	2,4	30	1,2	1,7
10	1,5	2,0	50	1,1	1,6
20	1,3	1,8	100	1,0	1,5
			400	0,9	1,3
			1000	0,8	1,2

ПРИЛОЖЕНИЕ 6
(Справочное)

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ

Для примера использованы данные испытаний в макетах витковой изоляции с проводом ПЭТД-180 диаметром 1,18 мм и пропиточным лаком УР-9144. Испытания проведены при температурах 180, 200 и 220 °С с длительностью циклов соответственно 17, 6 и 2 сут. Обработка экспериментальных данных проводилась по формулам приложения 4, пункты приложения приведены ниже в скобках.

1. Определение среднелогарифмического ресурса \bar{u}_i (пп. 3 и 5) и его дисперсии S_i^2 (п. 6.1) для каждого испытательного режима.

Исходные данные и результаты вычислений приведены в табл. 5-7. При каждой температуре

испытаний получено 20 значений. Однако при температуре 180 °С одно значение, равное 1836 ч, исключено (п. 4) в соответствии с приложением 5, так как

$$\lambda_{kc} = \frac{3,63185 - 3,26387}{0,13352} = 2,8 > 1,8$$

Поэтому при температуре 180 °С для вычислений осталось 19 значений.

Таблица 5

Определение \bar{u}_1 и S_1^2 для T = 453 К (180 °С)

Количество значений	L_i	$u_i = \lg L_i$	\bar{u}_1	$(u_i - \bar{u}_1)$	$(u_i - \bar{u}_1)^2$
1	4284	3,63185	3,78751	-0,15566	0,02423
4	5100	3,70757		-0,07994	0,00639
1	5508	3,74099		-0,04652	0,00216
3	6324	3,80099		0,01348	0,00018
8	6732	3,82814		0,04063	0,00165
1	7140	3,85370		0,06619	0,00438
1	7548	3,87783		0,09032	0,00816

$$\sum n = n_i = 19$$

$$\sum u_i n = 3,63185 \cdot 1 + 3,70757 \cdot 4 + 3,74099 \cdot 1 + 3,80099 \cdot 3 + 3,82814 \cdot 8 + 3,85370 \cdot 1 + 3,85783 \cdot 1 = 71,96274$$

$$\bar{u}_1 = \frac{\sum u_i \cdot n}{\sum n_i} = \frac{71,96274}{19} = 3,78751$$

$$\sum (u_i - \bar{u}_1)^2 n = 0,02423 \cdot 1 + 0,00639 \cdot 4 + 0,00216 \cdot 1 + 0,00018 \cdot 3 + 0,00165 \cdot 8 + 0,00438 \cdot 1 + 0,00816 \cdot 1 = 0,07823$$

$$S_1^2 = \frac{\sum (u_i - \bar{u}_1)^2 n}{n_i - 1} = \frac{0,07823}{18} = 0,004346$$

Таблица 6

Определение \bar{u}_2 и S_2^2 для T = 473 К (200 °С)

Количество значений	L_i	$u_i = \lg L_i$	\bar{u}_2	$(u_i - \bar{u}_2)$	$(u_i - \bar{u}_2)^2$
6	1224	3,08778	3,15775	-0,06997	0,00490
1	1368	3,13609		-0,02166	0,00047
9	1512	3,17955		0,02180	0,00048
4	1656	3,21906		0,06131	0,00376

$$\sum n = n_i = 20 \quad \sum u_i = 63,15496 \quad \sum (u_i - \bar{u}_1) n = 0,04923$$

$$\bar{u}_2 = \frac{63,15496}{20} = 3,15775 \quad S_2^2 = \frac{0,04923}{19} = 0,002591$$

Таблица 7

Определение \bar{u}_3 и S_3^2 для T = 493 К (220 °С)

Количество значений n_i	L_i	$u_i = \lg L_i$	\bar{u}_3	$(u_i - \bar{u}_3)$	$(u_i - \bar{u}_3)^2$
3	360	2,55630	2,65345	-0,09715	0,00944
7	408	2,61066		-0,04279	0,00183
2	456	2,65896		0,00551	0,00003
5	504	2,70243		0,04898	0,00240
2	552	2,74194		0,08849	0,00783
1	648	2,81158		0,15813	0,02501

$$\sum n = n_i = 20 \quad \sum u_i n = 53,06905 \quad \sum (u_i - \bar{u}_1)^2 n = 0,0938$$

$$\bar{u}_3 = \frac{53,06905}{20} = 2,65345 \quad S_3^2 = \frac{0,09386}{19} = 0,004940$$

2. Определение коэффициентов линии регрессии (формула 3) п. 5
Промежуточные данные для расчета приведены в табл. 8 и 9.

Таблица 8

$T_{ik}, ^\circ\text{C}$	$x_{ik} = \frac{1}{273+T}$	\bar{x}_{ik}	$x_{ik} - \bar{x}_{ik}$	$(x_{ik} - \bar{x}_{ik})^2$
180	$2,2075 \cdot 10^{-3}$	$2,1167 \cdot 10^{-3}$	$0,0908 \cdot 10^{-3}$	$8,2446 \cdot 10^{-9}$
200	$2,1142 \cdot 10^{-3}$		$-0,0025 \cdot 10^{-3}$	$0,0063 \cdot 10^{-9}$
220	$2,0284 \cdot 10^{-3}$		$-0,883 \cdot 10^{-3}$	$7,7969 \cdot 10^{-9}$

$$\Sigma = 16,0478 \cdot 10^{-9}$$

Таблица 9

$T, ^\circ\text{C}$	\bar{u}_i	\bar{u}_{xk}	$(\bar{u}_i - \bar{u}_{xk})$	$(x_{ik} - \bar{x}_{ik})(\bar{u}_i - \bar{u}_{xk})$
180	3,78751	3,19957	0,58794	$53,385 \cdot 10^{-6}$
200	3,15775		$-0,04182$	$0,1046 \cdot 10^{-6}$
220	2,65345		$-0,54612$	$48,2224 \cdot 10^{-6}$

$$\Sigma = 101,712 \cdot 10^{-6}$$

По формуле (7) определяем

$$a_2 = \frac{101,712 \cdot 10^{-6}}{16,0478 \cdot 10^{-9}} = 6338$$

По формуле (8) определяем

$$a_1 = 3,19957 - 6338 \cdot 2,1167 \cdot 10^{-3} = -10,21608$$

3. Проверка гипотезы однородности дисперсий (п. 6.3).

Определяем средневзвешенную дисперсию \bar{S}_{ik}^2 экспериментальных точек относительно средних для них значений \bar{u}_i (п. 6.2) по формуле (13)

$$\bar{S}_{ik}^2 = \frac{18 \cdot 0,004346 + 19 \cdot 0,002591 + 19 \cdot 0,004940}{18 + 19 + 19} = 0,003952$$

Вычисляем критерий Бартлета (п. 6.3)

$$B = \frac{2,303[56 \lg 0,003952 - 18 \lg 0,004346 - 19 \lg 0,004940]}{1 + \frac{1}{18} + \frac{1}{19} + \frac{1}{19} - \frac{1}{18+19+19}} = \frac{2,303 \cdot 0,88693}{1,02383} = 1,99506$$

Полученное значение $B = 2,0$ меньше табличного $\lambda_{\text{табл}}^2 = 6,0$.

Поэтому дисперсии однородны.

4. Проверка гипотезы линейности (п. 7).

Определяем средние значения \hat{u}_i на линии регрессии для испытательных температур x_i (п. 6.4) из выражения (формула 20).

$$\hat{u}_i = -10,21608 + 6338 \cdot x_i$$

$$\hat{u}_1 = 3,77506; \quad \hat{u}_2 = 3,18372; \quad \hat{u}_3 = 2,63992$$

Вычисляем дисперсию средних значений относительно соответствующих линий регрессии $S_{\hat{u}k}^2$ (п. 6.4) по формуле (15)

uk

$$S_{uk}^2 = \frac{19(3,78751 - 3,77506)^2 + 20(3,15775 - 3,18372)^2 + 20(2,65345 - 2,63992)^2}{(3-2)} = 0,020095$$

Вычисляем дисперсионное отношение F

$$F = \frac{S_{uk}^2}{\bar{S}_{ik}^2} = \frac{0,020095}{0,003952} = 5,08.$$

Условие линейности выполняется для уровня значимости, равного 0,025, так как 5,08 меньше табличного значения, равного 5,29.

5. Определение вида статистического распределения.

По критерию ω^2 получено в соответствии с ГОСТ 11.006-74, что эмпирические данные могут быть описаны как логарифмически нормальным распределением, так и распределением Вейбулла.

6. Определение среднего ресурса при требуемой температуре $t_{тр} = 155^\circ\text{C}$ (пп. 9.1 и 9.2).

По формулам (20 и 21) определяем

$$x_{тр} = \frac{1}{273+155} = 0,0023364$$

$$\hat{u}_{155} = -1021608 + 6338 \cdot 0,0023364 = 4,59233$$

$$\hat{L}_{155} = 39113 \text{ ч} \approx 39000 \text{ ч}.$$

7. Определение среднего значения гамма-процентного ресурса для логарифмически нормального распределения (п. 9.3.1).

Определяем общую дисперсию (п. 6.5) по формуле (16).

$$S^2 = \frac{56 \cdot 0,003952 + 1 \cdot 0,020095}{57} = 0,004235$$

$$S = 0,065078$$

Определяем u_γ (п. 9.5.1.1) по формуле (22) для $\gamma = 0,9$

$$u_\alpha = 1,282 \text{ для } \gamma = 0,9 \text{ (по таблицам)}$$

$$u_\gamma = u_{0,9} = 4,59233 - 0,065078 \cdot 1,282 = 4,512154$$

Определяем математическое ожидание гамма-процентного ресурса (п. 9.3.1.2) для $\gamma = 0,9$ по формуле (23).

$$L_{0,9,ли} = 10 (4,512154 + 1,1513 \cdot 0,004235) = 32887 \text{ ч} \approx 33000 \text{ ч}.$$

8. Определение среднего значения гамма-процентного ресурса для распределения Вейбулла (п. 9.3.2).

Определяем коэффициент вариации по формуле (25).

$$\vartheta_B = \sqrt{\exp(5,3018 \cdot 0,004235) - 1} = 0,151$$

По таблице 3 для $\vartheta_B = 0,1507$ параметр формы b распределения Вейбулла равен 7,85.

Определяем математическое ожидание гамма-процентного ресурса по формуле (24) для $\gamma=0,9$.

$$L_{0,9B} = 10^{(4,59233+1,1513 \cdot 0,004235)} \cdot 10^{\frac{0,1592}{7,85} \left[\ln\left(\frac{1}{0,9}\right) \right]} \frac{1}{7,85} = 31115 \text{ ч} \approx 31000 \text{ ч}.$$

9. Определение нижних доверительных границ для ресурсов.

Заданная доверительная вероятность $P^* = 90\%$.

Определяем дисперсию средних значений линии регрессии (п. 6.6) для требуемой температуры по формулам (17) и (18)

$$S_u^2 = 0,004235 \left[\frac{1}{59} + \frac{(2,3364 \cdot 10^{-3} - 2,1167 \cdot 10^{-3})^2}{(19 \cdot 8,2446 + 20 \cdot 0,0063 + 20 \cdot 7,7969) 10^{-9}} \right] = 0,004235 \cdot 0,1713 = 0,0007255$$

$$S_u = 0,02693$$

Определяем нижнюю доверительную границу среднелогарифмического ресурса для 90%-ной доверительной вероятности по формуле (26)

$$u_{p^*} = 4,59233 - 1,67 \cdot 0,02693 = 4,54736.$$

Определяем нижнюю доверительную границу среднего ресурса (п. 10.2) по формуле (27).

$$L_{90^*} = 10^{4,54736} = 35266 \text{ ч} \approx 35000 \text{ ч}.$$

Для логарифмически нормального распределения определяем логарифм ресурса, соответствующий вероятности безотказной работы 0,9 при 90 % доверительной вероятности (п. 10.3) по формуле (28).

$$u_p = 4,54736 - 0,065078 \cdot 1,282 \left(1 + \frac{1,645}{2\sqrt{59-1}} \right) = 4,4539$$

Для логарифмически нормального распределения определяем ч нижнюю границу 90%-ного ресурса при 90 %-ной доверительной вероятности (п. 10.4) по формуле (29).

$$L_{0,9;0,9;лн} = 10^{4,4539+1,1513 \cdot 0,004235} = 28760 \text{ ч} \approx 29000 \text{ ч}.$$

Для распределения Вейбулла определяем нижнюю границу 90 %-ного ресурса при 90%-ной доверительной вероятности по формуле (30).

$$L_{0,9;0,9;в} = 10^{4,54736+1,1513 \cdot 0,004235} \cdot 10^{\frac{0,1592}{7,85} \left[\ln \left(\frac{1}{0,9} \right) \right]} \frac{1}{7,85} = 28055 \text{ ч} \approx 28000 \text{ ч}.$$