

**М.Ю. СЕРЕГИН**

# **ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ**

**Часть 1**

## **МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИСПЫТАНИЙ**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК 620.1(075)  
ББК Ж3-1я73  
С325

Рецензенты:

Начальник отдела АСУ Тамбовского ЦСМ  
*Д.Ю. Крылов*

Доцент кафедры "Криминалистика и информатизация  
правовой деятельности" ТГТУ  
кандидат технических наук  
*А.В. Терехов*

**Серегин, М.Ю.**

C325 Организация и технология испытаний : в 2 ч. Ч. 1: Методы и приборы испытаний : учебное пособие / М.Ю. Серегин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 84 с. – 100 экз. – ISBN 5-8265-0546-X.

Учебное пособие является базовым при изучении дисциплины "Организация и технология испытаний".

Предназначено для студентов 5 курса специальностей 200503 и 220501. Рекомендуется также студентам и магистрантам для организации самостоятельной работы по изучению методов и процедур проведения испытаний продукции и материалов.

УДК 620.1(075)  
ББК ЖЗ-1я73

ISBN 5-8265-0546-X

© Серегин М.Ю., 2006

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный  
технический университет" (ТГТУ), 2006

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

М.Ю. СЕРЕГИН

# ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ

Часть 1

## МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИСПЫТАНИЙ

Утверждено Ученым советом университета  
в качестве учебного пособия  
для студентов 5 курса специальностей 200503 и 220501



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2006

Учебное издание

СЕРЕГИН Михаил Юрьевич

## ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ

Часть 1

### МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИСПЫТАНИЙ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 15.12.2006.

Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

4,7 уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Заказ № 813

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

Испытания являются одним из важнейших этапов жизненного цикла продукта. Проведение испытаний позволяет определить пригодность применения материалов и сырья для изготовления продукции, проконтролировать качество получаемого материала, а также определить возможность использования технологических приемов и методов при изготовлении изделий.

Испытания проводятся на всех этапах жизненного цикла продукта. Правильная организация испытаний позволяет избежать недостоверных результатов и предотвратить выпуск несоответствующей продукции.

Важнейшей частью организации испытаний является грамотная разработка и утверждение методик проведения испытаний. Правильно составленная методика проведения испытаний позволяет получать результаты с высокой достоверностью даже при работе персонала с низкой квалификацией.

### 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗДЕЛИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Воздействия, оказывающие влияния на изделия, материалы и сырье различают по ряду признаков их разделяют на внутренние и внешние воздействия. Внешние воздействия, в свою очередь, можно разделить на: температурные воздействия; воздействия климатических, механических, космических факторов в естественных условиях и в условиях применения на объекте.

**Климатические воздействия** разделяются на следующие типы:

- температура, влажность, давление, температура повышенная 50...80 °С – для аппаратуры в условиях эксплуатации и условиях хранения – пониженная температура – +5, –40 °С.
- влажность "сухая и мокрая" – пониженная и повышенная; повышенная 98 % и выше; точка росы – точка конденсации пара; наличие дождя.
- гидроустойчивость;
- повышенное и пониженное давление – не разрушение материала;
- совокупное воздействие климатических факторов – воздействие, например, температуры и влажности.

**Механические воздействия** на аппаратуру, материалы или изделия разделяют на испытания:

- разрушающие и неразрушающие;
- на прочность, разрушение;
- на критическую нагрузку;
- на разрыв;
- на сжатие и изгиб;
- на кручение;
- на излом;
- на сдвиг;
- на удар;
- на воздействие вибрации – гармонической, случайной, стохастической, негармонической;
- на центробежные нагрузки или ускорения;
- испытание на прочность и жесткость.

**Биологические воздействия** разделяют на:

- механические макроразрушения при контакте:
  - 1) столкновение – олени, лоси, люди, птицы и т.д.;
  - 2) прогрызание – мыши, термиты;
  - 3) уничтожение;
- ухудшение эксплуатационных свойств в результате:
  - 1) биозагрязнения;
  - 2) биозасорения;
  - 3) биообрастание: плесень, мох, деревья, плющ;
- биохимическое разрушение:
  - 1) биологические повреждения в процессе питания – грибы;
  - 2) химическое воздействие выделяющихся веществ  $H_2$ , плесень выделяет органическую кислоту;
  - 3) физико-химическая коррозия на границе материала-организма, плесень, грызуны, микроорганизмы, вирусы и бактерии.

Необходимо учитывать хорошую приспособляемость микроорганизмов к изменениям параметров окружающей среды, влияние на их рост температуры, влажности, давления, кислотности и других факторов. Наиболее сильное влияние на рост организмов оказывает температура. Размеры организмов существенно влияют на их активность. Увеличение отношения поверхности к объему у микроорганизмов обуславливает высокую скорость протекания реакций, т.е. интенсивность обмена веществ и роста.

По отношению к использованию воздуха для выработки клеточной энергии различают аэробные (основными являются окислительные реакции, в которых акцептор водорода – кислород) и анаэробные (без свободного кислорода) условия жизни и развития организмов.

*Бактерии* – самая многочисленная и распространенная группа микроорганизмов, имеющих одноклеточное строение. Большинство видов бактерий существует за счет мертвых органических остатков.

Одной из особенностей микроорганизмов является их способность к спорообразованию. Споры у бактерий образуются при неблагоприятных условиях существования (недостатке питательных веществ, высушивании, изменении pH среды и т.д.), причем из одной клетки формируется только одна спора. Образование спор у бактерий не связано с процессом размножения, а является приспособлением к выживанию в неблагоприятных условиях внешней среды. Размножение бактерий осуществляется путем деления.

*Плесневые грибы* отличаются от бактерий более сложным строением и более совершенным способом размножения спорами. Клетки грибов (гифы) образуют переплетения и ветвления, называемые мицелием.

Грибы способны вырабатывать клеточную энергию только за счет энергии химических реакций. Мицелий и споры грибов образуют хорошо окрашенные колонии, заметные невооруженным глазом.

При испытаниях материалов, применяемых в производстве изделий, на микологических площадках, расположенных в различных климатических зонах РФ, за три года было выделено 585 штаммов плесневых грибов, принадлежащих 166 видам и 52 родам из классов: фикомицетов, аскомицетов, базидиомицетов и несовершенных грибов.

Родовой состав грибов, поражающих полимерные материалы в климатических районах России, приведен в приложении к ГОСТ 9.048–75.

Микроорганизмы обладают богатым ферментативным аппаратом. Они способны в зависимости от условий синтезировать нужный фермент или использовать ферменты другого организма при отсутствии нужного собственного. Вредящая деятельность микроорганизмов в основном связана с выделением экзоферментов и продуктов метаболизма: amino- и органических кислот.

Действие микроорганизмов на материалы и изделия. Наиболее агрессивными метаболитами микроорганизмов являются органические кислоты (известно около 30 органических кислот, синтезирующих плесневыми грибами), окислительно-восстановительные и гидролитические экзоферменты. Благодаря микроскопическим размерам, гифы и споры проникают в углубления и трещины материала, вызывая изменения массы, водопоглощения и степени гидрофобности. Обрастание микроорганизмами зависит от химического состава и строения материала, микрофлоры окружающей среды, наличия загрязнений (органических и неорганических) в воздухе, климатических условий и избирательности действия сообществ организмов.

Поверхностное воздействие плесневых грибов за счет конденсирования влаги и повышения температуры приводит к коротким замыканиям между токоведущими частями плат. Органические кислоты и другие метаболиты обладают высокой проводимостью. В результате снижаются удельные объемное и поверхностное сопротивления, увеличивается tgδ, уменьшаются пределы механической прочности материалов на растяжение и изгиб. Обрастание сплавов свинца, алюминия и стали ведет к интенсивному растворению зерен металлов (исследование проводилось с применением электронного микроскопа).

Оптические изделия из стекла подвергаются разрушению плесневыми грибами из-за растворения продуктами метаболитов. На совершенно чистой поверхности стекла рост грибов не наблюдается, однако в производстве невозможно достичь высокой чистоты. Рост плесневых грибов лучше идет на нейтральных стеклах (например, кварцевом) и хуже на стеклах с щелочной реакцией. Даже умеренный рост микроорганизмов представляет серьезную проблему, так как снижает контрастность изображения, создает нежелательное рассеивание света. Споры попадают на стекла при сборке оптических приборов. Стекла поражаются *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Penicillium*, *Mucor*, *Rhizopus* и т.д.

Обработка печатных плат продуктами метаболизма в 10–12 раз снижает тангенс угла диэлектрических потерь. Действие аспергиллов и пенициллов увеличивает на несколько порядков переходное сопротивление контактов и на 20... 30 % – контактное сопротивление у кабельных изделий.

Как уже отмечалось, углеродистые стали разрушаются сульфатредуцирующими бактериями. Так же действуют на сталь и тионовые бактерии. Силикатные бактерии разлагают алюмосиликаты: слюду, калиевое стекло, превращая калий в воднорастворимые соединения.

Наибольшее влияние оказывают микроорганизмы на органические субстраты, поскольку используют их в качестве источников углерода. Это могут быть пластмассы, краски, следы смазки, остатки флюсов, растворителей, пота рук, адсорбированные органические частицы из воздуха цеха или склада. Отметим, что в воздухе производственных помещений число колоний микроорганизмов в пять раз меньше, чем при хранении на открытом воздухе, и в три раза меньше, чем на складах. Благоприятное действие оказывает аэрация воздуха производственных помещений

**Космические воздействия.** Наиболее существенными факторами, оказывающими влияние на изделия, являются:

- глубокий космический вакуум;
- корпускулярное излучение (потoki ядер геля);
- метеорные частицы;
- захламленность космоса;
- радиационные пояса земли (воздействия электромагнитных полей высокой мощности);
- перепад температур на солнечной и теневой стороне (–90; +120°) – на орбите.

Космические условия характеризуются совокупностью воздействий космической среды, к которым относятся: глубокий вакуум, невесомость, температура (чаще сверхнизкая), электромагнитные и корпускулярные излучения, наличие метеорных частиц, магнитных и гравитационных полей планет и звезд и т.д.

Воздействие факторов космического пространства на конструкционные материалы и элементы изделий происходит на фоне определяющего фактора – давления *глубокого космического вакуума*, обусловленного

сильной разреженностью среды. Глубокий вакуум характеризуется длиной свободного пробега молекул газа, соизмеримой с характеристическими линейными размерами космического аппарата или испытательной вакуумной камеры.

При изучении параметров космических условий выделяют три среды: межзвездную, межпланетную атмосферу планет и их спутников.

*Межзвездная среда* состоит из межзвездного газа и мельчайших твердых частиц – пыли, заполняющих пространство между звездами в галактиках. Газ почти равномерно перемешан с пылью.

Межзвездная среда вблизи Солнца переходит в межпланетную среду.

*Межпланетная среда* заполняет пространство между планетами Солнечной системы. Она состоит из расширяющегося вещества солнечной короны (примерно 90 % составляют ионизированные атомы водорода и около 9 % – атомы гелия), несущего увлекаемое веществом магнитное поле.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое испытание?
2. Как классифицируют внешние воздействующие факторы?
3. Какие воздействия относятся к климатическим?
4. Какие воздействия относятся к космическим?
5. Какие воздействия относят к механическим?

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Все применяемые методы испытаний классифицируются на две большие группы: физические испытания реальных изделий или макетов и испытания с использованием моделей.

**Физические испытания** могут проводиться как при внешних воздействующих факторах, создаваемых искусственным путем с помощью испытательных стендов (*стендовые испытания*) или специальных методов и средств, применяемых в лабораторных условиях (*лабораторные испытания*), так и при естественных внешних воздействующих факторов.

Лабораторные и стендовые испытания изделий отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении пока еще не представляется возможным моделировать все внешние воздействия одновременно в той случайной совокупности, которая имеет место при реальной эксплуатации. Обычно при лабораторных и стендовых испытаниях аппаратура подвергается воздействию одной или нескольких определенных нагрузок. Это приводит к результатам, несколько отличающимся от полученных при реальной эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния внешних воздействующих факторов наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями проводятся также испытания изделий в естественных условиях окружающей среды.

В зависимости от условий и места проведения испытаний при воздействии естественных внешних факторов различают полигонные и натурные испытания изделий.

*Полигонные испытания* объекта проводят на специально оборудованном полигоне. Широко распространены полигонные испытания изделий, проводимые при воздействии внешних климатических факторов. При этом испытания изделий, предназначенной для эксплуатации и хранения только в ограниченных климатических районах, проводят на полигонах, расположенных в пунктах, характеризующих, климатическое воздействие этих районов.

*Натурные испытания* объекта реализуются при выполнении трех основных условий:

- 1) испытаниям подвергается непосредственно изготовленное изделие (т.е. объект испытания) без применения моделей или составных частей аппаратуры;
- 2) испытания проводятся в условиях и при воздействиях на изделия, соответствующих условиям и воздействиям при их использовании по целевому назначению;
- 3) определяемые характеристики свойств объекта испытаний измеряются непосредственно без использования аналитических зависимостей, отражающих физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. При этом допускается применение математического аппарата статистической обработки экспериментальных данных.

К натурным испытаниям относится, в частности, опытная эксплуатация изделий.

Цель полигонных и натурных испытаний – исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров, свойств и механизмы отказов изделий при их эксплуатации и хранении. Эти испытания обеспечивают получение наиболее полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на параметры, характеризующие изделия; позволяют исследовать характер реальных физико-химических процессов, протекающих в материалах и комплектующих изделиях при воздействии естественных внешних факторов; дают возможность уточнять данные, полученные при испытании объекта под воздействием внешних факторов, создаваемых искусственным путем, а также нормы на допустимые изменения параметров (критерии годности). По результатам полигонных и натурных испытаний разрабатывают рекомендации по способам защиты изделий от внешних воздействующих факторов.

Однако специфика натурных испытаний заключается в их большой продолжительности, сложности и высокой стоимости. Эти испытания требуют четкой их организации и оптимального планирования. С целью ограничения объема испытаний программа их проведения должна базироваться на анализе результатов эксплуатации, лабораторных и стендовых испытаний, а также требований; предъявляемых к изделиям. Это позволяет проводить испытание объекта только в тех естественных условиях, в которых влияние дестабилизирующих факторов наиболее интенсивно.

К физическим испытаниям при естественных внешних воздействующих факторах следует отнести также *эксплуатационные* испытания, т.е. испытания объекта, проводимые при эксплуатации. Одним из основных видов эксплуатационных испытаний является *опытная* эксплуатация изделий. Иногда проводится *подконтрольная* эксплуатация, которая условно может быть отнесена к эксплуатационным испытаниям. При подготовке к подконтрольной эксплуатации специально предназначенный для ее проведения персонал, руководствуясь специально разработанным документацией, осуществляет сбор, учет и первичную обработку информации.

**Испытания с использованием моделей** осуществляются методами физического и математического моделирования. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний реальных изделий или их макетов.

*Физическое моделирование* заключается в том, что первичный параметр объекта испытаний (процесс в элементе схемы или какое-либо внешнее воздействие) заменяется простой физической моделью, способной имитировать изменения данного параметра. Физическое моделирование может осуществляться также следующими статистическими методами испытаний.

1. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) заключается в том, что при помощи многократных случайных испытаний (вычислений, производимых над случайными числами) определяют вероятность появления некоторого случайного события (математического ожидания случайной величины). Данный метод позволяет определить характеристики надежности, исходя из предположения, что известен механизм отказов при различных сочетаниях значений параметров изделий, выбираемых случайным образом согласно заданной статистической модели.

2. Метод статистических испытаний физическим моделированием объекта предусматривает проведение испытаний на реальных объектах или их электронных моделях. При испытаниях на реальных объектах производят исследование возможных причин возникновения отказов изделий и их последствий путем искусственного введения в схему обрывов, коротких замыканий или установки комплектующих элементов с параметрами, выходящими за допустимые нормы. Проведение испытаний на электронных моделях объекта заключается в том, что определенные комплектующие элементы схемы заменяются физическими моделями, позволяющими изменять величины характеризующих их параметров. Моделирование различных элементов осуществляют на специальных стендах, где воспроизводят случайные процессы изменения параметров комплектующих элементов.

*Математическое моделирование* базируется на использовании уравнений, связывающих входные и выходные параметры объекта испытаний. (В предыдущем методе такая связь реализуется непосредственно в физической модели.) Эти уравнения выводят на основании изучения конкретной изделий и ее внутренних функциональных связей, после чего и осуществляют математическое описание установленных связей с учетом воздействия различных факторов на изделия.

Основной недостаток метода – необходимость проведения огромного объема теоретических и экспериментальных исследований для определения соотношений, характеризующих математическую модель объекта, что требует применения ЭВМ с высоким быстродействием и большим объемом памяти, а также – знания вероятностных характеристик первичных (входных) параметров. Необходимость проведения огромного объема экспериментальных исследований, техническая сложность выполнения физических моделей целого ряда устройств (например, высокочастотных, импульсных и др.), высокая стоимость, и длительность проведения испытаний не стимулируют широкого применения методов физического и математического моделирования в практике испытаний изделий и поэтому здесь подробно не рассматриваются.

Частным видом статистических методов испытаний, применяемым на практике, являются граничные испытания изделий.

*Граничные испытания* проводятся для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимом эксплуатации. Они являются экспериментальным методом, основанным на физическом моделировании области значений первичных параметров, при которых выходные параметры изделий находятся в пределах допуска, т.е. в области безотказной работы изделий при изменениях первичных параметров. Однако определить область безотказной работы изделий при одновременном изменении многих первичных параметров не представляется возможным. Поэтому часто на практике находят граничные точки области безотказной работы изделий при изменении какого-либо одного первичного параметра изделий (параметр граничных испытаний), сохраняя значения других неизменными. В этом и состоит смысл граничных испытаний.

Для реализации метода граничных испытаний используют изменение выходного параметра изделий с помощью искусственных приемов, например меняют одно из питающих напряжений, выбранное в качестве первичного параметра граничных испытаний. Границы области, в пределах которой изделие работает безотказно, определяются при изменении напряжения до момента отказа изделий по исследуемому выходному параметру в случае, когда остальные первичные параметры изделий имеют номинальные (или заданные) значения. Затем при некотором отклонении одного из первичных параметров изделий от номинального (или заданного) значения снова наблюдают за выходным параметром изделий при изменении напряжения. Ясно, что при отклонении первичного параметра в обе стороны от номинального значения выходной параметр будет выходить за пределы допуска при различных значениях напряжения.

*Исследовательские* испытания проводятся для изучения определенных характеристик свойств объекта и их целью являются:

- определение или оценка показателей качества функционирования, испытываемого объекта в определенных условиях его применения;
- выбор наилучших режимов работы объекта или наилучших характеристик свойств объекта;
- сравнение множества вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построение математической модели функционирования объекта (оценка параметров математической модели);
- отбор существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта;
- выбор вида математической модели объекта (из заданного множества вариантов).

Примером исследовательских испытаний могут быть рассмотренные испытания моделей.

Особенностью исследовательских испытаний является факультативный характер их проведения, и они, как правило, не применяются при сдаче готовой продукции

*Определительные* испытания проводят для определения значений характеристик объекта с заданными значениями показателей точности и достоверности

*Сравнительные* испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов. На практике иногда возникает необходимость сравнить качество аналогичных по характеристикам или даже одинаковых изделий, но выпускаемые, например, различными предприятиями. Для этого испытывают сравнимые объекты в идентичных условиях.

Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов.

*Контрольные* испытания проводятся для контроля качества объекта. Испытания этого вида составляют наиболее многочисленную группу испытаний.

На этапе проектирования проводят доводочные, предварительные и приемочные испытания.

К видам испытаний готовой продукции относят квалификационные, предъявительские, приемосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные.

Так, *доводочные* испытания – это исследовательские испытания, проводимые при проектировании изделий с целью оценки влияния вносимых в нее изменений для достижения заданных значений показателей качества, а *предварительные* испытания являются контрольными испытаниями опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

*Приемочные* испытания также являются контрольными испытаниями. Это испытания опытных образцов, опытных партий продукции или изделий единичного производства, проводимые для решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции (изделий) на производство и (или) использования ее по назначению.

Приемочные испытания опытных образцов или партий изделий проводятся, как правило, для решения вопроса о целесообразности постановки аппаратуры на производство, а приемочные испытания изделий единичного производства – для решения вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию.

*Квалификационные* испытания проводятся уже на установочной серии или первой промышленной партии изделий, т.е. на стадии освоения производства изделий. Целью их является оценка готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме.

*Предъявительские* испытания изделий проводятся обязательно службой технического контроля предприятия-изготовителя перед предъявлением ее для приемки представителем заказчика, потребителем или дугами органами приемки.

*Приемосдаточные* испытания проводятся в освоенном производстве. Это контрольные испытания изготовленной продукции при приемном контроле. Приемосдаточные испытания, как правило, проводятся изготовителем продукции. Если на предприятии-изготовителе имеется представитель заказчика, приемосдаточные испытания проводятся им в присутствии представителя-изготовителя.

С целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска проводят *периодические* испытания продукции в объеме и в сроки, установленные нормативно-техническими документами (НТД).

*Инспекционные* испытания – это особый вид контрольных испытаний. Они проводятся в выборочном порядке с целью контроля стабильности качества установленных видов продукции специально уполномоченными организациями.

В тех случаях когда в производственном процессе выявляют недостатки конструкции изделий или технологического процесса ее изготовления, возникает необходимость совершенствования конструкции или технологического процесса. Целесообразность предложенных изменений выявляют с помощью типовых испытаний. *Типовые* испытания – это контрольные испытания выпускаемой продукции, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс.

Электронная аппаратура может оцениваться по категориям качества или на соответствие ее характеристик требованиям национальных и международных стандартов. Неотъемлемой процедурой такой оценки являются аттестационные или сертификационные испытания: Испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации по категориям качества, называются *аттестационными*.

*Сертификационные* испытания – это контрольные испытания продукции, проводимые с целью установления соответствия характеристик ее свойств национальным и (или) международным НТД.

В зависимости от продолжительности все испытания подразделяются на нормальные, ускоренные, сокращенные.



Под *нормальными* испытаниями изделий понимаются испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации.

В свою очередь, *ускоренные* испытания – это такие испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о качестве изделий в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. В НТД на методы испытаний конкретных видов изделий указываются значения воздействующих факторов и режимы функционирования, соответствующие нормальным условиям испытаний. Обычно нормальными считаются условия, характеризуемые температурой окружающей среды 288...308 К, атмосферным давлением  $8,4 \cdot 10^4 \dots 10,7 \cdot 10^4$  Па и относительной влажностью 48...80 %.

*Сокращенные* испытания проводятся по сокращенной программе. В зависимости от уровня значимости испытаний изделий их можно разделить на государственные, межведомственные и ведомственные. К *государственным* испытаниям относятся испытания установленных важнейших видов изделий, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые государственной комиссией или испытательной организацией, которой предоставлено право их проведения. *Межведомственные* испытания – это испытания изделий, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств, или приемочные испытания установленных видов ЭА для приемки составных ее частей, разрабатываемых совместно несколькими ведомствами. *Ведомственные* испытания проводятся комиссией из представителей заинтересованного министерства или ведомства или корпорации.

По условиям и месту проведения различают следующие виды испытаний:

- лабораторные;
- стендовые;
- полигонные;
- натурные;
- испытание с использованием модели;
- эксплуатационные испытания;
- по продолжительности:
  - нормальные;
  - ускоренные;
  - сокращенные;
- по виду воздействия выделяют:
  - механические;
  - климатические;
  - тепловые;
  - радиационные;
  - электрические;
  - электромагнитные;
  - магнитные;
  - химические;
  - биологические;
  - специальные;
- по результату воздействия различают:
  - неразрушающие;
  - разрушающие;
  - на стойкость;
  - на прочность;
  - на устойчивость;
- по определяемым характеристикам:
  - на надежность;
  - на безопасность;
  - на транспортабельность;
  - граничные испытания;
  - технологические испытания.

### Вопросы для самоконтроля

1. Как разделяют физические испытания?
2. Как разделяют испытания с использованием моделей?
3. Какие испытания называют натурными?
4. Какие испытания называют полигонными?
5. Какие испытания называют сертификационными?
6. Что такое государственные испытания?
7. Дайте общую классификацию испытаний.

### 3. СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В настоящее время в лабораторных и стендовых испытаниях применяются следующие способы их проведения: последовательный, параллельный, последовательно-параллельный и комбинированный.

При *последовательном* способе один и тот же объект испытания последовательно подвергается всем предусмотренным программой видам испытаний. Исключение составляют испытания, проводимые при воздействии большинства химических и биологических внешних воздействующих факторах. Эти испытания, как правило, проводятся на различных выборках. Последовательность испытаний предусматривает обычно первоочередное выявление наиболее грубых дефектов аппаратуры, таких как ошибки маркировки, наличие коротких замыканий и обрывов при проведении, например, приемосдаточных испытаний.

Важным условием проведения последовательных испытаний является соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Иногда при составлении программы предусматривают такую последовательность внешних воздействующих факторов на объект, согласно которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на данный объект внешние факторы. Это делается для скорейшего выявления потенциально ненадежных образцов с целью сокращения времени испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других видов факторов, которая могла быть получена при их воздействии. Поэтому чаще на практике рекомендуется начинать испытания с воздействия на ЭА наименее жестких внешних факторов, при которых воздействие будет наименьшим. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины наблюдаемых отказов и составить более полную картину о наличии в ЭА потенциальных дефектов. С другой стороны, если наиболее опасные для объекта внешние воздействующие факторы расположить в конце последовательных испытаний, то значительно увеличивается время их проведения.

Как видно, последовательность проведения испытаний ЭА играет важную роль. Установление единой последовательности проведения испытаний для различной ЭА вряд ли оправдано. Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения ЭА, места ее установки и предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому последовательность проведения испытаний для конкретной ЭА указывается в технических условиях или программе испытаний. В то же время рекомендуется, например, перед проверкой герметичности и влагоустойчивости ЭА проводить механические испытания, способные вызвать разгерметизацию аппаратуры. И вообще, все климатические испытания по этой же причине целесообразно проводить после механических испытаний ЭА.

Характерной особенностью последовательного способа проведения испытаний является наличие эффекта накопления деградационных изменений в физической структуре объекта испытаний по мере перехода от одного вида внешнего, воздействующего фактора к другому, в результате чего каждое воздействие предыдущего фактора оказывает влияние на результаты испытаний при воздействии последующего, что, в свою очередь, усложняет интерпретацию результатов испытаний и увеличивает износ ЭА.

При *параллельном* способе проведения испытаний образец подвергается одновременному воздействию различных внешних воздействующих факторов одновременно (параллельно) на нескольких выборках. Такой способ позволяет получить большой объем информации за значительно более короткий промежуток времени, чем последовательный, при минимальном износе испытываемых образцов. Однако параллельный способ требует существенно большего числа испытываемых изделий, чем последовательный.

Компромиссным между последовательным и параллельным способами проведения испытаний является *последовательно-параллельный* способ, позволяющий в каждом конкретном случае более эффективно использовать преимущества того или иного способа и находить наиболее оптимальные варианты их сочетания. При последовательно-параллельном способе все изделия, отобранные для испытаний, разбиваются на несколько групп, которые испытываются параллельно. В каждой из групп испытания проводят последовательным способом. В данном случае все виды испытаний должны быть разбиты также на группы, число которых равно числу групп испытываемых изделий. По своему составу группы испытаний формируются по видам испытаний из тех соображений, чтобы, с одной стороны, продолжительность испытаний во всех группах была примерно одинаковой, а с другой, чтобы условия проведения объединенных в одну группу видов испытаний были близки к реальным. В то же время испытания на грибоустойчивость, на длительное воздействие тепла и морского тумана, на воздействие солнечной радиации часто рекомендуется проводить на образцах, не подвергшихся другим видам механических и климатических воздействий

Однако каждый из рассмотренных способов проведения испытаний предусматривает, как правило, раздельное воздействие на объект внешних факторов, что является существенным отличием от реальных условий его эксплуатации. Поскольку при лабораторных и стендовых испытаниях практически невозможно имитировать реальные условия эксплуатации объекта, ограничиваются определенным комплексом стандартных испытаний. Простые и универсальные, они сложились на эмпирических принципах. Не имитируя реальных условий эксплуатации, они позволяют получать информацию, необходимую для уверенности в том, что вновь разрабатываемые изделия будут обладать в эксплуатации не худшими характеристиками, чем предшествующие изделия.

С целью приближения лабораторных условий испытаний объекта к реальным условиям его эксплуатации все большее распространение начинает получать комбинированный способ испытаний, при котором на объект испытания одновременно воздействуют несколько внешних факторов.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какие существуют способы проведения испытаний?
2. В чем преимущества и недостатки последовательного проведения испытаний?
3. В чем преимущества и недостатки параллельного проведения испытаний?
2. В чем особенности последовательно-параллельного проведения испытаний?

#### 4. ОРГАНИЗАЦИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Сложность и ответственность задач, решаемых с помощью современной аппаратуры, заставляют предъявлять к ее надежности весьма высокие требования. Наряду с этим наблюдается тенденция к увеличению времени  $t_p$  работы аппаратуры с определенным показателем надежности. Как правило, задаваемые вероятности безотказной работы  $P(t_p) = 0,97 \dots 0,99$  при весьма больших значениях  $t_p$ .

Для определения соответствия аппаратуры таким высоким требованиям необходимо проведение продолжительных испытаний над большими объемами выборок. При этом время испытаний может достигать такой продолжительности, что для современной аппаратуры подобные испытания становятся проблемой. При больших значениях заданного времени безотказной работы они не обеспечивают необходимой оперативности контроля надежности изделий, а при больших значениях вероятности безотказной работы не дают достаточной достоверности результатов контроля и испытания [2].

Чтобы правильно оценить реальную надежность разрабатываемой или серийно выпускаемой аппаратуры, ее необходимо экспериментально испытать в условиях воздействия тех факторов, которые наиболее сильно влияют на долговечность и сохраняемость. На проведение экспериментального исследования аппаратуры в реальных условиях требуются длительное время и существенные экономические затраты.

Перечисленные затруднения являются естественной причиной поиска таких методов, которые позволили бы сократить продолжительность испытаний и объем выборки.

Ускоренные испытания имеют цель выявить изменение параметров элементов и узлов аппаратуры при сокращении длительности испытаний и одновременной интенсификации режимов работы и условий эксплуатации аппаратуры.

Величину, показывающую во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности или срок сохраняемости при испытаниях относительно заданных значений показателей долговечности или срока сохраняемости в эксплуатации (при хранении до ввода в эксплуатацию), называют *коэффициентом ускорения испытаний*.

Таким образом, если испытания в нормальном режиме проводят в течение времени  $t_n$ , а в форсированном режиме –  $t_n$ , тогда интенсивность отказов соответственно равна  $\lambda_n$  и  $\lambda_n$  и коэффициент ускорения испытаний

$$K_y = t_n / t_n = \lambda_n / \lambda_n. \quad (4)$$

Способы организации ускорения испытаний на надежность подробно рассмотрены в литературе [1 – 3].

Ускорения испытаний аппаратуры достигают ужесточением воздействия факторов внешней среды. Повышенное воздействие на элементы и узлы аппаратуры приводит к сравнительно быстрому их изнашиванию и старению. При ускоренных испытаниях значения воздействующих на аппаратуру факторов (температура, влажность, электрические и механические нагрузки и др.) должны, как правило, превышать предельные значения, при которых еще сохраняется нормальная работа типовых функциональных узлов и аппаратуры.

Основной научной проблемой теории испытаний, в том числе ускоренных, является разработка и исследование моделей объектов и процессов их старения и изнашивания. В качестве основной модели старения и изнашивания принимают математическую модель в виде однородной или неоднородной марковской цепи.

Исходя из модели процессов износа, старения и самовосстановления аппаратуры [3] можно выделить три основных метода ускоренных испытаний.

Первый метод ускоренных испытаний, называемый форсированными испытаниями, заключается в ужесточении режимов испытаний, эквивалентном такому изменению вектора параметров эксплуатации  $X$ , при котором увеличивается скорость протекания процессов износа и в отдельных случаях – самовосстановления. Для увеличения скоростей естественного старения, а также скорости износа используют изменение параметров внешних условий  $U$  – температуры, давления, влажности и т.п.

Недостатками этого метода ускорения являются:

- возможность существенного изменения физико-химических процессов старения, изнашивания или самовосстановления;
- практическая невозможность числовой оценки корреляции между значениями параметров испытаний,

принадлежащих как  $\vec{U}$ , так и  $\vec{X}$ , и параметрами скоростей протекания процессов изнашивания, в особенности для вновь освоенных изделий или при изменении технологии производства изделий;

- невозможность количественных оценок основных надежностных характеристик испытуемых изделий – ресурса, времени наработки на отказ, масштабных коэффициентов и т.п.

В силу этих особенностей первый метод ускорения можно применять при сравнительных или контрольных испытаниях. Для проведения определительных испытаний этот метод ускорения практически непригоден.

Второй метод ускоренных испытаний предусматривает прекращение испытаний до наступления отказа. На основе методов индивидуального прогнозирования эволюционных тенденций развития процессов старения и изнашивания [2] определяется момент отказа  $\tau_{отк}$ . Сущность этого метода заключается в идентификации параметров тренда, характеризующего изменение текущего значения параметра  $\gamma(t)$  во времени, с последующим прогнозированием полученного тренда до момента времени  $\tau_{отк}$ , соответствующего выходу тренда из области

допустимых значений  $G_{\text{доп}}$ . В качестве прогнозируемых величин могут быть использованы либо параметры качества изделия, либо функции от этих параметров (ГОСТ 15467–79, ГОСТ 16035–81, ГОСТ 22732–77, ГОСТ 22851–77 и ГОСТ 23554.2–81).

Основными недостатками второго метода ускоренных испытаний являются:

- априорная неизвестность вида трендов, которая хотя и может быть устранена за счет одновременного использования нескольких видов трендов, однако требует существенного увеличения объемов вычислений;
- трудность нахождения определяющих надежность параметров;
- практическая невозможность установления определяющих параметров допустимых значений объекта, что не позволяет прогнозировать  $\tau_{\text{отк}}$ ;
- малые значения коэффициентов ускорения, которые лежат, в основном, в пределах 2...3,5.

Однако, несмотря на упомянутые недостатки, второй метод ускоренных испытаний позволяет установить не только значение  $\tau_{\text{отк}}$ , но и его доверительные интервалы [1, 2].

В силу изложенных особенностей второй метод целесообразно применять для сопредельных испытаний, а также в случае необходимости разделения изделий по качественным группам. Кроме того, использование второго метода ускоренных испытаний позволяет создать группу методов ускоренных неразрушающих испытаний.

Третий метод ускоренных испытаний заключается в совместном применении первого и второго методов. Установлены и качественные изменения при совместном применении первых двух методов. Эти изменения позволяют, в основном, избежать недостатков первого метода за счет параллельного проведения испытаний при значениях  $\vec{U}$  и  $\vec{X}$ , предусмотренных НТД.

Для третьего комбинированного метода ускоренных испытаний характерны следующие недостатки:

- невозможность проведения одновременного испытания нескольких изделий;
- сложность вычислительных процедур.

При анализе недостатков каждого метода ускоренных испытаний необходимо учитывать, что широкое применение вычислительной техники, в основном, исключает все недостатки, связанные с большим объемом вычислений. Как правило, для повышения эффективности испытаний и снижения экономических затрат следует, где возможно, увеличивать объемы вычислений, если они приводят к упрощению или сокращению сроков самих испытаний.

При разработке методов ускоренных испытаний на надежность важным является учет еще одного классификационного признака, определяющего отношение проведенных оценок или суждений к генеральной совокупности изделий. В этой связи возможно выделить следующие группы методов: оценки надежности единичного изделия, группы изделия и генеральной совокупности изделий.

Приведенная классификация методов ускоренных испытаний может быть дополнена как за счет введения дополнительных, так и за счет дальнейшей детализации приведенных классификационных признаков.

Методику ускоренных испытаний аппаратуры разрабатывают на основе НТД с учетом специфики функционирования, назначения, условий эксплуатации, конструктивных особенностей аппаратуры.

Проводить ускоренные испытания допускается только в технически обоснованных случаях в соответствии с НТД на изделие.

При организации ускоренных испытаний большое значение имеет выбор воздействующих факторов: однофакторного (температура или влажность, или др.); многофакторного (температура, биологические факторы, давление, механические воздействия и др.).

При ускоренных испытаниях необходимо, чтобы критерий распределения отказов во времени и по причинам соответствовал критерию и распределению отказов при нормальных испытаниях.

Исследовательские ускоренные испытания на долговечность и сохраняемость проводят путем экспериментального определения параметров в зависимости от срока службы аппаратуры и от значений воздействующих факторов внешней среды.

Во время подготовки к испытаниям разрабатывается программа испытаний (ПИ) в зависимости от категорий и группы изделий [ГОСТ 15150–69 (СТ СЭВ 458–77, СТ СЭВ 460–77), ГОСТ 15151–69, ГОСТ 16350–80, ГОСТ 21322–75 Е, ГОСТ 22261–76, ГОСТ 24682–81, ГОСТ 20.57.406–81].

С момента начала испытаний должны быть зафиксированы наработка аппаратуры, все отказы, повреждения, дефекты и моменты их возникновения, условия, при которых появились отказы (по форме обязательного прил. 3 ГОСТ 17676–81).

Испытательные камеры и стенды должны обеспечивать заданные режимы. Допустимые отклонения на внешние воздействующие факторы: температуры  $\pm 3$  °С; относительной влажности  $\pm 3$  %; давления  $\pm 5$  %; амплитуды вибрации  $\pm 15$  %; частоты вибрации  $\pm 2$  Гц на частотах 50 Гц;  $\pm 5$  Гц на частотах выше 50 Гц; ускорение (вибрации, удары)  $\pm 20$  %.

Испытания проводят циклически, каждый цикл состоит из совместного воздействия основных разрушающих факторов и одновременного или попеременного воздействия дополнительных испытательных факторов, имитирующих эксплуатационные факторы согласно ТУ или ПИ.

Если заранее известно, что отказ объекта вызывают только одновременно воздействующие испытательные факторы, а остальные факторы лишь выявляют их, допускается проводить нециклические испытания.

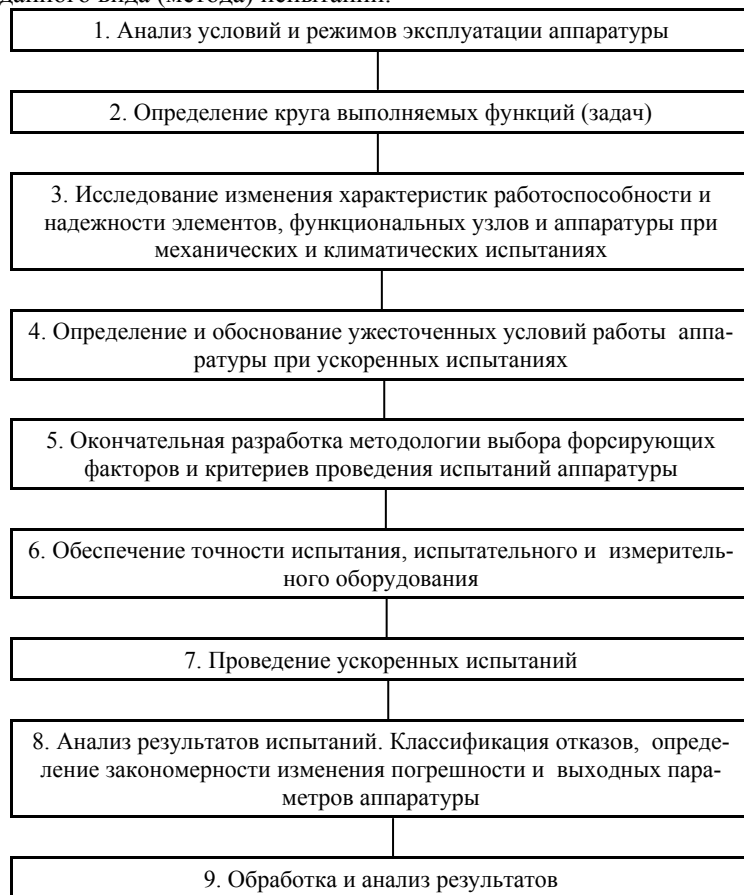
В НТД на методы испытаний должны быть указаны число образцов, виды и последовательность воздействующих факторов, а также число циклов испытаний, необходимых для определения влияния основных воздействующих факторов.

Граничные значения воздействующих факторов допускается определять с помощью косвенных критериев.

Результаты анализа и обработки данных всех испытаний, контроля и измерений, включая и данные о выявленных отказах и неисправностях, допущенных отступлениях (отклонениях) от требований НТД или ПИ на изделие и их причинах, приводятся в отчетах. В отчетных документах и прилагаемых к ним материалах отражают необходимые сведения об объекте испытаний, цели и задачи испытаний, место проведения, методику проведения испытаний, схему размещения измерительных преобразователей, сведения о средствах контроля и измерений. Вид отчетных документов с результатами испытаний должен соответствовать требованиям НТД или ПИ на конкретный вид аппаратуры: если имеются отклонения от требований НТД, то указываются причины отклонения. Объем и содержание материалов, помещаемых в отчетных документах, должны соответствовать целям и задачам испытаний.

Ускоренные испытания осуществляются, в основном, по следующим направлениям:

- минимизация времени испытания изделий при условии, что надежность аппаратуры не ниже требуемого значения; эта задача может быть решена путем оптимизации (стабилизации) режимов и условий испытаний, обеспечивающих достижение требований полноты выявления дефектов;
- определение оптимального значения параметров надежности с использованием информации о характере случайного процесса возникновения отказов из условия получения максимальной эффективности применения данного вида (метода) испытаний.



**Рис. 1. Схема последовательности организации ускоренного испытания аппаратуры на основе информационных потоков**

Постановка задачи, последовательность организации ускоренных испытаний и определение параметров воздействующих факторов иллюстрируются схемой, приведенной на рис. 1.

*На первом этапе* проводится анализ условий эксплуатации аппаратуры с определением нормируемых и количественных показателей надежности.

*На втором этапе* определяется круг функций и задач испытаний, по выполнению которых будет оценено качество функционирования изделия.

*На третьем этапе* проводятся экспериментальные исследования надежности аппаратуры, определяется значение параметров ВВФ, обеспечивающих предельную степень форсирования испытаний.

*На четвертом и пятом этапах* на основании статистических данных в зависимости от конструкции аппаратуры окончательно определяются форсирующие факторы и продолжительность испытаний, режим ускоренных испытаний на воздействие влажности и морского тумана.

*На шестом этапе* обеспечиваются точность, допустимая предельная погрешность испытываемой аппаратуры, средств контроля, измерения и испытаний.

Форсированные испытания вновь разрабатываемой и серийно выпускаемой аппаратуры организуются по следующим этапам:

- разработка методики выбора форсирующих факторов и форсирующего режима (на основании стати-

стических данных) для обеспечения максимально возможного ускорения испытаний; при этом физическая природа возникновения отказов должна оставаться неизменной;

- определение интервальных значений коэффициента ускорения при различных ВВФ и нахождение разных законов распределения времени работы аппаратуры до отказа;
- определение динамики распределения и выяснение причины отказов во время нормальных испытаний (принцип наследственности);
- определение зависимости между вероятностями безотказной работы в нормальном и форсированном режимах;
- формирование исходных данных по проведению ускоренных испытаний на надежность.

Для окончательного уточнения исходных параметров форсирующих факторов и времени воздействия этих факторов на аппаратуру с применением ЭВМ, разработки и составления алгоритма поиска необходимо учитывать параметры технологической наработки испытуемого изделия (ДО и после испытания).

Проведение технологической наработки позволяет (ГОСТ 23502–79) выявлять и устранять скрытые дефекты, допущенные в процессе проектирования, изготовления и испытания.

Формы учета отказов и дефектов аппаратуры разрабатываются в соответствии с требованиями ПИ, ГОСТ 17526–72, ГОСТ 17510–79, ГОСТ 17676–81.

Для уточнения исходных данных и составления алгоритма необходимо рассмотреть принцип "наследственности", позволяющий решать ряд задач теории надежности и ускоренных испытаний. На его основе была разработана теория инвариантности, устанавливающая не изменяющиеся от партии к партии характеристики надежности изделий. Этот принцип в теории надежности называется принципом инвариантности. Сущность принципа инвариантности состоит в том, что предполагается существование такого набора конструктивных параметров  $\omega$  изделия, начальными значениями  $\omega_0$  которого однозначно определяется эволюция изделия в любом режиме испытаний. Другими словами, если у двух изделий начальные значения  $\omega_0$  параметров  $\omega$  совпадают, то технические параметры, описывающие работоспособность этих изделий, будут изменяться во времени по одному и тому же закону. Отсюда следует, что эти изделия одинаково долго проработают безотказно в режиме  $\varepsilon$ .

Обозначим  $f(\omega_0, \varepsilon)$  – момент отказа в режиме изделия, имеющего до испытаний значения  $\omega_0$  параметров  $\omega$ . Согласно принципу инвариантности функция  $f(\omega_0, \varepsilon)$  не меняется от партии к партии, хотя производство может изменять от образца к образцу начальные значения параметров  $\omega$  и их функции распределения  $G(y) = P(\omega < y)$ . С помощью принципа инвариантности можно построить теорию форсированных испытаний, разработать методы экспериментальной проверки других принципов теории надежности [22, 23, 28].

На основании статистических данных, форсирующих факторов, точности и достоверности показателей испытаний составляется структурная схема обобщенного алгоритма определения области (критерия) работоспособности объекта, где оценки точности моделирования  $E_{т.м}$ , зависят от точности полученных результатов.

Специфика проблемы ускоренных испытаний аппаратуры заключается в необходимости одновременного решения двух органически связанных задач: сокращения продолжительности испытаний и сокращения числа испытуемых образцов.

Сократить продолжительность испытаний можно рационально, используя законы математической статистики и общую теорию планирования эксперимента с применением ЭВМ.

Математическая основа метода должна базироваться на закономерностях процессов разрушения изделия при эксплуатации и испытаниях. Для решения второй задачи необходимо привлечение априорной информации о физическом или статическом характере процессов старения, протекающих в аппаратуре и ее элементах, и привлечение современных математических методов для оптимального использования статистических данных многофакторного эксперимента.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое ускоренные испытания?
2. Для чего нужны ускоренные испытания?
3. В чем особенность первого метода?
4. В чем особенность второго метода?
5. В чем особенность третьего метода?

### 5. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ

При решении важнейшей проблемы наших дней – применения научных методов управления производством большое значение приобретает новая развивающаяся область науки – математическая теория эксперимента.

В подготовку и проведение экспериментальных исследований кроме общеизвестных этапов постановки задачи и анализа результатов эксперимента, вводится весьма важный этап – планирование эксперимента. Необходимость этого этапа диктуется стремлением получить больше информации при меньших затратах по сравнению с возможностями обычных традиционных методов проведения эксперимента. На этапе планирования эксперимента решаются вопросы определения необходимого числа опытов и выбора матрицы планирования с расположением опытов и порядка их реализации.

Теория планирования эксперимента – это раздел математической статистики, занимающийся вопросами

оптимального управления экспериментом при неполном знании механизма изучаемых явлений. Так как испытания являются по существу одним из видов эксперимента, то правомерна попытка использования методов теории планирования эксперимента для решения некоторых задач испытаний. Эти методы основаны на экспериментальном исследовании случайных связей между некоторыми показателями качества системы и совокупностью различных факторов, характеризующих те или иные внешние или внутренние условия ее функционирования [2, 3].

В настоящее время в математической теории планирования экспериментов выделяют два основных направления: планирование экстремальных экспериментов и планирование экспериментов по выяснению механизма явлений [2, 3].

Применительно к испытаниям планирование первого вида целесообразно применять в следующих случаях: при выборе параметров аппаратуры и условий ее эксплуатации, обеспечивающих получение оптимальных в определенном смысле показателей качества функционирования аппаратуры (контрольные, сравнительные, оценочные и другие испытания); при необходимости оценить предельные (экстремальные) возможности аппаратуры при действии на нее комплекса возмущений для определения технического ресурса аппаратуры (ресурсные испытания); при необходимости выяснить условия, при которых процесс испытаний удовлетворяет некоторому критерию оптимальности.

Планирование второго вида целесообразно использовать в случаях, когда в процессе испытания необходимо установить зависимость выходных характеристик параметров испытываемого объекта от различных возмущающих факторов, т.е. функцию, описывающую связь между входными характеристиками и контролируемыми выходными характеристиками. При определенных условиях данный вид планирования может быть использован для оценки степени влияния тех или иных факторов на показатели, характеризующие эффективность процесса испытаний.

Основной целью испытаний является экспериментальная оценка поведения испытываемой аппаратуры или отдельного ее элемента в реальных условиях эксплуатации для принятия решения об их функциональной пригодности, а также контроль соответствия значений показателей аппаратуры требованиям, установленным в стандартах на изделия конкретных видов.

Планирование первого вида позволяет определить такую последовательность проведения испытательных операций, которая обеспечивает достижение этой цели с минимальными затратами. Планирование второго вида необходимо для того, чтобы изучить механизм протекания процесса в испытываемой аппаратуре при воздействии на нее различных возмущающих факторов и тем самым определить состав испытательных воздействий (многофакторные испытания), наиболее полно отражающих реальные условия эксплуатации.

На практике не всегда можно представить математическую модель, устанавливающую с необходимой точностью связи между величиной  $Y_i$ , характеризующей эксплуатационно-технические свойства испытываемой аппаратуры, и независимыми переменными  $X_i$  которые имитируют различные возмущающие, дестабилизирующие воздействия при испытаниях. Переменные или факторы (при многофакторных воздействиях) образуют  $N$ -мерное пространство.

В матрице планирования для полного факторного эксперимента типа  $2^k$  все уровни каждого фактора сочетаются со всеми уровнями остальных факторов и число всех этих сочетаний равно  $N = 2^k$ , где  $k$  – число опытов.

Применение теории планирования эксперимента требует выполнения определенных экспериментальных исследований для определения коэффициентов уровня регрессии  $b_{ij}$ .

Уравнение устанавливает связь между воздействующими факторами и контролируемой величиной (иногда его называют функцией отклика [2]). Эту задачу можно решать однофакторным методом, варьируя каждую переменную ( $x_1; x_2; \dots; x_N$ ) по очереди. Если для каждого фактора сделать  $k$  повторных опытов и если факторы варьируются только на двух уровнях, которым приписывается кодовое обозначение (+1 – верхний уровень фактора, -1 – нижний уровень фактора), тогда можно найти соотношение для определения выборочных оценок  $b_{ij}^*$  и их дисперсий  $\sigma^2 [b_{ij}^*]$  [2].

Допустим, что изучается влияние трех независимых переменных (факторов)  $x_1, x_2$  и  $x_3$ , например, температуры, влажности и напряжения. Три интересующие нас коэффициента регрессии можно оценить в процессе проведения однофакторного эксперимента. Легко видеть по матрице планирования, что все возможные комбинации для трех факторов, варьируемых на трех уровнях, будут исчерпаны, если будут поставлены восемь опытов ( $2^3$ ).

#### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего нужно оптимальное планирование испытаний?
2. Что является основной целью испытаний?
3. В чем заключается планирование первого рода?
4. Сколько опытов необходимо провести при трех воздействующих факторах?

### 6. КРАТКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

1. Механические и технические методы испытаний для исследования прочности, деформируемости, пластичности, вязкости и характера разрушений.
2. Химические и физические методы исследования химического состава и структуры материала, а так же стойкости в агрессивных средах.
3. Методы исследования тонкого строения и структуры их изменения. (Металлография и т.д.).

4. Методы неразрушающего контроля основанные на взаимодействии различных форм энергии с материей или полей с материей.

5. Физические и физико-химические методы испытаний для количественного определения механических, термических, оптических и других свойств материала или же для выявления изменения состояния.

6. Методы определения деформации и напряжения в деталях машин и изделий.

## 7. ИСПЫТАНИЕ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ

*Теплоустойчивостью* называют свойство аппаратуры сохранять работоспособность в условиях повышенной температуры окружающей среды. Нагрев аппаратуры и средств измерений может происходить под воздействием внешних и внутренних факторов, причем это воздействие бывает непрерывным (стационарным), периодическим и аperiodическим.

Непрерывному тепловому воздействию подвергается изделие, работающее в стационарных условиях (в помещении), периодическому – изделия подвижного типа (переносимая, полевая и другая специальная), аperiodическому – воздушная техника (самолетная, ракетно-космическая).

Действие внутренних факторов главным образом зависят от принципиальной схемы, компоновки элементов и конструкции аппаратуры.

Испытание на теплоустойчивость проводят в целях проверки способности изделий выдерживать изменения температуры внешней среды и сохранять свои параметры после этого воздействия при эксплуатации, транспортировании и хранении.

Существуют два основных способа испытаний на воздействия температуры:

1) изделие помещают в камеру, где с помощью программного устройства или вручную изменяется температура;

2) изделие переносят из одной камеры в другую, где заранее установлены заданные температуры среды. При первом способе испытаний, когда температура в камере изменяется по закону  $Q_k = Kt$ , температура изделия

$$\theta_x = K(t - \tau_0),$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $\tau_0$  – постоянная времени нагрева (охлаждения), определяемая по формуле

$$\tau_0 = \frac{\sum_{j=1}^m C_j V_j}{\sum_{i=1}^n \mu_i S_i},$$

где  $C_j$  – теплоемкость отдельных частей изделия;  $V_j$  – объемы отдельных частей изделия;  $\mu_i$  – коэффициенты теплоотдачи отдельных участков поверхности изделия;  $S_i$  – площади отдельных участков поверхности изделия.

При изменении температуры в камере по синусоидальному закону

$$\theta_k = \theta_{k \max} \sin \omega t$$

температура изделия будет изменяться в соответствии с выражением

$$\theta_x = \frac{\theta_{k \max}}{\sqrt{1 + (\omega \tau_0)^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi = \omega \tau_0$ ;  $\omega = 2\pi f_0$ ;  $f_0$  – частота изменения температуры.

Таким образом, амплитуда изменения температуры изделия  $\theta_x$  будет меньше, чем амплитуда изменения температуры камеры  $\theta_k$ , и, кроме того, изменения температуры будут сдвинуты на  $\Delta t = \varphi/\omega$ . Это очень существенное обстоятельство необходимо учитывать при испытании изделий, имеющих различное конструктивное оформление, разные рабочие объемы и поверхности охлаждения, особенно при испытании изделий в упаковке.

Если изделие переносят из камеры с температурой  $\theta_1$  в камеру с температурой  $\theta_2$ , изделие испытывает тепловой удар, соответствующий уравнению

$$\theta_x - \theta_1 = (\theta_2 - \theta_1) [1 - \exp(-t / \tau_0)].$$

Через время  $t = 5\tau_0$  температура изделия  $\theta_x = \theta_1$ .

В процессе нагрева или охлаждения возникают перепады температуры  $\Delta\theta_{\max} = \theta_2 - \theta_1$ , вызывающие, в свою очередь, появление в материале изделия внутренних температурных напряжений и тепловых смещений в месте соединения. Частично эти явления при достижении установившейся температуры  $\theta = \theta_2$  пропадают.

Существует три вида испытаний на теплоустойчивость.

**Испытание на теплоустойчивость при эксплуатации** проводят с целью проверки параметров и сохранности внешнего вида изделий в условиях воздействия повышенной температуры и после него при эксплуатации.



Испытания изделий проводят одним из следующих методов: в камере без электрической нагрузки; в камере под электрической нагрузкой; вне камеры под электрической нагрузкой.

Испытания на теплоустойчивость проводят в камере тепла, которая обеспечивает испытательный режим согласно ПИ с допустимыми отклонениями, указанными выше.

Испытания аппаратуры и средств измерений проводят с учетом требований ГОСТ 20.57.406–81. Изделия выдерживают в нормальных климатических условиях (температура воздуха 15...35 °С при относительной влажности 45...80 % и атмосферном давлении 84...106 кПа) в течение времени, установленного в стандартах, ТУ и ПИ на изделия. Затем изделия помещают в камеру, в которой устанавливается повышенная рабочая температура в зависимости от группы (ГОСТ 16019–78, ГОСТ 22261–76), степени жесткости (ГОСТ 16962–71, ГОСТ 20.57.406–81), климатического и химического исполнения (ГОСТ 15150–69, ГОСТ 24682–81) и условий применения (ГОСТ 12997–76).

На заключительном этапе испытаний аппаратура выключается, а температура в камере повышается до предельного значения. Затем камера открывается, и температура понижается до нормальной. После выдержки аппаратуры в нормальных условиях вновь проводят измерение необходимых параметров и внешний осмотр.

**Испытание на теплоустойчивость при транспортировании и хранении** проводят в целях проверки способности изделий выдерживать воздействие верхнего (предельного) значения температуры окружающего воздуха, если температура при транспортировании и хранении выше температуры при эксплуатации.

Изделия помещают в камеру тепла, после чего температуру в камере устанавливают равной верхнему значению температуры окружающего воздуха при транспортировании и хранении. Допускается помещать изделия в камеру, температура в которой установлена заранее. При этом влажность не нормируется. Изделия выдерживают при заданной температуре в течение времени, достаточного для прогрева аппаратуры по всему объему (устанавливается ТУ или ПИ). После этого изделия извлекают из камеры и выдерживают в нормальных климатических условиях в течение времени, указанного в ТУ или ПИ, и затем проводят их внешний осмотр и проверку.

Испытание на теплоустойчивость при транспортировании и хранении допускается совмещать с испытанием на теплоустойчивость при эксплуатации по ГОСТ 15151–69. В этом случае после испытания на теплоустойчивость при эксплуатации изделия не извлекают из камеры, а температуру в камере повышают до верхнего значения температуры окружающего воздуха при транспортировании и хранении.

Испытания под электрической нагрузкой вне камеры проводят в тех случаях, когда установлена предельно допустимая температура контролируемого участка (блока, узла, ячейки) тепловыделяющих изделий. Их испытывают вне камеры в рабочих (эквивалентных) схемах, установив предельно допустимую температуру (или ее превышение) для контролируемого участка регулировкой принудительного охлаждения.

При решении проведения испытания необходимо учитывать наличие в изделиях критических к температуре участков, которые при указанном методе могут приобретать температуру более низкую, чем во время испытаний на теплоустойчивость при эксплуатации, транспортировании.

**Испытания на воздействие изменения температуры среды** проводят в целях определения способности аппаратуры и средств измерений сохранять свой внешний вид и параметры после воздействия изменения температуры среды в пределах значений, установленных в стандартах ТУ на изделия и ПИ.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации изделий, а также их конструктивных особенностей, для испытаний согласно ГОСТ 16962–71, ГОСТ 20.57.406–81 используют один из следующих методов:

- метод двух камер (для испытания изделий, которые в условиях эксплуатации подвергаются быстрому изменению температуры);
- метод одной камеры (для испытания изделий, работающих в условиях постепенного изменения температуры);
- метод двух жидкостных ванн (для условий эксплуатации с резким изменением температуры);
- комбинированный метод.

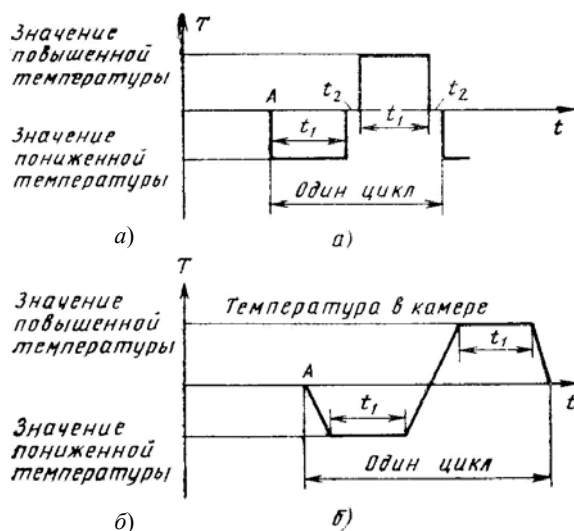
При проведении испытаний следует руководствоваться следующими положениями:

- для изделий, которые подвергаются воздействию верхнего или нижнего значения температуры один раз за время эксплуатации, диапазон температур, в котором проводят испытание на изменение температур, должен быть не меньше диапазона температур, установленного в стандартах и ПИ для транспортирования и хранения; параметры циклов проведения испытания на воздействие изменения температуры среды устанавливаются в стандартах, ТУ на изделия, ПИ; если испытания на теплоустойчивость или холодоустойчивость совмещают с испытанием на воздействие изменения температур, то температуры должны устанавливаться равными соответственно верхнему или нижнему значению температуры при эксплуатации, транспортировании и хранении; по окончании испытания аппаратуру выдерживают в нормальных климатических условиях в течение времени, установленного ТУ или ПИ, после чего проводят внешний осмотр и проверку параметров аппаратуры.

Испытание методом быстрого изменения температуры проводят в камерах тепла и холода в соответствии с графиком, показанным на рис. 2, а. Изделие подвергается воздействию трех непрерывных следующих один за другим циклов.

Испытание методом постепенного изменения температуры проводят в термокамере, где изменение температуры соответствует графику, указанному на рис. 2, б. Изделие подвергается воздействию двух непрерывных следующих один за другим циклов.

Испытание методом резкого изменения температуры проводят в двух ваннах с водой, в одной из которых вода имеет пониженную, другой – повышенную температуру, соответствующие испытательным режимам. Изделие подвергают воздействию десяти циклов, аналогичных циклу, график которого приведен на рис. 2, а.



**Рис. 2. Графики изменения температуры одного цикла:**  
 а – с переносом испытуемого изделия из одной камеры в другую;  
 б – испытание изделия в одной камере;  
 А – начало цикла;  $t_1$  – время выдержки;  $t_2$  – время переноса

Испытание комбинированным методом проводят в камерах влажности, тепла и холода в следующем порядке:

- на воздействие повышенной влажности;
- на холодоустойчивость при температуре эксплуатации;
- на теплоустойчивость в камере под электрической нагрузкой;
- на воздействие повышенной влажности.

Изделия считают выдержавшими испытание, если они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах или ТУ на аппаратуру.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под теплоустойчивостью?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на теплоустойчивость?
3. Какова процедура проведения испытаний на теплоустойчивость?
4. Как проводятся испытания на воздействие двухкамерным методом?

## 8. ИСПЫТАНИЕ НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ

*Холодоустойчивостью* называют свойство аппаратуры сохранять работоспособность при нижнем значении температуры окружающего воздуха или после пребывания в этих условиях.

*Холодопрочностью* называют способность аппаратуры сохранять работоспособность после пребывания в предельных климатических условиях транспортирования и хранения.

Существует два метода испытаний на холодоустойчивость: 1) испытание при температуре эксплуатации; 2) испытание при температуре транспортирования и хранения.

**Испытание на холодоустойчивость при эксплуатации** проводят в целях проверки параметров аппаратуры в условиях воздействия внешней среды при нижнем значении температуры (или) после пребывания ее; в этих условиях.

Испытание аппаратуры и средств измерений на холодоустойчивость и холодопрочность проводят в камерах холода следующим образом:

- в нормальных условиях применения аппаратуру включают и по истечении времени установления рабочего режима измеряют параметры, предписанные стандартами или ТУ на изделие конкретного вида;
- аппаратуру помещают в камеру холода;
- температуру в камере понижают до нижнего значения температуры рабочих условий и поддерживают ее с погрешностью не более  $+3$  °С в течение 2...4 ч в зависимости от массы изделия (см. ГОСТ 22261–76).

После этого проверяют требуемые параметры.

Испытание на холодоустойчивость при температуре транспортирования и хранения. Испытание проводят в целях проверки особенности изделий выдерживать воздействие нижнего значения температуры окружающего воздуха при транспортировании и хранении по ОСТ 15150–69. Испытание проводят, если нижнее значение тем-

пературы при транспортировании и хранении ниже, чем нижнее значение температуры при эксплуатации.

Изделие помещают в камеру холода (тепла), после чего температуру в камере устанавливают равной нижнему значению температуры при транспортировании и хранении. Допускается помещать изделия в камеру, температура в которой установлена заранее.

Испытание на холодоустойчивость при транспортировании и хранении допускается совмещать с испытанием на холодоустойчивость при эксплуатации. В этом случае после одного испытания изделие не извлекают из камеры, а температуру понижают до значения, указанного в табл. 7, ОСТ 1Б150–69.

Изделия считают выдержавшими испытание, если после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным в НТД или ПИ для данного вида изделия.

В технически обоснованных случаях допускается увеличение времени испытания, устанавливаемое в НТД на изделия конкретных групп и видов.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что понимают под холодоустойчивостью?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на холодоустойчивость?
3. Какова процедура проведения испытаний на холодоустойчивость?

### **9. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНЕЯ И РОСЫ**

Испытание этого вида проводят в целях проверки способности изделий выдерживать номинальное электрическое напряжение при конденсации на них инея и росы.

Испытания на воздействие атмосферных конденсированных осадков в лабораторных условиях проводят в камерах холода, влажности и термобарокамерах.

Перед началом и после испытания изделия при нормальных климатических условиях, если иные условия с более жесткими допусками не оговорены в НТД или ПИ, и измеряют параметры, указанные в стандартах и ТУ на изделия и ПИ, в том числе проводят проверку полным испытательным напряжением.

Порядок испытания следующий:

- изделия помещают в камеру холода и выдерживают при температуре  $-20 \pm 5$  °С в течение 2 ч;
- изделия извлекают из камеры, помещают в нормальные условия, после чего на изделия подают электрическое напряжение, причем вид напряжения, его значение, время выдержки и место приложения устанавливаются в НТД или ПИ.

Изделие считают выдержавшим испытание, если при подаче напряжения не произошло пробоя или поверхностного перекрытия.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Для чего проводят испытания на воздействие инея и росы?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие инея?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие инея и росы?

### **10. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА**

*Влагоустойчивостью* называют способность аппаратуры сохранять работоспособность в условиях повышенной относительной влажности.

Испытания на влагоустойчивость проводят для определения устойчивости параметров аппаратуры при относительно кратковременном (до 96 ч) или длительном (до 56 суток) ее пребывании; в атмосфере с повышенной относительной влажностью.

Существует три метода испытаний на влагоустойчивость: циклический (16 + 8 ч); постоянный (без конденсации влаги) и циклический (12 + + 12 ч).

Применение конкретного метода испытаний устанавливают в зависимости от особенностей конструкции, назначения, нормы для исполнения, степени жесткости, группы и категорий аппаратуры по ГОСТ 15150–69, (СТ СЭВ 458–77, СТ СЭВ 460–77), ГОСТ 16962–71, ГОСТ 16019–78, ГОСТ 17676–81, ГОСТ 20.57.406–81.

**Испытания с конденсацией влаги** являются циклическими с непрерывным следованием циклов. Каждый цикл состоит из двух частей. В первой части цикла испытаний изделия подвергают действию влажности при верхнем значении температуры, относительной влажности  $93 \pm 3$  % в течение 16 ч. Во второй части цикла испытаний камеру с изделиями охлаждают до температуры не менее чем на 5 °С ниже номинальной.

Повышение относительной влажности и температуры для проведения каждого последующего цикла должно быть достаточно быстрым, чтобы обеспечить конденсацию влаги на изделиях.

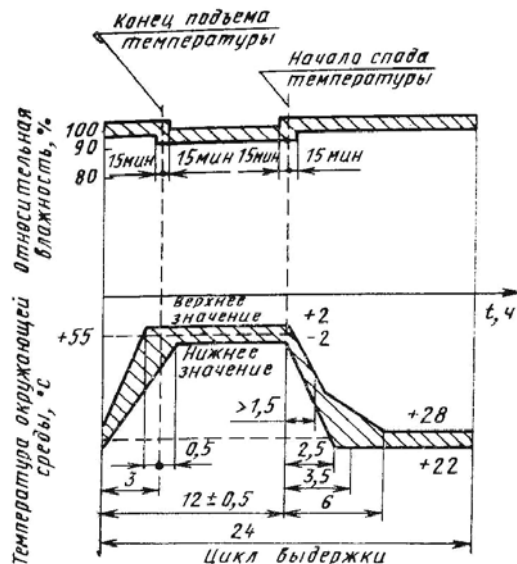


Рис. 3. Этапы каждого цикла при испытании на влагоустойчивость

Каждый цикл состоит из следующих этапов (рис. 3) [ГОСТ 20.57.406–81]:

- температуру в камере повышают до  $55 \pm 2$  °С в течение  $3 \pm 0,5$  ч. Относительная влажность в этот период должна быть не менее 95 %, за исключением последних 15 мин, в течение которых она должна быть не менее 90 %. На изделиях в этот период должна конденсироваться влага;
- в камере поддерживают температуру  $55 \pm 2$  °С до тех пор, пока не истечет  $12 \pm 0,5$  ч от начала цикла. Относительная влажность в этот период должна быть  $93 \pm 3$  %, за исключением первых и последних 15 мин, в течение которых она должна быть в пределах 90...100 %. В течение последних 15 мин на изделиях не должно быть конденсации влаги;
- температуру в камере понижают до  $25 \pm 3$  °С в течение 3...6 ч. В этот период относительная влажность должна быть не менее 95 %, за исключением первых 15 мин, в течение которых она должна быть не менее 90 %. Скорость снижения температуры в течение первых 1,5 ч должна быть такова, чтобы за  $3 \text{ ч} \pm 30$  мин температура могла снизиться до  $25 \pm 3$  °С;
- в камере поддерживают температуру  $25 \pm 3$  °С и относительную влажность не менее 95 % до конца цикла.

**Испытание без конденсации влаги** проводят следующим образом. Изделия помещают в камеру влажности и выдерживают при номинальной температуре, соответственно для длительного или ускоренного испытания, в течение времени, указанного в стандартах и ПИ, но не менее 1 ч. Относительную влажность воздуха повышают до  $97 \pm 3$  %, после чего температуру и влажность в камере поддерживают постоянными в течение всего времени испытания.

Допускается предварительно нагревать изделия до температуры, превышающей испытательную на 2...3 °С, и вносить их в камеру с заранее установленным испытательным режимом.

**Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха** (кратковременное) проводят для выявления грубых технологических дефектов в серийном производстве, если специфика производства и конструктивные особенности изделий таковы, что дефекты могут быть выявлены этим испытанием, а также дефектов, которые могут возникнуть в изделиях при других видах испытаний.

Существует два метода испытаний (ГОСТ 20.57.406–81): циклический с конденсацией влаги; постоянный без конденсации влаги.

Конкретный метод испытания и режим проведения установлены в стандартах, ТУ и ПИ.

Изделия, у которых при увлажнении под напряжением может проявляться разрушающее действие электролиза при электрохимической коррозии, рекомендуется испытывать в непрерывном режиме с приложением электрического напряжения. Вид напряжения, его значение и способ приложения установлены в стандартах и ПИ.

Изделия, у которых при увлажнении под напряжением может проявляться разрушающее действие электролиза при электрохимической коррозии, рекомендуется испытывать в непрерывном режиме с приложением электрического напряжения, вид напряжения, его значение и способ приложения установлены в стандартах и ПИ.

После испытания проводят проверку параметров.

### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие повышенной влажности воздуха?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие повышенной влажности воздуха?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие повышенной влажности воздуха?

## 11. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Испытания на воздействие пониженного и повышенного атмосферного давления проводят в целях проверки способности и устойчивости параметров и сохранности внешнего вида изделия в условиях пониженного и повышенного атмосферного давления.

**Испытание на воздействие пониженного атмосферного давления** приводят одним из следующих методов: 1) при нормальной температуре; 2) при повышенной рабочей температуре для изделий, предназначенных для работы при давлении 6,7 кПа и выше; 3) при повышенной рабочей температуре для изделий, предназначенных для работы при давлении ниже 6,7 кПа.

Первый метод применяют для испытания нетепловыделяющих изделий, а также для испытания тепловыделяющих изделий, для которых нагрев при электрической нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, не является критичным.

Второй и третий методы применяют для испытания тепловыделяющих изделий, для которых нагрев при электрической нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, является критичным.

Для обеспечения воспроизводимости результатов испытаний тепловыделяющих изделий на воздействие пониженного атмосферного давления необходимо правильно выбрать соотношения площади поверхности, окружающей изделия, и общей площади поверхности: изделия по ГОСТ 20.57.406–81.

Испытание проводят в барокамере, которая должна обеспечивать испытательный режим с отклонениями, не превышающими указанные в стандарте, ТУ или ПИ.

Способ установки и положение изделий при испытаниях, а также минимально допустимые расстояния между изделиями в барокамере устанавливают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ. Определение минимально допустимых расстояний между тепловыделяющими изделиями в барокамере проводят в соответствии с ГОСТ 20.57.406–81.

Приближенный расчет минимально допустимых расстояний между тепловыделяющими испытуемыми изделиями проведем для параллельно расположенных изделий, имеющих вид параллелепипеда.

Дано: предельно допустимая по стандартам или ПИ температура изделия  $T_1$ , °С; температура поверхности, окружающей изделия  $T_2$ , °С; максимально допустимое положительное отклонение температуры изделия, возникающее вследствие взаимного теплового влияния изделий  $\Delta T_1$ , °С; наибольшие линейные размеры  $a$ ,  $b$  взаимно облучаемых поверхностей изделия (без выводов), мм.

Предельную температуру нагрева изделия, испытуемого в составе группы изделий, определяют по формуле

$$T'_1 = T_1 + \Delta T_1.$$

Угловой коэффициент, показывающий, какая доля излучения изделия попадает на поверхности рядом расположенных изделий, определяют по формуле

$$\varphi = \frac{1}{n} \left[ 1 + \frac{\left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{\left( \frac{T'_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4} \right].$$

Значение коэффициента  $n$ , характеризующего способ расположения изделий при испытаниях, выбирают по ГОСТ 20.57.406–81.

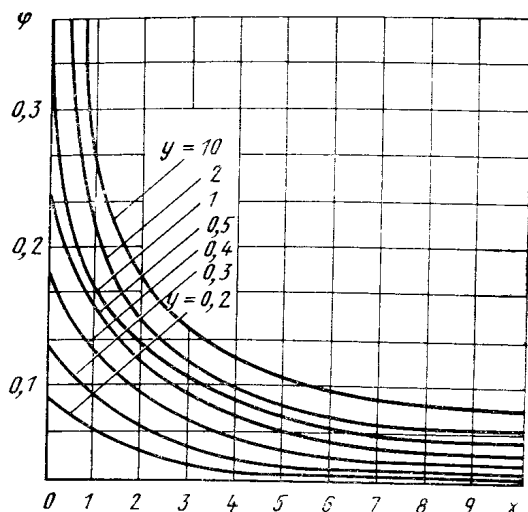
По полученному значению  $\varphi$  из графиков, приведенных на рис. 4, определяют значения  $x$ ,  $y$ , по которым рассчитывают минимально допустимое расстояние по следующим формулам:  $c = ax$ ;  $y = b/c$ .

Минимально допустимое расстояние на рис. 4 определяют следующим образом: на оси ординат находят точку, соответствующую рассчитанному по формуле значению  $\varphi$ , из которой проводят прямую, параллельную оси абсцисс; на этой прямой методом последовательных приближений отыскивают точку, положение которой удовлетворяет равенству  $xy = b/a$ ; по абсциссе полученной точки находят значение  $x$  и по формуле  $c = ax$  определяют минимально допустимое расстояние между изделиями.

Найденное минимально допустимое расстояние между изделиями необходимо выдерживать независимо от их взаимного положения в камере.

При испытании изделий, предназначенных для работы при напряжении ниже 300 В, давление воздуха в барокамеру устанавливают в зависимости от пониженного атмосферного давления и повышенной температуры по ТУ на изделия и ПИ. Затем проводят проверку параметров изделий.

Для изделий, предназначенных для работы при давлении или выше 0,67 кПа и напряжении не ниже 300 В, давление в термобарокамере плавно снижают от 1,33 кПа до значения, установленного в стандартах, ТУ на изделия и ПИ. В течение всего времени изменения давления проверяют параметры, зависящие от электрической прочности воздушных промежутков.



**Рис. 4. График расчета допустимых расстояний между тепловыделяющими изделиями внутри камеры**

При испытании изделий, предназначенных для работы при давлении не выше 0,67 кПа и напряжении не ниже 300 В, давление в барокамере устанавливают 1,33 кПа. Затем давление плавно снижают до номинального значения, при этом в течение всего времени изменения давления проверяют параметры, зависящие от электрической прочности воздушных промежутков. Перечень этих параметров устанавливают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ.

Изделие выдерживают в условиях пониженного давления воздуха и повышенной температуры в течение времени, указанного в стандартах и ПИ. По истечении времени выдержки проверяют параметры, не извлекая изделия из камеры.

**Испытание на воздействие повышенного давления воздуха** или другого газа проводят следующим образом: изделие помещают в барокамеру, давление в которой доводят до заданного значения, выдерживают при этом давление в течение времени, установленного в стандартах, ТУ или ПИ, и проводят проверку параметров изделия; давление в камере плавно снижают до нормального, после чего изделие извлекают из камеры, подвергают внешнему осмотру и проверяют параметры.

Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе испытания и после него они удовлетворяют требованиям, установленным в ТУ, стандартах и ПИ для данного вида испытаний.

При составлении требований и основных положений к проведению испытаний на воздействие атмосферного давления используют ГОСТ 24631–81 и ГОСТ 20.57.406–81.

### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие повышенного давления воздуха?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие повышенного давления воздуха?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие повышенного давления воздуха?

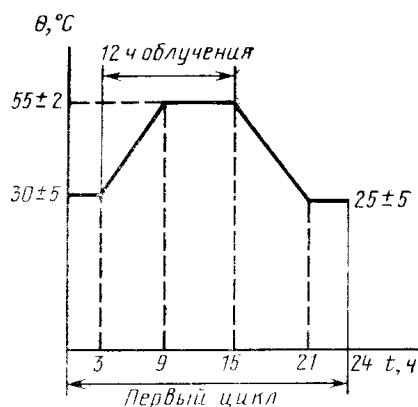
## 12. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Испытание проводят для проверки сохранности внешнего вида изделий или их отдельных деталей и узлов, а также их параметров после воздействия солнечного излучения. Облучение изделий, их узлов или деталей (кожухов, крышек, ручек, шкал и т.п.) осуществляют в камере СО-1 (0,5) солнечной радиации источниками инфракрасного и ультрафиолетового излучения.

Изделие в камере располагают так, чтобы наиболее уязвимые части его находились под воздействием источника облучения и не было взаимной экранизации. Спектр ультрафиолетового излучения должен лежать в пределах 280...400 нм. Интегральная плотность теплового потока солнечного излучения должна составлять  $1120 \text{ Вт/м}^2 \pm 10\%$ , в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра  $68 \text{ Вт/м}^2 \pm 25\%$ . Концентрация озона в камере не должна превышать нормальную (ГОСТ 15150–69).

Если основной целью испытания является проверка воздействия ультрафиолетовой части спектра, испытание проводят следующим образом. Изделия помещают в камеру, включают источники ультрафиолетового излучения, после чего температуру воздуха в камере (в тени) устанавливают  $55 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Изделия облучают в течение 120 ч непрерывно или с перерывами.

Если основной целью испытания является проверка взаимодействия ультрафиолетовой части спектра с нагревом, испытание проводят по



**Рис. 5. Режим испытания на воздействии солнечной радиации**

режиму, график которого указан на рис. 5, при этом продолжительность испытания составляет 10 циклов.

По окончании испытания изделия вынимают из камеры и проводят их внешний осмотр и измерение параметров указанных в стандартах, ТУ или ПИ. Контролю подлежат только те параметры, стабильность которых зависит от состояния конструктивных деталей или узлов из органических материалов (или имеющих органические покрытия) и подвергающихся непосредственному облучению. Изделия считаются выдержавшими испытания, если в процессе и после испытаний они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ТУ на изделия и ПИ для данного; вида испытаний.

Радиационная стойкость характеризует свойство аппаратуры, комплектующих элементов и материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия ионизирующего излучения (ГОСТ 18298–79).

### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие солнечного излучения?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие солнечного излучения?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие солнечного излучения?

### 13. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЫЛИ

Испытание проводят для проверки устойчивости изделий к разрушающему (абразивному) воздействию пыли, т.е. проверки пыленепроницаемости изделий и их работоспособности в условиях воздействия среды с повышенной концентрацией пыли (песка). По степени защищенности от проникновения пыли изделия выпускают в двух исполнениях: П1 и П2 (ГОСТ 17785–72).

Изделия должны быть работоспособны и сохранять свои метрологические характеристики при воздействии пылевой смеси с частицами размером не более 200 мкм, движущейся со скоростью 5 м/с, при следующих условиях:

- П1 – при атмосферном давлении внутри корпуса изделия;
- П2 – при разрежении внутри корпуса изделия 2000 Н/м<sup>2</sup>;
- испытания электротехнических изделий проводят по ГОСТ 14254–80 (СТ СЭВ 778–77).

Испытание изделий на воздействие пыли проводят в пыленепроницаемой камере, полезный объем которой должен превышать объем испытываемого изделия не менее чем в пять раз. В камеру, снабженную устройством для непрерывной циркуляции воздуха со скоростью 0,5...15 м/с, перед испытаниями загружают пылевую смесь объемом 0,1 % полезного объема камеры.

Существует два метода испытаний на воздействие пыли: испытание аппаратуры на воздействие статической пыли (песка); испытание на (воздействие динамической пыли (песка).

**Испытание аппаратуры при воздействии статической пыли** проводят для проверки способности изделий работать в среде с повышенной концентрацией пыли.

Изделия помещают в камеру и располагают на решетчатом столе таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному воздействию пыли в условиях эксплуатации. Способ установки изделий указывают в стандартах, ТУ на изделие или ПИ.

Температура воздуха в камере должна быть  $55 \pm 3$  °С при относительной влажности не более 50 %. Пылевая смесь должна состоять из флуоресцирующего порошка (10 %), например, люминофора ФКП-03 (сульфид цинка), проходящего через сито с сеткой № 005, кварцевого песка (60 %), мела (15 %), каолина (15 %), проходящего через сито с сеткой № 014, (ГОСТ 6613–73). Скорость циркуляции воздуха в камере до начала оседания пыли должна быть 0,5...1 м/с.

Концентрацию пыли при испытаниях определяют с помощью прибора (рис. 5), представляющего собой полый параллелепипед, изготовленный из листов органического стекла толщиной 2...4 мм.

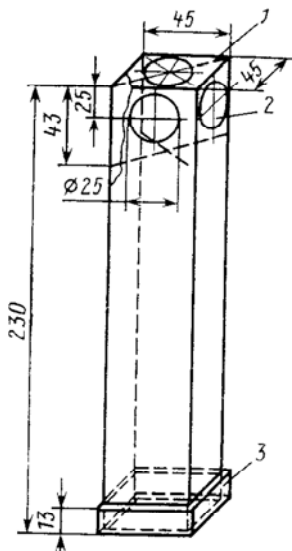


Рис. 5. Прибор для определения концентрации пыли:

- 1 – направляющие перегородки;  
2 – входные отверстия;  
3 – съемное дно

Прибор устанавливают в любом участке камеры, в которой испытывают изделия. Пыль проникает через пять круглых отверстий и собирается в приборе. После циркуляции воздуха в камере в течение 5 мин и последующего оседания пыли в течение 2 ч определяют количество пыли, собранной в приборе. По условиям испытания масса пыли должна составлять  $25 \pm 5$  г.

После испытания изделие извлекают из камеры, удаляют пыль с наружных поверхностей, вскрывают и облучают ультрафиолетовым светом, чтобы установить проникшую в изделие пыль. При этом рекомендуется пользоваться лампами ультрафиолетового излучения типа ПРК со светофильтрами марки УФС.

**Испытание на воздействие динамической пыли** проводят для проверки устойчивости изделий к разрушающему (абразивному) воздействию пыли.

Изделия помещают в камеру пыли и располагают таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможно-му воздействию пыли в условиях эксплуатации.

Изделия подвергают воздействию пылевой смеси, находящейся во взвешенном состоянии в камере в течение 4 ч. Затем в течение 2 ч происходит оседание пыли без циркуляции воздуха в камере. Пылевая смесь содержит

кварцевый песок (70 %), мел (15 %) и каолин (15 %), проходящий через сито с сеткой № 0224 по ГОСТ 6613–73. Скорость циркуляции воздуха в камере до оседания пыли должна быть 10...15 м/с.

Изделие считается выдержавшим испытание, если в процессе или после испытания его параметры удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах, ТУ и ПИ для данного вида испытаний.

Требования по работоспособности или пыленепроницаемости при статическом или динамическом воздействии пыли предъявляют к изделиям категории 1 исполнений ТС, О и В. К изделиям других категорий и исполнений эти требования предъявляют в тех случаях, когда это указывается в ТЗ или ПИ.

Методы определения защитных свойств и обработки результатов испытания на пыленепроницаемость упаковки, а также тип прибора, измеряющего концентрацию порошкообразных веществ (сульфида цинка, кадмия и серебряного активатора) в рабочем объеме камеры, устанавливает ГОСТ 24981–81 (СТ СЭВ 2810–80).

#### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие пыли?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний на воздействие пыли?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие пыли?

#### 14. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ

Испытание проводят для определения способности изделий или их отдельных узлов и сборочных единиц противостоять развитию грибковой плесени.

Сущность метода испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов заключается в выдерживании аппаратуры, зараженной спорами плесневых грибов, в условиях, оптимальных для их развития с доследующей оценкой грибоустойчивости. Необходимость проведения испытаний указывается в НТД и ПИ.

Испытания на грибоустойчивость проводят по ГОСТ 9.048–75 на образцах, которые не подвергались климатическим и механическим видам испытаний. Число испытываемых образцов устанавливают в соответствии с НТД или ПИ.

Испытание проводят следующим образом:

1. Перед испытанием поверхность образцов (изделий, деталей или узлов) тщательно протирают (промывают) спиртом-ректификатом. Для протирки используют бязь или марлю. Работу следует проводить в резиновых перчатках. Затем образцы высушивают, после чего выдерживают в нормальных климатических условиях испытаний. При этом должны быть приняты меры, исключающие возможность заражения образцов.

2. Образцы помещают в камеру грибообразования или в эксикаторы. Антисептированные образцы (в том числе и изделия, содержащие отдельные антисептированные детали) испытывают отдельно от неантисептированных. Вместе с образцами ставят контрольную чашку Петри (ГОСТ 23932–79) с питательной средой для контроля жизнеспособности спор грибов. Состав и порядок приготовления питательной среды приведены в прил. 1 и 11 ГОСТ 9.048–75, ГОСТ 16962–71.

3. Образцы, а также контрольную чашку Петри с питательной средой опрыскивают водной суспензией спор грибов из стеклянного пульверизатора с диаметром входного отверстия не менее 1 мм.

4. Испытание проводят при температуре  $29 \pm 2$  °С и относительной влажности  $95 \pm 3$  % при отсутствии циркуляции воздуха (допускается кратковременное перемешивание воздуха), образцы должны быть затемнены от действия искусственного и естественного света.

5. Через 48 ч проводят осмотр контрольных чашек Петри.

Распространение и размножение плесени осуществляется спорами, размеры которых не превышают 10 мкм. Размножение идет несколько быстро, что в течение нескольких дней небольшое грибковое образование дает несколько миллионов новых спор. О признаках созревания спор судят по специфической для каждого вида окраски плесени, приведенных ниже:

1. *Aspergillus niger* (V. liegh) – черная
2. *Aspergillus amstelodami* (Mong) – ярко-желтая
3. *Penicillium syslopiurn* (Westl) – зеленая
4. *Penicillium brevicompactum* (Dierckx) – окраска меняется от белой до розовой, лососевой и бурой: в спороносной области колонии – зеленого цвета
5. *Paecilomyces varioti* (Bain) – желтовато-бурая
6. *Stachybotryes atra* (Corda) – черная
7. *Chaetomium globosum* (Kunze) – серо-коричневая
8. *Aspergillum versicolor* (Tierab) – сине-зеленая
9. *Aspergillum flavus* (Zink) – серая
10. *Trichoderma lignorum* (Harz) – зеленая



Если на чашках не наблюдается роста грибов из числа видов, использованных для заражения, то следует провести вторичное опрыскивание изделий жизнеспособной суспензией спор грибов. Срок испытания в этом случае следует считать со времени вторичного опрыскивания. Продолжительность испытаний 30 суток.

6. После испытания образцы извлекают из камеры и подвергают визуальному осмотру. Образцы считают выдержавшими испытание, если рост плесени практически не виден невооруженным глазом (при 56-кратном увеличении может наблюдаться слабый рост мицелия и единичное спороношение).

Степень биологического обрастания испытуемых образцов оценивают по 5-балльной системе:

0 – нет роста грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении не обнаруживается роста грибов;

1 – очень слабый рост грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении наблюдаются единичные и проросшие споры;

2 – слабый рост грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении наблюдается слабый рост мицелл и единичное спороношение;

3 – умеренный рост грибов; невооруженным глазом на образцах видны очаги плесени;

4 – обильный рост грибов; невооруженным глазом видно сплошное поражение грибами поверхности образцов.

По окончании испытания образцы должны быть продезинфицированы или уничтожены.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Для чего проводят испытания на воздействие плесневых грибов?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытания?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие плесневых грибов?
4. Как оцениваются результаты испытаний?

### **15. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Цель испытания – определение способности изделий сохранять свои параметры в условиях пребывания под водой. Испытание проводят следующим образом:

1. Изделия помещают в бак, в котором создают гидростатическое давление, установленное в ТЗ или стандартах.

2. При этом давлении изделия выдерживают в течение 15 мин, после чего давление снижают до нормального. Затем давление повторно повышают до значения, соответствующего предельной глубине погружения. Изделия выдерживают при этом давлении в течение 24 ч, причем в конце проводят измерение параметров указанных в стандартах и ПИ для данного вида испытаний, после чего давление снижают до нормального и, не извлекая изделий из воды, проверяют параметры, указанные в стандартах и ПИ. После извлечения из воды изделие отбирают и проводят проверку параметров, указанных в стандартах и ПИ.

3. Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе и после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным, в НТД или ПИ.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Для чего проводят испытания на воздействие повышенного гидростатического давления?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие повышенного гидростатического давления?

### **16. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА**

Испытание проводят в целях определения коррозионной стойкости изделий в атмосфере, насыщенной водными растворами солей.

Изделия помещают в камеру, температуру в которой устанавливают равной  $27 \pm 2$  °С, и подвергают воздействию соляного тумана. Изделия располагают в камере КСТ-1М так, чтобы в процессе испытания брызги раствора из пульверизатора или аэрозольного аппарата, а также капли с потолка, стен и системы подвесов не попадали на изделия.

Если изделие эксплуатируют в защитной оболочке, оно должно испытываться в ней.

Туман образуется распылением центробежным аэрозольным аппаратом или пульверизатором соляного раствора, который готовят, растворяя в дистиллированной (деионизированной) воде хлористый натрий по ГОСТ 4233–77. Раствор распыляют в течение 15 мин через каждые 45 мин.

Туман должен обладать дисперсностью 1...10 мкм (95 % капель) и водностью 2...3 г/мм<sup>3</sup>. Методы определения дисперсности и водности соляного тумана приведены в ГОСТ 15151–69, ГОСТ 16962–71.

Водность определяют прибором Зайцева, работающим по принципу инерционного оседания капель тумана на специальную фильтровальную бумагу, пропитанную красящим веществом. При просасывании определенного объема воздуха, содержащего туман, на фильтровальной бумаге образуется пятно, по размеру которого на основании переводных градуировочных таблиц определяется содержание капельно-жидкой влаги в единице объема.

По окончании испытаний изделия промывают в дистиллированной воде, если это указано в ПИ или стандартах на изделие, после чего они должны быть просушены.

Общее время испытания составляет 2, 7 или 10 суток. Конкретное время испытания устанавливается в стандартах и ПИ на изделие.

Изделия считают выдержавшими испытания, если они по внешнему виду удовлетворяют требованиям ТЗ или стандарта на изделия для данного вида испытаний.

### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие соляного тумана?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на воздействие соляного тумана?

### 17. ИСПЫТАНИЕ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ

Испытание проводят для проверки устойчивости параметров изделий воздействию брызг, струй, дождя или к пребыванию в воде.

По степени защищенности от воздействия воды изделия выпускают в четырех исполнениях (ГОСТ 17786–72): В1, В2, В3, В4.

Изделия должны быть работоспособны и сохранять метрологические характеристики при следующих условиях:

- В1 – при воздействии дождя падающего под углом не более 60° к вертикали;
- В2 – при воздействии брызг воды, падающих в любом направлении;
- В3 – при воздействии струй воды, падающих в любом направлении;
- В4 – при полном погружении в воду.

Испытание изделий исполнения В1 проводят на испытательной установке (рис. 6). Путем подачи на изделие воды, проходящей через отверстия в качающейся трубке. Трубка с внутренним диаметром 18 мм виде полукольца имеет по всей длине на ее внутренней стороне отверстия диаметром 0,4 мм, расположенные через 50 мм. Трубка совершает колебательные движения с отклонением на угол 60° от вертикали в обоих направлениях со скоростью 1,05 рад/с (60° в 1 с). Радиус дуги трубки должен быть наименьшим в зависимости от габаритных размеров изделий (выбирается из ряда 160, 250, 400, 630 мм). Давление воды у входа в трубку 0,1 МН/м<sup>2</sup>.

Изделие устанавливают на решетчатом столе, обеспечивающем прохождение воды к изделию, вращающемуся вокруг вертикальной оси с частотой 1 об/мин. Продолжительность воздействия 10 мин. Во время испытания изделие должно поворачиваться вокруг вертикальной оси.

Интенсивность дождя измеряют в месте расположения изделий в течение не менее 30 с с помощью цилиндрического сборника диаметром от 10 до 20 см и высотой не менее половины диаметра.

Внутри камеры КД-0,4 в точках, обозначенных на рис. 7, устанавливают мерные стаканы с внутренним диаметром 200 мм и высотой 100 мм. Затем переключатель режимов устанавливают в положение "Р" и задают интенсивность дождя 3 мм/мин. Делают три замера (длительность каждого замера 5 мин). После этого задают интенсивность дождя 10 мм/мин и выполняют три замера (длительность каждого замера 5 мин). Действительную интенсивность дождя в мм/мин определяют по формуле

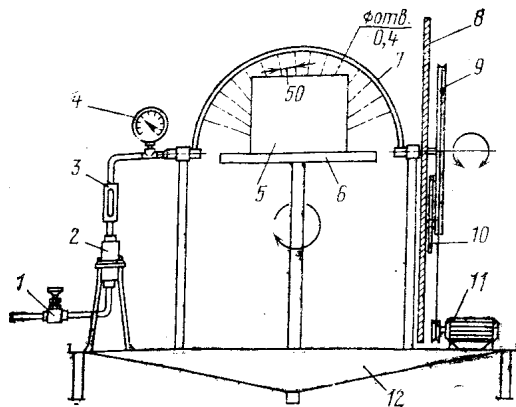
$$\gamma' = H / t,$$

где  $H$  – высота столба воды в стакане, мм;  $t$  – длительность дождя, мин.

Точность поддержания интенсивности дождя по ТУ определяют по формуле

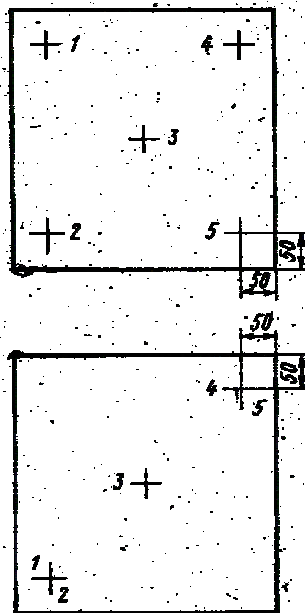
$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma',$$

где  $\gamma$  – заданная интенсивность дождя, мм/мин.



**Рис. 6. Схема установки для испытания аппаратуры:**

1 – вентиль по ГОСТ 18722–73; 2 – фильтр; 3 – ротаметр по ГОСТ 13045–81; 4 – манометр по ГОСТ 240580 (СТ СЭВ 1641–79); 5 – испытываемая аппаратура; 6 – стол; 7 – трубка по ГОСТ 617–72 или ГОСТ 18475–73; 8 – защитный щиток; 9 – шкив; 10 – щиток конечных выключателей; 11 – электродвигатель реверсивный по ГОСТ 16264–78Е; 12 – поддон для слива воды



**Рис. 7. Расположение датчиков**

Испытания изделий исполнения В2 на брызгозащищенность проводят по методике, приведенной выше для исполнения В1 при условии, что качающаяся трубка отклоняется на угол  $170^\circ$  от вертикали в обоих направлениях со скоростью  $1,48 \text{ рад/с}$ . Обрызгиванию продолжительностью 10 мин подвергают поочередно четыре основные стороны изделия. При размещении в испытательной установке необходимо учитывать эксплуатационное положение.

Зона действия брызг должна перекрывать габаритные размеры изделий не менее чем на 30 см, направление падения должно составлять угол,  $45^\circ$  с плоскостью расположения изделий.

Температура воды в начальный момент испытаний должна быть ниже температуры, изделий на  $10...15^\circ\text{C}$ .

Изделия в течение 2 ч подвергают действию брызг с интенсивностью 5 или 3 мм/мин.

Изделия, которые в условиях эксплуатации могут подвергаться непосредственному воздействию брызг, должны быть устойчивы к воздействию, верхнее значение интенсивности которого 5 мм/мин за исключением изделий, рассчитанных на напряжение свыше 1000 В в исполнениях для умеренного и холодного климата (исполнения У и ХЛ), для которых верхнее значение интенсивности брызг составляет 3 мм/мин.

Испытание изделий водозащищенного исполнения В3 проводят для проверки способности их оболочек (кожухов) не пропускать воду при накате волны. Для этого изделие обливают поочередно со всех сторон струей воды из цилиндрической насадки с расстояния 1,5 м от изделия. Давление воды перед насадкой должно быть  $0,2 \text{ МН/м}^2$ , диаметр отверстия насадки 25 мм, длина насадки 50...75 мм. Продолжительность воздействия 15 мин.

Испытание изделий исполнения В4 на водонепроницаемость проводят для проверки устойчивости параметров изделий после пребывания их в воде. Для этого изделие опускают в воду, имеющую температуру  $20 \pm 10^\circ\text{C}$ , на глубину 0,5...1,0 м. Продолжительность воздействия воды должна быть не менее 30 мин.

После испытаний внешние поверхности изделия насухо протирают вскрывают, чтобы установить отсутствие влаги внутри корпуса.

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если после испытаний внутри изделия не будет обнаружено следов воды и параметры соответствуют параметрам и требованиям, указанным в стандартах и ПИ для данного вида (В1, В2, В3, В4) исполнений.

Допускается по согласованию между изготовителем и потребителем проводить ускоренные испытания путем создания внутри изделия избыточного давления воздуха, равного  $0,05 \text{ МН/м}^2$ . При этом продолжительность воздействия воды 1 мин. Испытания считаются удовлетворительными, если во время испытаний воздух не выходит из корпуса

### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на воздействие воды?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на внешнее воздействие воды?

## 18. ИСПЫТАНИЕ НА ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ

Ветроустойчивостью называют способность аппаратуры при воздействии ветра сохранять свои характеристики в пределах норм, установленных в стандартах, ТУ или ПИ.

Согласно ГОСТ 22261–76 для 4 – 7-й групп в ТУ допускается устанавливать требования по ветроустойчивости.

Испытания средств измерений 4 – 7-й групп на ветроустойчивость проводят следующим образом:

– после измерений в нормальных условиях характеристик, установленных для испытаний данного вида в стандартах и (или), ТУ, средство измерений выключают и устанавливают в рабочем положении в аэродинамической трубе или под вентиляционной установкой, обеспечивающих воздушный лоток со скоростью не менее 30 м/с;

– изделие включают и обдувают его воздушным потоком под разными углами (через 45°) по 5...10 мин в каждом положении (в направлении наибольшей парусности продолжительность обдува должна быть 20 мин);

– при воздействии воздушного потока проверяют требуемые характеристики;

– прекращают подачу воздуха и выключают средство измерений;

– изделие второй раз обдувают воздушным потоком со скоростью не менее 50 м/с под углами через 45° по 5...10 мин в каждом положении (в направлении наибольшей парусности продолжительность обдува должна быть 20 мин);

– после пребывания в нормальных условиях применения в течение времени, установленного в стандартах или ТУ, средство измерений включают и по истечении времени установления рабочего режима проверяют требуемые характеристики.

В том случае, когда ветер является существенно воздействующим фактором на изделие, при его разработке и испытании необходимо рассматривать характеристики ветра по ГОСТ 24728–81.

Характеристики ветра распределяются по четырем широтным зонам и представительным пунктам с экстремальными сильными и слабыми ветрами в каждой широтной зоне и рассчитываются по геопотенциальным высотам (ГОСТ 4401–81).

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Для чего проводят испытания на ветроустойчивость?
2. Какое оборудование применяется для проведения испытаний?
3. Какова процедура проведения испытаний на ветроустойчивость?

## **19. ИСПЫТАНИЕ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ**

Герметичностью называют способность оболочки (корпуса), отдельных ее элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между средами, разделенными этой оболочкой.

Испытания на герметичность проводят для определения степени герметичности изделия или его частей, узлов и блоков.

Требования к степени герметичности должны быть определены при разработке конструкции. Степень герметичности должна характеризоваться потоком газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером пятна и тому подобными величинами, приведенными к рабочим условиям по ГОСТ 24054–80 и ГОСТ 20.57.406–81.

Метод испытаний на герметичность выбирают в зависимости от назначения изделия, его конструктивно-технологических особенностей, требований к степени герметичности, а также экономических характеристик испытаний.

Испытания на герметичность включают в технологический процесс изготовления изделия таким образом, чтобы предшествующие технологические операции не приводили к случайному перекрытию течей. При невозможности исключить опасность случайного перекрытия течей в технологическом процессе необходимо предусмотреть операции, обеспечивающие освобождение течей от закупорки.

Метод или программа испытаний на герметичность указаны в стандартах, ТУ или ПИ на изделия конкретного вида.

В зависимости от рода пробного вещества методы испытаний на герметичность подразделяются на две группы: газовые и жидкостные.

К газовой группе относятся следующие методы испытаний: разноактивный, манометрический, массоспектрометрический, галогенный, пузырьковый, ультразвуковой, катодометрический, химический, инфракрасный, параметрический.

К жидкостной группе относятся следующие методы: гидростатический, люминесцентный (цветной), электрический параметрический.

Реализация указанных методов возможна следующими способами: компрессионным, камерным, вакуумным, капиллярным, обдува, щупа, обмыливания, нагревания, внешней опрессовки, опрессовки замкнутых оболочек и в камере.

Классификация наиболее распространенных методов испытаний на герметичность и их общая характеристика приведены в справочном прил. 2 ГОСТ 24054–80.

Метод должен обеспечивать проведение испытаний в условиях отвечающих требованиям действующей НТД по технике безопасности и промышленной санитарии.

Испытания герметичности изделий и средств измерений проводят одним из следующих методов (ГОСТ 5197–70, ГОСТ 20.57.406–81, ГОСТ 24054–80 и Публикации МЭК 68-2–17):

- проверка по обнаружению утечки жидкости (гидростатический метод);
- проверка по обнаружению утечки газа масс-спектрометром, в том числе изделий, имеющих свободные внутренние объемы изделий, представляющих собой герметичные перегородки уплотнения (массо-спектрометрический, химический методы);
- проверка по проникновению жидкости и газа (параметрический метод);
- проверка по обнаружению утечки газа, в том числе путем обнаружения утечки воздуха или другого газа из внутренних областей изделия при погружении его в жидкость с пониженным давлением и при повышенной температуре (пузырьковый, катодометрический методы);
- проверка по обнаружению, утечки воздуха, подаваемого на изделие под давлением (манометрический метод);
- проверка путем проникновения паров влаги (влажностный метод).

Подготовка изделия к испытаниям на герметичность предусматривает устранение последствий случайного перекрытия течей после хранения, транспортирования и операций, предшествующих испытаниям.

Для испытаний на герметичность необходимо использовать оборудование укомплектованное специальными присоединительными и установочными деталями и калиброванными течами в соответствии с ТУ на изделия конкретного вида.

Испытание на герметичность изделий вакуумным способом пузырькового метода проводят следующим образом. Изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью, находящуюся внутри барокамеры, которая должна обеспечивать испытательный режим. Количество жидкости в ванне должно быть достаточным, чтобы исследуемая поверхность была погружена на глубину не менее 50 мм. Температура испытательной жидкости 15...35 °С, кинематическая вязкость 25 сСт при 20 °С. Давление в камере снижают до 0,1...1,0 кПа.

Изделие считают выдержавшим испытание, если пузырьки газа не выделяются.

Порог чувствительности (наименьший регистрируемый поток газообразного вещества или расхода жидкого вещества) при индикации потока газа определяют по формуле

$$\gamma = \frac{md_{\min}}{\sigma\tau} \left( \frac{4\sigma}{d_{\min}} + \rho gh + P_{\text{в}} \right),$$

где  $m$  – масса пузырька;  $d_{\min}$  – наименьший регистрируемый диаметр пузырька;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\tau$  – время от момента образования пузырька до его отрыва;  $\rho$  – плотность индикаторной жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота слоя индикаторной жидкости;  $P_{\text{в}}$  – давление в вакууммированном пространстве над слоем индикаторной жидкости.

Испытание на герметичность изделий камерным способом манометрического метода проводят следующим образом. Изделие (или партию изделий) помещают в камеру, заполняют ее пробным газом под давлением и выдерживают в течение определенного времени, устанавливаемого в стандартах, ТУ или ПИ. До заполнения камеры гелием допускается снижение давления до 0,1 кПа и выдерживание в течение 30 мин при этом давлении.

Изделия извлекают из камеры и выдерживают в течение 20 мин в условиях, обеспечивающих удаление гелия, адсорбированного внешними поверхностями. Затем изделия помещают в камеру, соединенную с масс-спектрометром, и измеряют скорость утечки гелия. Измеренное значение сравнивают со значением скорости утечки гелия, указанной в стандартах и ТУ или ПИ на изделие.

В этом случае порог чувствительности при индикации потока газа определяют по формуле

$$\gamma = V_{\text{к}} \Delta P_{\min} / t,$$

где  $V_{\text{к}}$  – объем камеры;  $\Delta P_{\min}$  – нижний предел измерения манометра;  $t$  – продолжительность испытания.

Изделия считают выдержавшими испытание, если скорость утечки гелия меньше или равна значению, указанному в стандартах и ТУ или ПИ на изделие.

### Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводят испытания на герметичность?
2. Какие методы применяются при проведении испытаний на герметичность?

## 20. МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

При эксплуатации изделий на него воздействует множество внешних и внутренних, факторов: климатических (температура, влага, пыль, соляной туман, атмосферное давление и др.), механических и акустических (вибрации, удары, ускорения), магнитных, электрических, биологических, изменений режимов работы, колебаний питающих напряжений и т.д. Нередко эти факторы действуют в комплексе. Поэтому прежде всего возникает вопрос, каковы должны быть условия при климатических испытаниях, а именно возможное сочетание, диапазон изменения, число воздействующих факторов, продолжительность испытаний на каждом уровне факторов и их сочетаний, объем выборки испытуемых изделий.

Уже этот, далеко не исчерпывающий, перечень условий показывает, что интуитивный выбор испытаний, как правило, дает результаты, весьма далекие от оптимальных.

При многофакторных испытаниях влияние взаимодействия факторов на изделие отличается от суммы одиночных воздействий. Определить значение такого взаимодействия можно только путем проведения соответствующих испытаний при одновременном воздействии факторов.

Постановка задачи и планирование многофакторных испытаний подробно рассматривается в литературе [2], где числовые значения показателей качества изделия определяются условиями их применения. Поэтому основным вопросом при организации климатических испытаний является определение условий, в которых должны испытываться изделия.

Необходимо отметить, что одной из задач многофакторного испытания изделий является экспериментальное определение зависимости выходных параметров (отклика) испытуемого образца от воздействия совокупности влияющих факторов. При этом необходимо с требуемой точностью определить степень влияния каждого воздействующего фактора и их корреляции. Однако взаимодействия не могут быть оценены по результатам эксперимента, так как в большинстве случаев однофакторные эксперименты требуют длительного времени для полного исследования испытуемых изделий.

Поэтому для исследования результатов испытаний изделий применяют теорию оптимального планирования многофакторного эксперимента. Исследование включает в себя построение математической модели для испытуемого объекта в воздействующей среде при многофакторном эксперименте.

Исследованием окружающих условий не заканчивается выбор варьируемых факторов. В процессе исследования предполагаемых условий испытаний нужно установить, какие механические, климатические, биологические внешние воздействующие факторы могут влиять на выходные характеристики изделий. С этой целью во многих случаях исследование целесообразно начинать с постановки многофакторных экспериментов, по результатам которых можно выделить доминирующие факторы. Кроме того, исключительно важное значение на выбор факторов оказывают технические возможности испытательных камер и стендов. Экономически целесообразно создавать установки, позволяющие имитировать все условия испытаний. При этом за основные следует брать факторы, воздействия которых являются определяющими для работоспособности изделий данного типа.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под многофакторными испытаниями?
2. Какие факторы оказывают влияние на выбор условий и оборудования для проведения многофакторных испытаний?

## 21. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

При статических испытаниях для определения характеристик прочности и пластичности образец исследуемого материала подвергают действию постоянной или медленно и плавно (квазистатически) повышающейся нагрузкой.

Наряду с простыми способами нагружения применяют также статистические испытания в условиях многоосного или комбинированного нагружения.

В зависимости от продолжительности испытания подразделяют на кратковременные и длительные.

### 21.1. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

#### 21.1.1. ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЕ–ДЕФОРМАЦИЯ

Из всех способов механических и технологических испытаний наибольшее распространение имеют испытания на растяжение. Их применяют при разработке новых материалов, при расчете их характеристик для определения размеров статически нагружаемых деталей и для контроля качества материалов. В целом эти испытания служат для исследования поведения материала при одноосном нагружении, при котором растягивающая нагрузка равномерно распределена на все поперечное сечение образца, при этом гладкий ненадрезанный образец растягивают в испытательной машине в направлении оси образца до разрыва, а зависимость между растягивающей силой и изменением длины регистрируют в виде диаграммы нагрузка – абсолютное удлинение.

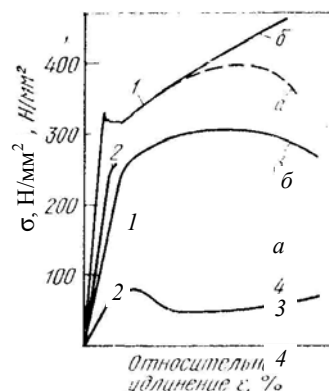
Так как и нагрузка, и абсолютное удлинение зависят от формы и размеров соответствующих образцов, количественное сравнение материалов по диаграммам нагрузка – абсолютное удлинение невозможно. Если нагрузку  $F$  отнести к исходному поперечному сечению образца  $A_0$ , а удлинение  $\Delta L$  – к начальной расчетной длине  $L_0$ , то получим диаграмму напряжение – относительное удлинение; при этом нормальное напряжение

$$\sigma = F / A_0, \text{ Н/мм}^2$$

и относительное удлинение

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 = (L - L_0) \cdot 100 / L_0. \quad (21.2)$$

На кривых напряжение – относительное удлинение (рис. 9) видно, что различаются по своим характеристикам прочности и пластичности. Прямые начальные части



с. 9. Форма напряжения – относительное удлинение

(21.1)

ное удлинение (рис. 9) видно, что различаются по своим характеристикам прочности и пластичности. Прямые начальные части

упругих деформаций, в которой при условии квазиизотропности материалов справедлив закон Гука:

$$\Sigma = \varepsilon E, \quad (21.3)$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости.

В пластичных материалах при напряжениях выше определенного значения происходит постепенный или резкий переход в область пластических деформаций. Дальнейшее повышение напряжения для металлических материалов приводит к упрочнению в результате пластической деформации, а для пластмасс – к ориентировке макромолекул, возникающей как следствие вытягивания. Конечная точка кривой напряжение – относительное удлинение соответствует разрушению образца.

При пересчете измеренных нагрузок и удлинений по формулам (21.1) и (21.2) не учитывают, что по мере растяжения поперечное сечение образца постоянно уменьшается. Так как в результате этого при больших деформациях имеются значительные отклонения от рассчитанных по (21.1) и (21.2) напряжений и удлинений, действительно существующих в образце, говорят о диаграмме условное напряжение – деформация. Если же в каждый момент испытания действующую силу  $F$  отнести к наименьшему, т.е. наиболее деформированному поперечному сечению  $A_w$ , получим истинное напряжение

$$\sigma_w = F / A_w, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.4)$$

Так же может быть получено истинное относительное удлинение  $\varphi$  через сумму всех элементарных удлинений на длине  $L$ :

$$\varphi = \int_0^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 - \Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 - \varepsilon). \quad (21.5)$$

Так как для  $\varepsilon < 0,10$   $\ln(1 - \varepsilon) \approx -\varepsilon$ , то относительное удлинение  $\varepsilon$  и истинное относительное удлинение  $\varphi$  для пластической деформации, меньшей 10 %, совпадают, зависимость между  $\sigma_w$  и  $\varepsilon$  (или  $\varphi$ ) описывается диаграммой истинное напряжение – деформация (см. рис. 9, кривая 1, б). Для большинства металлических материалов истинное напряжение связано с истинным относительным удлинением уравнением

$$a_w = a\varepsilon^n, \quad (21.6)$$

где  $a$  – постоянная;  $n$  – показатель деформационного упрочнения.

Зависимость, описанную уравнением (2.6), называют также кривой текучести.

В пластичных материалах образуется местное сужение, начало образования которого можно определить как механическую неустойчивость, при которой уменьшение поперечного сечения начинает преобладать над упрочнением материала.

Из уравнения

$$F = \sigma A_w \quad (21.7)$$

получим изменение нагрузки, необходимое для дальнейшей деформации растягиваемого образца:

$$dF = (\sigma dA_w - A_w d\sigma). \quad (21.8)$$

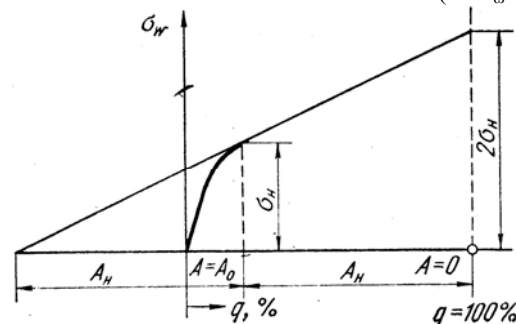


Рис. 10. Определение характерных точек на диаграмме истинных напряжений

В точке неустойчивости

$$dF = 0 \quad (21.9)$$

и отсюда

$$d\sigma/\sigma = dA_w / A_w. \quad (21.10)$$

На диаграмме истинное напряжение – изменение поперечного сечения  $q$  (рис. 10) касательная в точке неустойчивости определяется уравнением

$$\sigma - \sigma_n = \sigma_n / A_n (A_n - A_w). \quad (21.11)$$

где  $\sigma_n$  и  $A_n$  – соответственно напряжение и площадь поперечного сечения в точке неустойчивости.

Для  $A_w = 0$  (т.е. для  $q = 100\%$ )

$$\sigma = 2\sigma_n. \quad (21.12)$$

Так как касательная пересекает ось абсцисс на расстоянии  $A_n$ , начало механической неустойчивости одно-

значно определяется по диаграмме истинных напряжений.

Для сравнения различных материалов полезна также приведенная диаграмма напряжение – деформация, при построении которой все значения напряжения делят на базисное напряжение  $\sigma_0$ , а все значения относительного удлинения – на базисное относительное удлинение  $\varepsilon_0$ . Рамберг и Осгуд предложили выбрать в качестве базисного напряжения  $\sigma_0$  точку пересечения секущей, тангенс наклона которой на диаграмме напряжение – деформация (рис. 11) равен  $0,7 E$  ( $E$  – модуль упругости). Тогда базисное относительное удлинение представляет собой упругое удлинение, соответствующее этому значению напряжения  $\varepsilon_0 = E/\sigma_0$ . Если нанести безразмерные величины  $\sigma/\sigma_0$  и  $\varepsilon/\varepsilon_0$  на приведенной диаграмме напряжение – деформация, получим семейство кривых, которые характеризуются одинаковым подъемом и общей точкой пересечения.

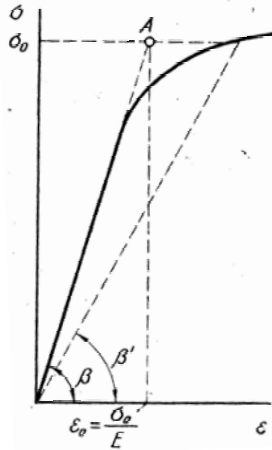


Рис. 11. Определение базисных значений для приведенной диаграммы напряжение – деформация:

$A$  – полученная точка базисного напряжения;  $\text{tg}\beta = E$ ;  $\text{tg}\beta' = 0,7E$

Из приведенной на рис. 12 диаграммы выведем широко распространенное выражение зависимости относительного удлинения от напряжения для случая испытаний на растяжение.

Разделив полуэмпирическое отношение

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \varepsilon_{\text{el}} + \varepsilon_{\text{pl}} = \sigma/E + (\sigma/B)^T \quad (21.13)$$

на  $\varepsilon_0$ , получим

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\varepsilon_0 E + 1/\varepsilon_0 (\sigma/B)^T. \quad (21.14)$$

Подставляя  $\varepsilon_0 = E/\sigma_0$ , получим

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + E/B^T \sigma^T/\sigma_0. \quad (21.15)$$

Так как пластическую деформацию в базисной точке (рис. 11)

$$\varepsilon_{\text{pl}} = (\sigma_0/B)^m \quad (21.16)$$

можно записать также

$$\varepsilon_{\text{pl}0} = \sigma_0/0,7E - \sigma_0/E = 3\sigma_0/7E, \quad (21.17)$$

то получим

$$E/B^m = 3/7 \sigma_0^{1-m} \quad (21.18)$$

и подстановкой в уравнение (21.15) выведем соотношение Рамберга – Осгуда.

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + (3/7 \sigma/\sigma_0)^m. \quad (21.19)$$

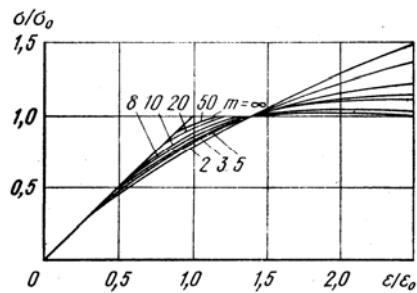


Рис. 12. Приведенные кривые напряжение – относительное удлинение для различных материалов

### 21.1.2. СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Поясним характеристики, определяемые при испытании на растяжение, на примере диаграмм условное напряжение – относительное удлинение (рис. 13).

На начальной стадии испытания наблюдается крутой подъем напряжения. Для этого участка диаграммы, соответствующего закону Гука, относительное удлинение пропорционально напряжению.

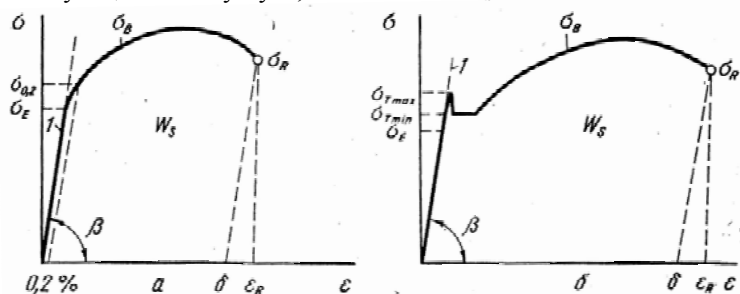


Рис. 13. Характеристики, определяемые по диаграммам условное напряжение – относительное удлинение:  $a$  – без площадки текучести;  $b$  – с четко выраженной площадкой текучести;  $l$  – прямая Гука

Введя в качестве коэффициента пропорциональности коэффициент удлинения  $\alpha$ , получим

$$\varepsilon = \alpha \sigma. \quad (21.20)$$



Величина, обратная коэффициенту удлинения  $\alpha$ , есть модуль упругости  $E$ , что определяет идентичность этой формулы закону Гука (21.3). Так как  $E = \operatorname{tg}\beta$ , то по углу наклона этой прямой можно определить модуль упругости.

Ниже представлены значения модуля  $E$  для различных материалов. Следует иметь в виду, что для полимеров закон Гука справедлив только при очень малом времени нагружения (рис. 14):

Алмаз .....	$120 \cdot 10^4$
Вольфрам .....	$35 \cdot 10^4$
Сталь .....	$20 \cdot 10^4$
Чугун с пластинчатым графитом .....	$(5 \dots 12) \cdot 10^4$
Стекло .....	$(60 \dots 75) \cdot 10^4$
Алюминиевый сплав .....	$70 \cdot 10^3$
Фарфор .....	$55 \cdot 10^3$
Бетон .....	$20 \cdot 10^3$
Эпоксидная смола с кварцевым наполнителем .....	$(120 \dots 140) 10^2$
Пенопласт (в зависимости от типа и наполнителя) .....	$(55 \dots 100) 10^2$
Аминопласт (то же) .....	$(50 \dots 100) 10^2$
Поливинилхлорид .....	$(30 \dots 35) 10^2$
Полистирол .....	$(24 \dots 30) \cdot 10^2$
ND – полиэтилен .....	$(5 \dots 11) \cdot 10^2$
НО – полиэтилен .....	$(0,8 \dots 8) \cdot 10^2$

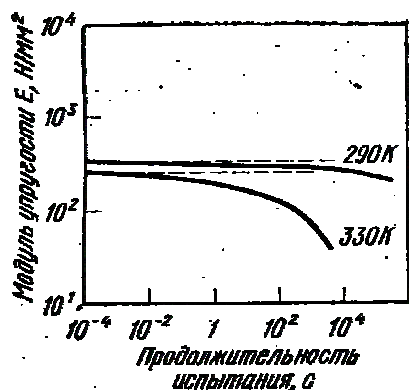


Рис. 14. Зависимость модуля упругости полиэтилена от времени

Резина .....

$< 10^2$

Отношение величины деформации в поперечном направлении  $\varepsilon_q$  к деформации в продольном направлении  $\varepsilon$  при упругом продольном растяжении образца называют коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Предел упругости  $\rho_E$  является максимальным напряжением, при котором после разгрузки образца остаточное изменение еще не возникает. Точно определить это значение практически невозможно, поэтому техническим условием пределом упругости называют напряжение, при котором появляется остаточная деформация, равная 0,01 % ( $\sigma_{0,01}$ ). Для точных измерений возможно также определение условного предела упругости при допуске остаточной деформации 0,005 % ( $\sigma_{0,005}$ ).

За пределом упругости в металлических поликристаллических материалах начинается пластическая деформация, развивающаяся вначале в отдельных кристаллитах (микропластичность). Поэтому кривые напряжение – деформация отклоняются от прямой, т.е. повышение напряжения отстает от роста деформации. Переход от микропластичности к макроскопическому течению для мягких углеродистых сталей и некоторых других материалов различают по ярко выраженному отклонению от монотонного хода кривых нагрузка – удлинение или напряжение – деформация.

Соответствующее напряжение называют пределом текучести  $\sigma_T$  и определяют его как отношение к начальному поперечному сечению образца нагрузки  $F_T$ , при которой на кривой нагрузка – удлинение обнаруживается немонотонность при одновременном появлении заметной остаточной деформации:

$$\sigma_T = F_T / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.21)$$

Если во время испытания наблюдается падение нагрузки, различают верхний  $\sigma_{T,в}$  и нижний  $\sigma_{T,н}$  пределы текучести. Верхний предел текучести является наибольшим напряжением перед первым падением растягивающей нагрузки при увеличивающемся удлинении.

Нижний предел текучести является наименьшим напряжением, при котором возникает явление текучести. При этом не следует принимать во внимание колебания вследствие инерционности аппаратуры для измерения нагрузки.

Внезапное падение нагрузки на площадке текучести объясняют особенностями кинетики движения и размножения дислокаций в этих материалах.

При достижении верхнего предела текучести происходит отрыв отдельных дислокаций от блокирующих их чужеродных атомов (например,  $B$ ,  $C$  и  $N$  в сталях). В начале пластической деформации незакрепленных – подвижных – дислокаций относительно немного, поэтому для того, чтобы образец растягивался со скоростью деформации, заданной перемещением захвата испытательной машины, они должны перемещаться с большой скоростью. Это обеспечивается интенсивным размножением дислокаций, требующим сравнительно высокого приложенного напряжения (зуб текучести).

Затем, при скачкообразном увеличении числа свободных дислокаций, они уже могут двигаться с заметно меньшей скоростью (но при этом их суммарное перемещение будет достаточным для обеспечения заданной машиной скорости деформации). Так как скорость движения дислокаций пропорциональна действующей растягивающей нагрузке, то происходит падение нагрузки до нижнего предела текучести. Последующий горизонтальный участок кривой  $\sigma - \epsilon$ , называемый площадкой текучести, характеризуется распространением полос скольжения (полос Людерса).

В полимерных материалах при удлинении  $> 0,1 \dots 0,5$  % возникает скольжение цепей молекул. Для материалов типа пластомеров в вязком состоянии после снижения нагрузки, возможно, наблюдается текучесть вследствие вытягивания макромолекул. В этом случае также говорят о пределе текучести.

Возможно определение верхнего предела текучести  $\sigma_{т.в}$  в качестве технической используемой характеристики, хотя она значительно сильнее, чем другие характеристики, определяемые при испытании на растяжение, зависит от условий эксперимента, в частности от формы образца и жесткости применяемых испытательных машин.

Для материалов без четко выраженного предела текучести определяют условный предел текучести, который соответствует остаточной деформации 0,2 % ( $\sigma_{0,2}$ ).

При превышении предела текучести напряжение повышается при одновременном увеличении деформации. Если способность к деформации образца исчерпана, наступает разрушение, которое может происходить (в зависимости от характера материала) или в области поднимающейся части кривой напряжение – деформация, или после превышения максимальной нагрузки. Самые высокие нагрузки  $F_{max}$ , определенные в обоих случаях и отнесенные к начальному поперечному сечению, называют временным сопротивлением при растяжении  $\sigma_B$

$$\sigma_B = F_{max} / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.22)$$

Если разрушение происходит в понижающейся части кривой  $\sigma - \epsilon$ , можно определить другой показатель – условное сопротивление разрыву при растяжении:

$$\sigma_R = F_R / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.23)$$

Этот показатель применяют прежде всего для полимерных материалов; для металлов он представляет интерес только при фундаментальных металлофизических исследованиях.

В качестве характеристики механических свойств качественных сталей часто при водят отношение предела текучести к временному сопротивлению  $\sigma_t / \sigma_B$  или  $\sigma_{0,2} / \sigma_B$ .

Кроме перечисленных характеристик прочности, при испытаниях на растяжение определяют также характеристики пластичности: относительное удлинение после разрыва  $\delta$  и относительное сужение после разрыва  $\delta_s$ , а также удельную работу деформации образца при испытании до разрушения  $W_s$ .

Под относительным удлинением после разрыва  $\delta$  понимают отношение приращения расчетной длины образца после разрушения к начальной расчетной длине  $L_0$ :

$$\delta = (L_B - L_0) 100 / L_0, \%, \quad (21.24)$$

где  $L_B$  – конечная расчетная длина образца после растяжения до разрыва.

Этот показатель состоит из равномерного и сосредоточенного удлинения. В то время как равномерное удлинение приводит к равномерному уменьшению поперечного сечения по всей расчетной длине, сосредоточенное удлинение, происходящее после превышения максимальной нагрузки, соответствует образованию шейки с существенно уменьшенным поперечным сечением в узко ограниченной области (рис. 15). На основе законов подобия Кика значения относительного удлинения после разрыва образцов с различным поперечным сечением сравнимы, если соотношение между расчетной длиной  $L_0$  и поперечным сечением образца  $A_0$  постоянно.

Исходя из этого установлены размеры пропорциональных образцов, применяемых для испытаний металлических материалов. Относительное удлинение после разрыва длинного пропорционального образца ( $L_0 = 10d_0$ ) обозначается  $\delta_{10}$ , а для короткого пропорционального образца ( $L_0 = 5d_0$ ) –  $\delta_5$ .

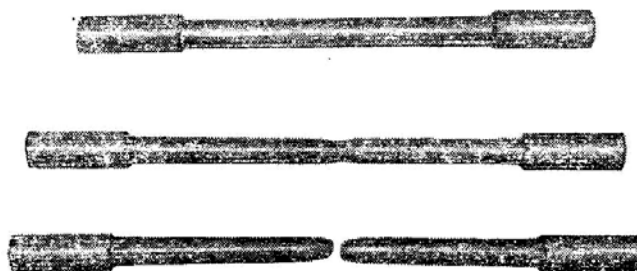


Рис. 15. Внешний вид образцов после растяжения с равномерным и сосредоточенным удлинением  
Между обоими показателями имеет место соотношение

$$\delta_5 \approx (1,2 \dots 1,5) \delta_{10}. \quad (21.25)$$

При практическом определении относительного удлинения после разрыва не различают равномерной сосредоточенной деформации, а устанавливают более остаточное увеличение длины образца.

Чтобы определить абсолютное удлинение, необходимо на концы расчетной длины нанести метки, а после окончания испытания разорванные части образца аккуратно сложить друг с другом и измерить расстояние между метками.

Правильные значения удлинения после разрыва получают только в том случае, если расстояние от места разрыва до ближайшей метки на коротких пропорциональных образцах составляет не менее 1/3, а длинных – не менее 1/5 расчетной длины.

Наиболее высокие значения удлинения получают при разрыве образцов посередине расчетной длины, так как в этом случае деформация обеих половин образца симметрична (рис. 16).

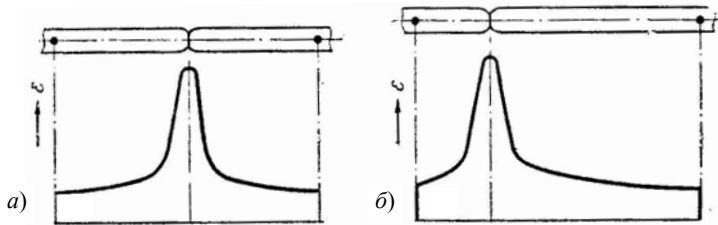


Рис. 16. Деформация образца, разорвавшегося в середине расчетной длины а) и вне ее б)

Для того чтобы определить относительное удлинение после разрыва образцов, разрушившихся вне указанных границ, применяют следующий способ.

На расчетную длину образца перед испытанием на равном расстоянии наносят  $N$  (чаще всего 10 или 20) делений (рис. 17). После испытания последнее деление на короткой части образца обозначают буквой  $A$ , а равноудаленное от места разрыва деление на длинной части образца – буквой  $B$ . Если  $n$  – число делений между  $A$  и  $B$ , то относительное удлинение после разрыва можно определить следующим образом:

а)  $(N - n)$  – четное число:

$$\delta = (AB + 2BC - L_0) 100 / L_0; \quad (21.26)$$

б)  $(N - n)$  – нечетное число:

$$\delta = (AB + BC' + BC'' - L_0) 100 / L_0. \quad (21.27)$$

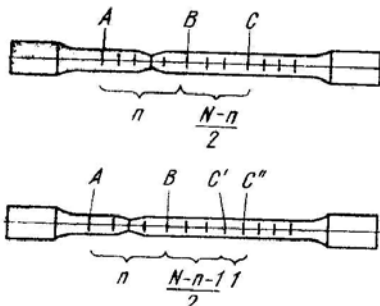


Рис. 17. Определение относительного удлинения после разрыва, происшедшего не посередине образца

Для высокополимерных материалов подобное деление расчетной длины не применяют. При проведении испытания этих материалов часто используют направленно литые образцы, в которых уже при их изготовлении происходит ориентировка макромолекул. Это приводит к тому, что разрыв происходит на конце расчетной длины в месте, обычно определяемом технологией изготовления образцов.

Далее определяют для этих материалов сосредоточенное относительное удлинение после разрыва, соответствующее условному сопротивлению разрыва:

$$\varepsilon_R = \Delta L_R \cdot 100 / L_0. \quad (21.28)$$

Для математически обоснованного описания испытаний на растяжение в настоящее время предлагают определять характеристику  $\varepsilon_R$  как деформацию разрушения также и для металлических материалов.

Во время испытаний происходит изменение поперечного сечения

$$q = (A_0 - A) \cdot 100 / A_0. \quad (21.29)$$

Относительное сужение (%) после разрыва образца

$$\psi = (A_0 - A_B) \cdot 100 / A_0, \quad (21.30)$$

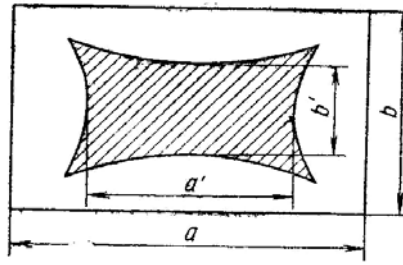
где  $A_B$  – поперечное сечение в месте разрыва.

Для круглых образцов

$$\psi = [1 - (d_B/d_0)^2] \cdot 100, \quad (21.31)$$

а для образцов прямоугольного сечения (рис. 18)

$$\psi = (1 - a'b'/ab) \cdot 100. \quad (21.32)$$



**Рис. 18. Определение поперечного сечения в месте разрыва образца прямоугольного сечения после испытания на растяжение**

По кривой напряжение – деформация можно также определить удельную работу изменения формы, совершаемую при деформации образца на испытательной машине:

$$W_s = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\delta} \delta d\varepsilon, \text{ Н}\cdot\text{мм}/\text{мм}^3. \quad (21.33)$$

Значение  $W$  определяют или путем планиметрирования площади, ограниченной кривой напряжение – деформация, или по величинам временного сопротивления при растяжении и относительного удлинения после разрыва с помощью соотношения

$$W_s = \xi \sigma_B \delta. \quad (21.34)$$

Сомножитель  $\xi < 1$  называют коэффициентом полноты. При упругом нагружении получаем

$$W_{sel} = \frac{1}{2} \varepsilon_{el} \sigma_E, \quad (21.35)$$

а при  $\varepsilon_{el} = \sigma_E / E$  соответственно

$$W_{sel} = \sigma_E^2 / 2E, \text{ Н}\cdot\text{мм}/\text{мм}^3. \quad (21.36)$$

Характеристики прочности, получаемые при испытании на растяжение, играют существенную роль при определении геометрических размеров статически нагруженных элементов несущих конструкций.

Модуль упругости определяет жесткость строительных сооружений и геометрическую устойчивость деталей машин и механизмов. Для предотвращения выхода их из строя вследствие пластической деформации или разрушения необходимо, чтобы действующие в конструкции напряжения были ниже предела текучести. Определение этой величины может также найти применение при выборе коэффициентов запаса, используемых в расчетах или эмпирических зависимостях в качестве меры уменьшения показателей предела текучести, временного сопротивления или условного сопротивления разрыву при растяжении, причем в существующей практике коэффициенты запаса прочности для разных материалов сильно различаются.

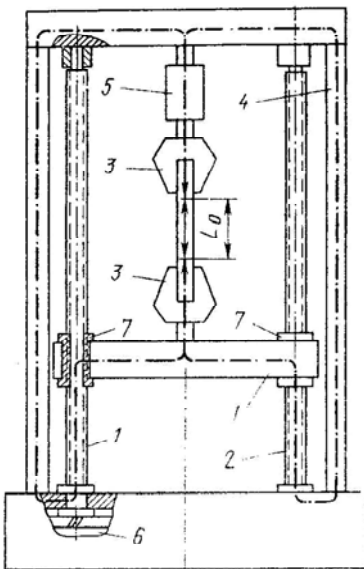
Характеристики пластичности при растяжении – относительное удлинение после разрыва, относительное сужение после разрыва и удельная работа деформации при испытании до разрушения – используют в качестве показателя определяющего в какой-то мере вероятность хрупкого разрушения, а также для оценки обрабатываемости материалов. Показатель  $W_{sel}$  имеет большое значение для определения геометрических размеров пружин.

### 21.1.3. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАШИНЫ И ПРИБОРЫ

Для проведения испытаний на растяжение образец закрепляют в захватах испытательной машины и растягивают до разрыва, измеряя нагрузку и удлинение образца. Поэтому машины, предназначенные для испытаний на растяжение, устроены так, что расстояние от одного захвата до другого можно увеличивать, причем один из них непосредственно связан с динамометром, а другой – с движущейся траверсой. Удлинение измеряют или по движению траверсы, или с помощью соответствующего измерительного прибора прямо на образце. Принципиальное устройство подобных управляющих деформацией образца испытательных машин представлено на рис. 19. Нагрузки, создаваемые приводом, передаются через траверсу на образец. Движение осуществляется по отношению к станине, воспринимающей действующие нагрузки. В возникающую при этом силовую цепь включен электронный силоизмеритель.

Для измерения удлинения служит индуктивный или емкостный датчик, который устанавливают непосредственно на испытываемом образце.

Запись диаграммы нагрузка – удлинение производят с помощью двухкоординатного самописца. Для создания нагрузки применяют системы с механическим или гидравлическим приводом. Обычно испытательные машины с максимальной нагрузкой менее  $10^5$  Н имеют механи-



**Рис. 19. Устройство испытательной машины на растяжение:**

- 1 – траверса; 2 – шпindelь; 3 – захваты;
- 4 – станина; 5 – силоизмерительное устройство; 6 – приводной механизм шпинделя; 7 – вращающаяся гайка для передвижения траверсы;  $L_0$  – расчетная длина растягиваемого образца

ческий привод, а с максимальной нагрузкой более  $10^5$  Н – гидравлический. В случае механического привода (см. рис. 19) движение траверсы  $l$  осуществляется от двух шпинделей, которые приводятся во вращение с помощью червячного колеса и червяка, или зубчатой передачи.

Перемещение траверсы обеспечивается вращающимися гайками 7, установленными в движущейся траверсе.

Между электромотором и шпиндельным механизмом встроена коробка передач, с помощью которой регулируют скорость перемещения траверсы и соответственно движущегося захвата.

Гидравлическое приводное устройство состоит из цилиндра, поршня и реверсивного вентиля. Для создания давления в цилиндре применяют регулируемый насос, работающий от электромотора. Путем соответствующей настройки этого насоса регулируют его производительность и отсюда скорость подачи поршня, который также связан с движущейся траверсой. Этот принцип устройства испытательной машины представлен на рис. 19.

Следует заметить, что в описанных выше управляющих деформацией испытательных машинах приблизительно равномерную скорость перемещения захвата и соответственно постоянную скорость деформирования образца можно получить только при использовании механического привода. В гидравлических машинах этого невозможно достичь без дополнительного регулятора.

Так как соотношения между напряжением и деформацией зависят от скорости, для гарантии воспроизводимости получаемых характеристик испытание на растяжение следует производить с постоянной скоростью.

Для упругой области достаточно поддерживать определенную скорость увеличения напряжения. При определении показателей  $\sigma_e$  и  $\sigma_T$ , для стали нельзя, например, превышать  $10$  Н/мм<sup>2</sup>·с, что для области, в которой справедлив закон Гука, соответствует скорости деформации  $0,005$  %/с. В пластической области скорость деформации зависит от испытываемого материала и условий испытания, которые определяются конструктивными особенностями привода, захватов, силоизмерителя, а также части образца за пределами расчетной длины. Так как при движении траверсы на расстояние  $S_T$  под действием нагрузки удлиняется не только образец  $S_T$ , но упруго деформируются пропорционально нагрузке все части машины  $S_M$ , то

$$S_T = S_p + S_M. \quad (21.37)$$

Такое же выражение можно записать для скоростей

$$V_T = V_p + V_M. \quad (21.38)$$

Расстояния или деформации относятся как скорости, поэтому для скорости деформации образца получим

$$V_p = S_p V_T / S_T \quad (21.39)$$

или

$$V_p = S_p V_T / (S_p + S_M). \quad (21.40)$$

При условии линейной зависимости между нагрузкой и деформацией вместо величин деформации можно ввести также податливость  $N$  (величину, обратную коэффициенту жесткости):

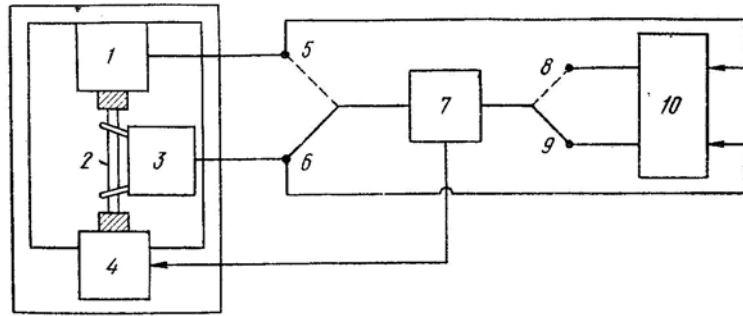
$$V_p = N_p V_T / (N_p + N_M). \quad (21.41)$$

Из уравнения (21.41), зная податливость машины и применяемые размеры образца, вычисляют необходимую скорость увеличения напряжения, чтобы получить в зоне текучести определенную скорость деформации.

В этом случае необходимо определить податливость испытательной машины для обычно используемой формы образцов, захватов и области применяемых нагрузок, а также дополнительно проверить зазоры.

При испытании стали податливость образца почти всегда отличается от податливости испытательной машины. Только при этом условии возможны точные исследования в области текучести. Фиксация появления площадки текучести, не зависящая от испытательной машины, возможна только в том случае, если последняя обнаруживает незначительную податливость (жесткие испытательные машины). Подобное требование может быть обеспечено конструктивно при создании машин с очень жесткой станиной, а также путем предварительного нагружения упругих элементов, встроженных в цепь с образцом. Жесткость мягких испытательных машин с большой податливостью можно увеличить ввинчиванием образца в цилиндр из материала с высоким пределом упругости и нагружать образец вместе с ним.

При соблюдении постоянной скорости деформации и непрерывном переходе от упругой к пластической области необходимо измерять деформацию электронным измерителем удлинения, установленным непосредственно на образце, и преобразовывать полученный сигнал в электрический для сравнения с заданным значением. Если значения не совпадают, скорость привода с помощью регулирующей системы испытательной машины изменяется, пока сигнал ошибки не станет равным нулю (скорость деформации снова соответствует заданному значению). Испытательные машины этого вида называют машинами с замкнутым контуром регулирования (рис. 20).



**Рис. 20. Испытательные машины с замкнутым контуром регулирования:**

- 1 – устройство для измерения силы; 2 – испытуемый образец;  
 3 – устройство для измерения длины; 4 – привод; 5 – фактическая величина  $\sigma$ ;  
 6 – фактическая величина  $\epsilon$ ; 7 – сравнение; 8 – заданная величина  $\sigma$ ;  
 9 – заданная величина  $\epsilon$ ; 10 – счетчик заданных величин  $\sigma$  и  $\epsilon$

#### 21.1.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ

Для определения условных пределов упругости и текучести  $\sigma_{0,2}$  необходимы точные измерения деформации. Классическим измерительным прибором является зеркальный прибор Мартенса.

Если величина предела упругости примерно известна, измерительный прибор устанавливают на образец и начальный отсчет берут при нагрузке, составляющей  $\sim 90\%$  от нагрузки, которая соответствует ожидаемому пределу упругости. После повышения нагрузки ее поддерживают постоянной в течение 10 с, пока не стабилизируются показания измерителя деформации. Затем образец разгружают и измеряют остаточную деформацию.

Подобный процесс повторяют, повышая каждый раз напряжение от 100 до 200 Н/мм<sup>2</sup> до получения требуемой остаточной деформации.

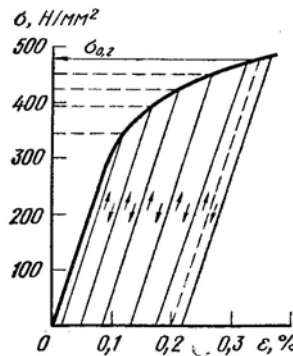
Если величина предела упругости неизвестна, начало ступенчатого нагружения нужно установить следующим образом. Поскольку в упругой области одинаковым значениям прироста нагрузки всегда соответствует постоянное приращение общей деформации, превышение этого значения приращения свидетельствует о достижении области микропластичности. После достижения этой области начинают последовательно нагружать и разгружать образец.

Таким же образом, т.е. путем последовательного нагружения и разгрузки, определяют условный предел текучести (рис. 21). Применяемые при этом измерительные приборы должны обеспечить определение приращения, составляющего 0,05 % от измеряемой длины, но не меньше 0,01 мм.

Для этого применяют механические тензометры со стрелочными индикаторами.

Для проведения описанных испытаний с многократным разгрузением требуется много времени, поэтому на результаты измерений могут влиять процессы, протекающие в материалах (такие, как, например, старение или ползучесть).

В связи с этим для определения упругости целесообразно использовать электронный измеритель деформации условные пределы упругости и текучести заданной величине деформации на их определения проводят линию, заданной величине допуска пластической этой прямой с записанной при испытании расчета – напряжение, соответствующее текучести. Для их определения по кривой однократном нагружении, без промежу- оборудовать применяемые испытательные измерителями нагрузки и удлинения.



**Рис. 21. Определение предела текучести  $\sigma_{0,2}$  путем последовательного нагружения и разгрузки**

ловных пределов упругости и новые методы. С помощью (рис. 22) можно определить как напряжения, соответствующие записанной кривой (рис. 23). Для параллельную прямой Гука при деформации. Точка пересечения кривой дает нагрузку, а после условному пределу упругости или нагрузка – удлинение при точных разгрузок, необходимо машины регистрирующими

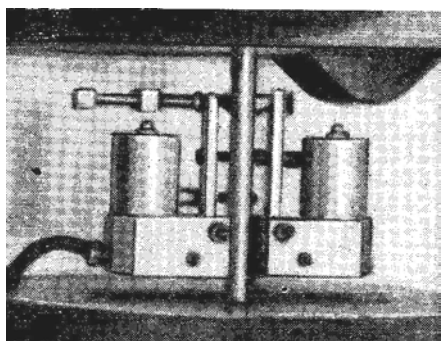


Рис. 22. Индуктивный прибор для измерения деформации (инженеры Холле, Магдебург)

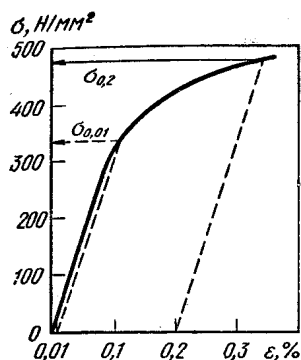


Рис. 23. Определение условных пределов упругости и текучести  $\sigma_{0,1}$  и  $\sigma_{0,2}$  по диаграмме напряжение – деформация при однократном нагружении

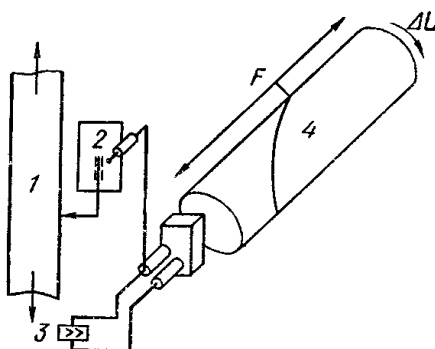


Рис. 24. Схема регистрации нагрузки и деформации:  
1 – растягиваемый образец; 2 – датчик деформации; 3 – усилитель;  
4 – регистрирующий барабан;  $F$  – регистрация нагрузки;  $\Delta L$  – регистрация удлинения

Более старые машины, не имеющие электронных измерителей нагрузки и деформации, можно дооборудовать регистрирующими приборами для измерения нагрузки и удлинения (рис. 24).

#### 21.1.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И ИХ ФОРМА

Под образцом понимают часть заготовки, которая в необработанном или определенным образом обработанном состоянии подвергается испытанию.

Заготовкой называют часть полуфабриката или готового изделия, предназначенного для отбора образца с целью проведения испытания. При изготовлении образца из заготовки следует обращать внимание на то, чтобы не изменить свойства материала. Поэтому рекомендуется для обработки применять специальный режущий инструмент. Иногда для вырезки металлического образца можно применять кислородную резку или ножницы для резки листового материала, если предусмотрен припуск на последующую механическую обработку не менее 20 мм, чтобы удалить слои металла с измененными в результате такой резки свойствами.

Если поверхность образца шлифуют, следует обратить внимание на хорошее охлаждение, так как при шлифовке возможен местный нагрев, который может повлиять на свойства исследуемого материала.

При отборе заготовок для образцов от поковок последние изготавливают с утолщением в заранее оговоренных местах, и образцы вырезают из этих мест. Место отбора образца должно быть по возможности так расположено на поковке, чтобы оно охватывало место, наиболее нагружаемое в последующей эксплуатации. В литье образец изготавливают из заготовки, поперечное сечение которой должно соответствовать среднему сечению литых деталей из этого материала.

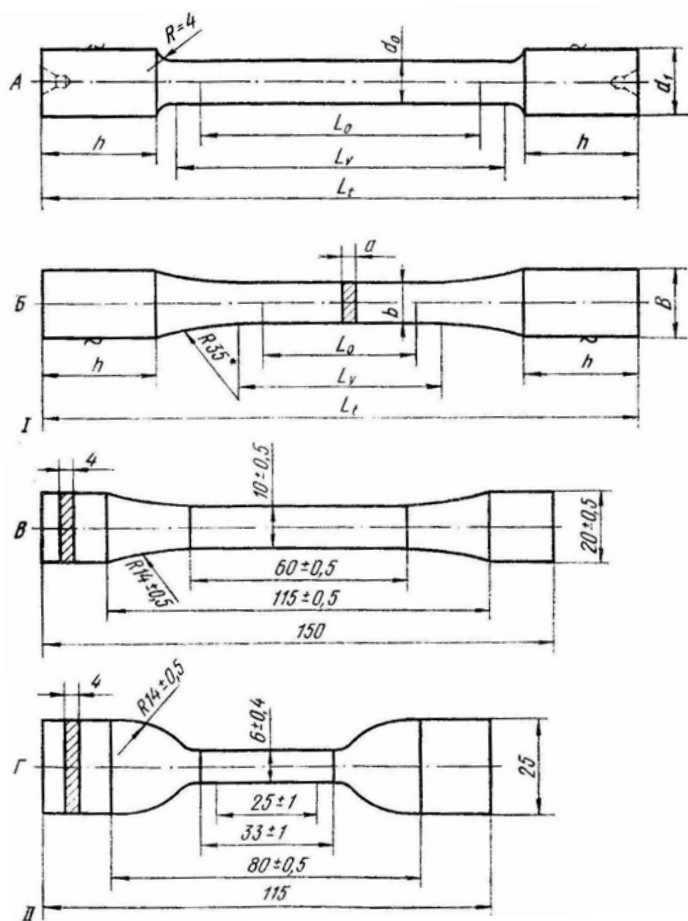
При проведении испытаний на растяжение следует учитывать, как был вырезан образец – из изделия или заготовки. Во избежание путаницы образцы на торцевой поверхности следует клеймить.

Образцы полимерных материалов изготавливают или выборкой из больших фасонных деталей, или непосредственным формообразованием при помощи прессования, литья под давлением и экструзии. При определении механических свойств следует учитывать возможную анизотропию.

Для испытаний на растяжение используют различные типы образцов (рис. 25). Образцы с гладкими головками (например, образец А) закрепляют в прижимных губках захватов испытательной машины. Для точных измерений деформации малыми допусками целесообразно применять образцы с резьбовыми головками или с заплечиками, чтобы гарантировать тугую посадку в захватах.

Для испытаний листов толщиной менее 5 мм применяют плоские образцы (образец Б). Мелкие профили, трубы, штанги, фасонный и полосовой прокат можно испытывать необработанными. На концах тонких труб устанавливают заглушки.

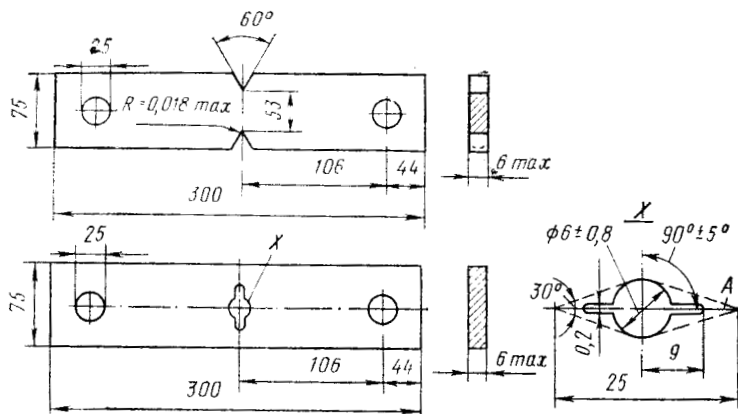
Для испытания на растяжение полимерных материалов (типа пластомеров) применяют образцы с заплечиками, а для эластомеров – цилиндрические образцы.



**Рис. 25. Образцы для испытаний на растяжение:**

I – металлические материалы: А – цилиндрический образец с гладкой цилиндрической головкой;  $d_0$  – диаметр образца;  $L_0$  – расчетная длина образца;  $d_1 \approx 1,2d_0$  – диаметр головки;  $L_g = L_0 + d_0$  – длина образца, испытываемого на растяжение;  $L_t$  – общая длина;  $h$  – высота головки; Б – плоский образец с гладкой головкой:  $a$  – толщина образца;  $b$  – ширина образца;  $B = 1,2b - 3$  мм – ширина головки;  $h \approx 2b - 10$  мм – высота головки; II – полимерные материалы: Б; В и Г – образцы материала с небольшой и большой деформацией при разрушении соответственно

Для определения механических свойств материалов при объемном напряженном состоянии используют образцы с острым надрезом или с наведенной усталостной трещиной (рис. 26). Применение таких образцов особенно необходимо при проведении испытаний по методикам, разработанным в области механики разрушения.



**Рис. 26. Образцы для испытаний на растяжение с острым надрезом или наведенной усталостной трещиной:**  
А – усталостная трещина

Можно также подвергать испытаниям готовые элементы конструкций, такие как тросы, цепи или сварные и клепаные соединения. Для испытания корабельных цепей и канатов используют горизонтальные испытательные машины с длиной хода 7 м и растягивающей нагрузкой более  $10^7$  Н.

#### 21.1.6. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

При температуре, отличной от комнатной, образцы в течение всего процесса испытания должны иметь требуемую температуру испытаний. Для горячих испытаний на растяжение применяют электрические нагревательные печи с воздушной атмосферой, в которых с помощью необходимой циркуляции воздуха поддерживают постоянную температуру с максимальным отклонением  $\pm 2$  °С. В определенных случаях надежны жидкие ванны



с электрическим обогревом.

Для исследований при низких температурах применяют холодильные камеры, которые соединяются с холодильной машиной или с сосудом с жидким азотом.

При горячих испытаниях на растяжение для определения прочностных свойств образец нагревают до требуемой температуры и растягивают до достижения предела текучести, определенной степени пластической деформации или до разрыва. При этом определяют следующие характеристики: предел текучести  $\sigma_{S/T}$ ; временное сопротивление  $\sigma_{B/T}$ ; относительное сужение после разрыва  $\psi_T$ ; предел упругости  $\sigma_{\epsilon_{bl}/T}$  относительное удлинение после разрыва  $\delta_{S/T}$  или  $\sigma_{10/T}$  ( $T$  – температура испытания).

Следует иметь в виду, что величины свойств, полученные при горячих испытаниях, сильно зависят от скорости нагружения. На этом основании при определении физического или условного предела текучести устанавливают такую скорость нагружения, чтобы в каждый момент испытания увеличение деформации составляло бы 0,3 % расчетной длины в 1 мин или увеличение напряжения  $300 \text{ Н/мм}^2$  в 1 мин. При этом исходят из того, что горячие испытания заканчиваются через определенное время, обычно через 20 мин.

Так как это не всегда возможно, определяемые значения прочности представляют графически в зависимости от продолжительности опыта и интерполируют на выдержку 20 мин.

Длину  $L_B$  и площадь наименьшего сечения измеряют на охлажденном образце.

На рис. 27 показано, как изменяются диаграммы растяжения строительной стали в зависимости от температуры испытания. Так как для этого материала при температуре выше 600 К большее значение приобретает фактор времени, для определения механических свойств при высоких температурах лучше применять длительные испытания.

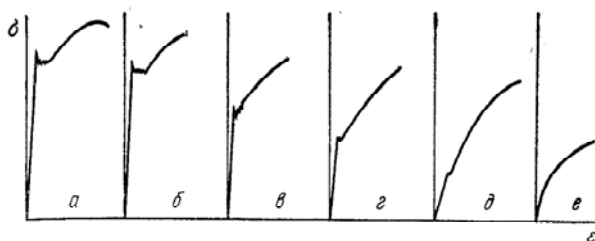


Рис. 27. Кривые напряжение – деформация для строительной стали при температуре К:  
а – 300; б – 400; в – 500; г – 600; д – 700; е – 800

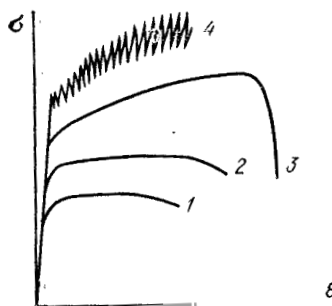


Рис. 28. Кривые напряжение – деформация для титана при температуре К:  
1 – 300; 2 – 200; 3 – 80; 4 – 4

На рис. 28 показано влияние низких температур на ход кривых напряжение – деформация для титана. Прерывистое скольжение, возникающее при температуре жидкого гелия, наблюдается у всех пластичных металлических материалов при их испытаниях на машинах с постоянной скоростью деформации.

## 21.2. ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ

Испытание на сжатие, при котором изучают поведение материалов при одноосном сжатии, можно рассматривать как обратное испытанию на растяжение. Оно имеет наибольшее значение для строительных материалов таких, как натуральный камень, кирпич, бетон, древесина и т.д.

Оно находит также применение для металлических и полимерных материалов, например для материалов, используемых в подшипниковой промышленности.

При испытании на сжатие образец с поперечным сечением  $A_0$  подвергают сжатию и измеряют при этом соответствующую нагрузку  $F$ . Для определения напряжения сжатия  $\sigma_d$  нагрузку  $F$  относят к площади начального сечения  $A_0$ :

$$\sigma_d = F / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.44)$$

Если абсолютное укорочение при деформации  $\Delta L_a = L_0 - L$  отнести к начальной высоте  $L_0$ , получим относительное укорочение (%):

$$\epsilon_d = \Delta L_d / L_0 \cdot 100. \quad (21.45)$$

Временное сопротивление при сжатии выражается формулой

$$\sigma_{dB} = F_B / A_0, \text{ Н/мм}^2, \quad (21.46)$$

где  $A_0$  – начальное поперечное сечение образца и  $F_B$  – нагрузка, которую измеряют при появлении первой трещины или при разрушении.

Если трещина не образуется, испытание проводят до общего относительного сжатия 50 %. Тогда для временного сопротивления при сжатии получим

$$\sigma_{d50} = F_{50} / A_0, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.47)$$

При испытании дерева поперек волокна и других деформируемых строительных материалов испытания прекращают уже после достижения 10 % относительного укорочения.

Предел текучести при сжатии, соответствующий пределу текучести при растяжении, равен

$$\sigma_{dF} = F_F / A_0, \text{ Н/мм}^2 \quad (21.48)$$

где  $F_F$  – нагрузка, под действием которой на кривой напряжение – относительное укорочение при сжатии при одновременном появлении заметного остаточного укорочения появляется первое отклонение от прямолинейного хода.

Если кривая напряжение – относительное укорочение при сжатии монотонна, то в качестве предела текучести при сжатии определяют условный предел текучести. Условным пределом упругости считают условное напряжение, соответствующее относительному укорочению при сжатии 0,01 %.

После появления первой трещины соответствующее относительное укорочение при разрушении

$$\varepsilon_{dB} = \Delta L_{dB} 100 / L_0 \quad (21.49)$$

при

$$\Delta L_{dB} = L_0 - L_B. \quad (21.50)$$

Если образец при сжатии разрушается без видимой трещины, относительное укорочение при сжатии определить нельзя. Бочкообразную выпуклость образца (рис. 29), образующуюся при испытании на сжатие, нельзя сравнивать с соответствующим сужением при испытании на растяжение.

Бочкообразность при сжатии возникает из-за трения между опорными поверхностями на машине и поверхностями сжимаемого образца. Трение препятствует поперечной деформации на торцах сжимаемого образца нарушает одноосность напряженного состояния при сжатии. Так как ограничение деформации может распространяться конусообразно по середине образца, пластическая деформация при сжатии по существу ограничена областью, лежащей за пределами этого конуса.

Для испытания на сжатие применяют или те же испытательные машины, что и на растяжение, или специальные прессы (например, для испытаний строительных материалов). Находят применение механические прессы с механическим приводом при нагрузке до  $10^5$  Н и с гидравлическим приводом до  $10^8$  Н. Плиты, применяемые для передачи давления на образец, должны быть ровными, полированными и более твердыми, чем испытываемый материал. Плита, которую в начале испытания кладут на образец, должна быть установлена с помощью шарового вкладыша таким образом, чтобы она могла в некоторых пределах качаться во все стороны для выравнивания (рис. 30) перекосов и небольших отклонений поверхностей образца от параллельности. Диаметр применяемых цилиндрических образцов зависит от размеров имеющихся материалов и обычно составляет 10... 30 мм.

Для грубых измерений используют нормальный образец с высотой, равной диаметру. При тонких измерениях следует применять длинные образцы с  $L_0 = (2,5 \dots 3) d_0$ . Более длинные образцы не применяют из-за опасности продольного изгиба.

Для грубых измерений используют нормальный образец с высотой, равной диаметру. При тонких измерениях следует применять длинные образцы с  $L_0 = (2,5 \dots 3) d_0$ . Более длинные образцы не применяют из-за опасности продольного изгиба.

При испытании длинных образцов расчетную длину выбирают на половину диаметра меньше, чем высота. Металлические образцы должны быть со всех сторон обточены или отшлифованы. Важно, чтобы торцы были точно параллельны и перпендикулярны оси образца. Для испытаний строительных материалов обычно используют образцы кубической формы.

Трубы и хрупкие материалы (гончарные изделия, глина) испытывают на сжатие для оценки их способности противостоять нагрузке в вертикальной плоскости (сплющиванию). При этом труба лежит на основной плите, а приложение нагрузки производят с помощью пуансона

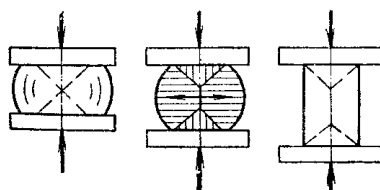


Рис. 29. Схема сжатия образца

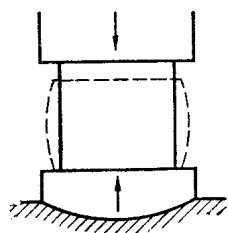


Рис. 30. Схема расположения образца при испытании на сжатие

инструментальной стали или керамики. Для вязких металлических материалов изгибающую нагрузку можно продолжать прикладывать за пределом текучести без разрушения материала.

Особенное значение имеет испытание на изгиб для полимерных материалов, так как для этой группы материалов, согласно их специфическим свойствам, при практическом использовании преобладает изгибающее нагружение.

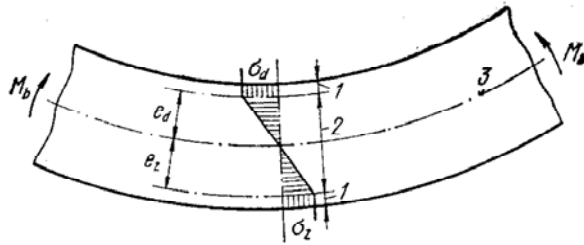
При изгибе образца с симметричным поперечным сечением, как показано на рис. 31, в одной из наружных зон возникают растягивающие, а в противоположной – сжимающие напряжения. Напряжения увеличиваются по мере удаления в обе стороны от нейтральной оси, так что самые высокие их значения приходятся на наружные зоны. Если напряжения при этом достигают предела текучести, наступает пластическое течение.

### 21.3. ИСПЫТАНИЕ НА ИЗГИБ

Испытание на изгиб находит применение для исследования сравнительно хрупких материалов, например чугунов с пластинчатым графитом, инструментальной стали или керамики. Для вязких металлических материалов изгибающую нагрузку можно продолжать прикладывать за пределом текучести без разрушения материала.

Особенное значение имеет испытание на изгиб для полимерных материалов, так как для этой группы материалов, согласно их специфическим свойствам, при практическом использовании преобладает изгибающее нагружение.

При изгибе образца с симметричным поперечным сечением, как показано на рис. 31, в одной из наружных зон возникают растягивающие, а в противоположной – сжимающие напряжения. Напряжения увеличиваются по мере удаления в обе стороны от нейтральной оси, так что самые высокие их значения приходятся на наружные зоны. Если напряжения при этом достигают предела текучести, наступает пластическое течение.



**Рис. 31. Распределение напряжений в симметричном поперечном сечении при изгибе образца:**  
1 – пластическая деформация; 2 – упругая деформация; 3 – нейтральная ось

В упругой области напряжения в поперечном сечении образца распределяются по линейному закону (см. рис. 31) и максимальное значение напряжений выражается как

$$\sigma_z = M_b e_z / I \quad \text{и} \quad \sigma_d = M_b e_d / I, \quad (21.50)$$

где  $M_b$  – изгибающий момент;  $I$  – момент инерции относительно горизонтальной оси, или соответственно

$$\sigma_z = M_b / W_z \quad \text{и} \quad \sigma_d = M_b / W_d, \quad (21.51)$$

где  $W = I / e$  – момент сопротивления.

Характеристики прочности и пластичности при изгибе определяют при двух модификациях этого испытания: трехточечном и четырехточечном изгибе. При трехточечном изгибе (рис. 32, а) наибольший изгибающий момент возникает под влиянием сосредоточенной силы  $F$  в середине образца:

$$M_{b\max} = FL_s / 4, \quad (21.52)$$

где  $L_s$  – расстояние между опорами.

При этом максимальное напряжение равно

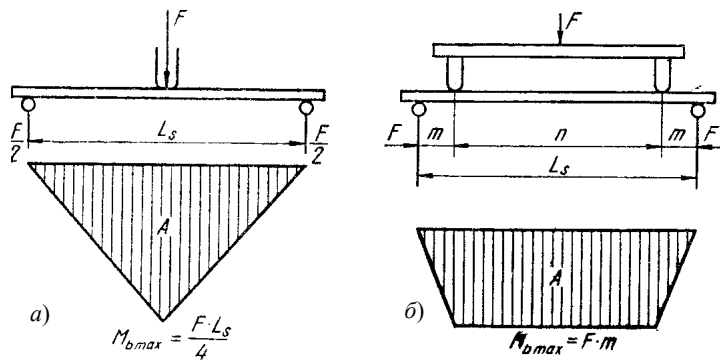
$$\sigma_{\max} = FL_s / 4W, \quad \text{Н/мм}^2. \quad (21.53)$$

Введя  $F$  – нагрузку в момент разрушения, получим временное сопротивление при изгибе  $\sigma_{bb}$ . В точке приложения нагрузки появляется наибольший упругий прогиб, равный

$$f = FL_s^3 / 48EI = \sigma_{\max} L_s^2 / 12EI, \quad \text{мм}, \quad (21.54)$$

где  $E$  – модуль упругости.

Так как при испытании полимерных материалов разрушение образцов часто не достигается, определяют предельный прогиб при условии, что величина прогиба в точке приложения силы в 1,5 раза превышает толщину образца.



**Рис. 32. Схема испытания и эпюра моментов  $A$  при трехточечном а) и при четырехточечном б) изгибе**

Прочностной характеристикой, соответствующей этому прогибу, является условное временное сопротивление при изгибе  $\sigma_{b1,5}$ . В случае четко выраженного зуба (площадки) текучести определяют условный предел текучести при изгибе  $\sigma_{bf}$ . Если отнести абсолютную величину прогиба к расстоянию между опорами  $L_s$ , получим относительную стрелу прогиба при изгибе  $\varphi$ :

$$\varphi = f 100 / L_s. \quad (21.55)$$

Кроме того, поведение материала можно охарактеризовать жесткостью, определяемой соотношением между прочностью при изгибе  $\sigma_{bb}$  и величиной стрелы прогиба при разрушении  $f_B$ .

При четырехточечном изгибе (см. рис. 32, б) действующая на образец нагрузка  $F$  приложена в двух местах на расстоянии  $m$  от опор. При таком нагружении между точками приложения нагрузки не возникает усилий среза. Изгибающий момент между точками приложения нагрузки постоянен, т.е.

$$M_{b\max} = Fm. \quad (21.56)$$

Максимальные напряжения между точками приложения нагрузки равны

$$\sigma_{\max} = Fm / W, \quad \text{Н/мм}^2. \quad (21.57)$$

Наибольший прогиб в середине между точками приложения нагрузки при четырехточечном изгибе относительно линии опор выражается как

$$f_{\max} = Fm (3L_s^2 - 4m^2) / 14EI . \quad (21.58)$$

В отличие от трехточечного при четырехточечном изгибе вследствие постоянства изгибающего момента между точками приложения нагрузки создаются условия, при которых получаемые результаты испытаний правильно характеризуют материал и не зависят от возможных неоднородностей образца (в частности, структурных) в области максимального изгибающего момента.

Для проведения испытания на изгиб применяют цилиндрические или призматические образцы.

Образцы кладут на гладкие цилиндрические опоры и равномерно нагружают в соответствии с выбранной схемой испытаний с помощью одного или двух пуансонов.

Перед началом испытания точно устанавливают расстояние между опорами (для цилиндрических образцов  $L_s = 20d_0$ ).

#### 21.4. ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ

Испытание на кручение (или на скручивание) имеет второстепенное значение. Оно введено для оценки материалов валов или проволоки, а также для определения прочности и пластичности твердых сталей.

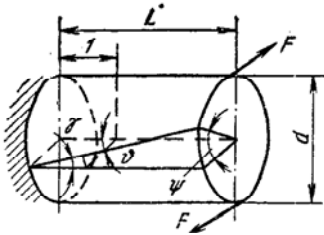


Рис. 33. Схема испытания на кручение

При проведении испытания на кручение один конец образца закрепляют неподвижно, а к другому концу прикладывают пару сил в плоскости, перпендикулярной к оси образца, так что возникает крутящий момент, равный

$$M_t = Fd, \quad (21.59)$$

где  $F$  – действующая сила;  $d$  – диаметр образца.

При кручении все поперечные сечения образца сдвигаются (поворачиваются) вокруг общей оси по отношению к закрепленному сечению (рис. 33). Этот сдвиг увеличивается с увеличением расстояния от места закрепления, причем линии, параллельные оси образца, переходят в винтовые.

Сдвиг, происходящий в двух соседних поперечных сечениях определяется углом кручения  $\psi$  и пропорционален расстоянию  $L$  между этими плоскостями. Под углом относительного поворота  $\nu$  понимают угол кручения двух сечений, находящихся на расстоянии  $l$  (рис. 33). Условный угол сдвига  $\gamma$  представляет собой угол, образующий соответствующую винтовую линию с образующей цилиндра. В упругой области условный угол сдвига пропорционален удаленности от оси образца. Отношение между условным углом сдвига  $\gamma$  и соответствующим касательным напряжением при сдвиге  $\tau$  обозначается коэффициентом упругости сдвига  $\beta$ :

$$\beta = \gamma / \tau. \quad (21.60)$$

Обратная величина этого коэффициента является модулем сдвига.

Как при испытании на изгиб, так и при испытании на кручение наибольшее напряжение возникает в поверхностных зонах, где

$$\tau_{\max} = M_t / W_p . \quad (21.61)$$

Для образцов с круглым поперечным сечением.

$$\tau_{\max} = 16M_t / \pi d^3 . \quad (21.62)$$

Для того чтобы определить угол сдвига, измеряют взаимное скручивание двух поперечных сечений. Так как  $\nu = 2\gamma d$  и  $\phi = \nu L$ , то между углом сдвига и углом скручивания  $\phi$  для двух поверхностей на расстоянии  $L$  справедливо соотношение

$$\phi = 2\gamma L / d. \quad (21.63)$$

В соответствии с законом Гука для касательного напряжения при сдвиге

$$\tau = G\gamma \quad (21.64)$$

получим

$$\phi = 2\tau L / Gd \quad (21.65)$$

или

$$\phi = 32M_t L / \pi d^4 . \quad (21.66)$$

Модуль сдвига при этом можно определить из соотношения

$$G = 32M_t L / \pi d^4 \phi. \quad (21.67)$$

Остаточная деформация для пределов упругости и текучести при кручении вдвое больше, чем при растяжении, так что  $\sigma_{0,01}$  соответствует пределу упругости  $\tau_{0,02}$ , а  $\sigma_{0,2}$  – пределу текучести  $\tau_{0,024}$ . После достижения временного сопротивления при кручении  $\tau_{tB}$  происходит разрушение либо в плоскости поперечного сечения, либо с образованием расслоений в продольном направлении.

В хрупких материалах плоскость разрушения соответствует плоскостям, по которым действуют наиболь-

шие нормальные напряжения. Так как эти плоскости составляют угол  $45^\circ$  с осью образца, то излом представляет собой винтовую поверхность.

Самым простым способом измерения угла закручивания является измерение взаимного поворота двух зажатых головок образца. Для определения угла закручивания в момент разрушения можно на его поверхности нанести линию, параллельную оси образца, и измерить изменение ее при соединении обеих половинок образца после разрушения.

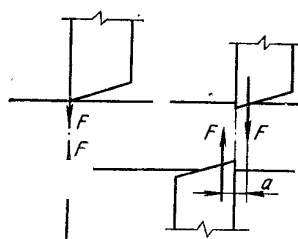
Для проведения испытания на кручение применяют в первую очередь цилиндрические образцы. Расчетная длина чаще всего составляет  $10d$ . Безопасного закрепления достигают с помощью клина, самотормозящегося с увеличением крутящего момента.

## 21.5. ИСПЫТАНИЕ НА СРЕЗ

При испытании на срез образец нагружают двумя силами  $F$ , которые действуют в одной плоскости. Фактически возникает пара сил с плечом  $a$  возникают дополнительные изги-

На практике чаще всего проводят

На рис. 35 представлены схемы двойной срез при растяжении и



Силы, действующие при испытании на срез

(рис. 34), т.е. при этих испытаниях

испытание на двойной срез.

устройства для испытания на сжатии.

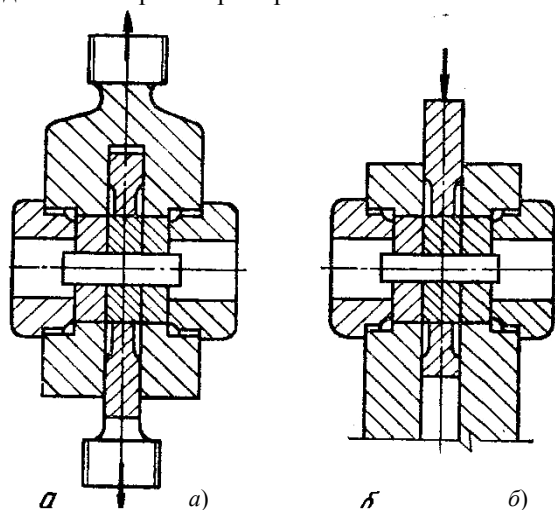


Рис. 35. Схема испытания на срез:

*a* – при растяжении; *б* – при сжатии

Так как при испытании на срез не достигают определенного напряженного состояния, устанавливают только максимальную силу  $F_{\max}$ , необходимую для среза, исходя из которой рассчитывают при идеализированном условии равномерного напряжения поперечного сечения сопротивление срезу при испытании на двойной срез:

$$\tau_s = F_{\max} / 2A_0 = 2F_{\max} / \pi d^2, \text{ Н/мм}^2. \quad (21.68)$$

Испытание на срез имеет практическое значение при оценке сталей для заклепок или, например, для определения размеров ножниц.

### Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию механических испытаний?
2. Какие параметры и величины измеряются при проведении механических испытаний?
3. Какое оборудование применяется при проведении испытаний на разрыв?
4. Как проводятся испытания на срез?
5. Какие параметры измеряются при проведении испытаний на сжатие?
6. Какие параметры измеряются при проведении испытаний на кручение?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бегларян, В.Х. Климатические испытания аппаратуры и средств измерений / В.Х. Бегларян. – М. : Машиностроение, 1983. – 156 с.
2. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование : учеб. пособие для вузов / О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробов, Ю.В. Трегубов ; под ред. А.И. Коробова. – М. : Радио и связь, 1987. – 272 с.
3. Испытание материалов : справочник / под. ред. Х. Блюменауэра. –М. : Metallургия, 1979. – 448 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗДЕЛИЯ И МАТЕРИАЛЫ .....	3
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ .....	7
3. СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ .....	15
4. ОРГАНИЗАЦИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ .....	17
5. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ .....	25
6. КРАТКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ .....	27
7. ИСПЫТАНИЕ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ .....	27
8. ИСПЫТАНИЕ НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ .....	32
9. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНЕЯ И РОСЫ .....	33
10. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖ- НОСТИ ВОЗДУХА .....	34
11. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВ- ЛЕНИЯ .....	36
12. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	39
13. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЫЛИ .....	41
14. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ .....	43
15. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОГО ГИД- РОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ .....	45
16. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА .....	46
17. ИСПЫТАНИЕ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ .....	47
18. ИСПЫТАНИЕ НА ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ .....	49
19. ИСПЫТАНИЕ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ .....	50
20. МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ .....	53
21. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ .....	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	83