

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Сопротивление материалов»

## **Практикум**

по дисциплине

«Сопротивление материалов»

### **«Испытание на ползучесть полимерной нити при растяжении»**

Авторы

Маяцкая И.А.,

Языев Б.М.

Ростов-на-Дону, 2022



## Аннотация

Практикум содержит основные теоретические положения, необходимые для успешного выполнения лабораторной работы, рабочее задание, порядок проведения лабораторной работы и контрольные вопросы для самопроверки.

Практикум предназначен для изучения методов проведения испытаний на ползучесть с оценкой влияния постоянной нагрузки на деформацию по дисциплинам «Сопrotивление материалов», «Специальные вопросы сопроtивления материалов», «Механика», «Теоретическая механика для архитекторов», «Строительная механика для архитекторов».

Практикум предназначен для студентов всех форм обучения (очной, очно-заочной, заочной) технических направлений подготовки (специальностей), в частности, для студентов, обучающихся по направлениям: 08.03.01 – Строительство; 07.03.01 – Архитектура; 07.03.02 – Реконструкция и реставрация архитектурного наследия; 07.03.04 – Градостроительство; 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 29.03.04 – Технология художественной обработки материалов и специальностям: 08.05.01 – Строительство уникальных зданий; 08.05.02 – Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей; 21.05.01 – Прикладная геодезия; 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства.

## АВТОРЫ

канд. техн. наук, доц. Маяцкая И.А;

докт. техн. наук, профессор Языев Б.М.





## СОДЕРЖАНИЕ

### ИСПЫТАНИЕ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ПОЛИМЕРНОЙ НИТИ

<b>ПРИ РАСТЯЖЕНИИ.....</b>	<b>4</b>
1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
2.1. Ползучесть и релаксация в твердых телах.....	4
2.2. Основные понятия теории ползучести.....	5
2.3. Испытания на ползучесть. Кривые ползучести.....	9
2.4. Определение параметров ползучести при растяжении образца	13
2.5. Теории ползучести.....	16
3. Примеры выполнения лабораторной работы.....	18
4. Основные правила техники безопасности.....	23
5. Контрольные вопросы.....	23

## ИСПЫТАНИЕ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ПОЛИМЕРНОЙ НИТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

### 1. Цель работы

Изучение измерительных приборов и лабораторного оборудования (стенд, метр, секундомер, груз массой  $m$ ), применяемых при испытаниях на ползучесть.

Ознакомление с методикой проведения испытаний и с оценкой влияния постоянной нагрузки на деформацию. Определение функции ползучести, податливости и модуля упругости при ползучести.

### 2. Теоретическая часть

#### 2.1. Ползучесть и релаксация в твердых телах

В механике, если в нагрузке и температуре среды в будущем изменений не предполагается, не должно быть в будущем и изменений напряженного и деформированного состояния тела. В действительности, особенно в условиях высокого температурного поля, деформация, хотя и медленно, может во времени возрастать.

Изменения во времени деформаций и напряжений, возникших в результате начального нагружения, принято называть ползучестью.

Одну сторону этого явления – изменение деформации при постоянной нагрузке, называют последствием. Другую сторону этого явления – изменение напряжений при постоянной деформации, называют релаксацией.

Раздел механики, изучающий обе указанные стороны, объединяемые обычно термином ползучесть, называется теорией ползучести.

Теория ползучести занимается установлением законов образования и развития во времени деформации твердых тел в ограниченных физико-химических условиях.

Изменения во времени деформаций, а, следовательно, и напряжений, в одних случаях могут быть уже ощутимы на протяжении сравнительно небольшого отрезка времени, например, в течение нескольких месяцев или лет (падение напряжений в натянутых болтовых соединениях, сохраняющих постоянную деформацию), то есть происходит, так называемое, явление релаксации.

Существенные изменения могут произойти лишь в течение нескольких веков. Примером может служить случай изгиба пластов горных пород. В этом случае своеобразное течение горных пород происходит в результате исключительно большой продолжительности действия сил, то есть происходит явление ползучести.

Природа таких явлений, как релаксация (падение напряжений при неизменной деформации), ползучесть (рост деформаций при неизменных нагрузках), не может быть объяснена с точки зрения идеально упругого тела или идеально пластического. Объяснение указанных явлений можно получить, если исходить из представления об упруго-вязких или вязко-пластических телах, в которых при деформации возникают напряжения, зависящее не только от размеров деформации, но также и от скоростей, с которыми развиваются эти деформации. Свойством ползучести обладают полимеры, композиты, металлы при высоких температурах.

Учеными было предложено много различных моделей, имитирующих явления ползучести и релаксации, и различные математические зависимости, их отражающие (труды А.Р. Ржаницина, Л.М. Качанова, А.Ю. Ишлинского, Ю.Н. Работнова, И.И. Гольденבלата).

## **2.2. Основные понятия теории ползучести**

Модель линейного упругого тела очень часто используется при расчетах на прочность строительных конструкций. Но при деформировании возникают

необратимые процессы, при которых связь между напряжениями и деформациями не является линейной.

Существуют основные типы неупругих явлений, которые описывают данные процессы: пластичность, ползучесть, релаксация напряжений и усталостные напряжения.

Ползучесть – это свойство твердых тел медленно накапливать остаточные деформации под воздействием не зависящих от времени нагрузок. При этом возникшие деформации не исчезают и после снятия нагрузок.

Явление ползучести характерно в той или иной степени для всех материалов и описывается кривой ползучести, которая является зависимостью деформации от времени при фиксированных значениях температуры и напряжения. Ползучесть может развиваться и при небольших напряжениях, и возрастает с ростом температуры.

Релаксация – это явление аналогичное ползучести и заключается в том, что напряжения при сохранении постоянной деформации уменьшаются со временем по экспоненте.

Полная деформация является суммой упругой деформаций  $\varepsilon_0$  и деформации, образовавшейся в процессе ползучести  $\varepsilon_c$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_c = \text{const} = \varepsilon(0).$$

Деформация ползучести возрастает во времени, а упругая деформация уменьшается. В течение времени составляющие полной деформации перераспределяются.

На основании закона Гука получаем

$$\sigma_0(0) = E \cdot \varepsilon_0(0) \quad \text{и} \quad \sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0$$

или

$\varepsilon_0(t) = \frac{\sigma_0(t)}{E}$  – упругая часть деформации, соответствующая напряжению  $\sigma_0(t)$ .

Деформация ползучести  $\varepsilon_c(t)$ , нарастающая во времени при снижающихся напряжениях, входит в следующее уравнение:

$$\frac{\sigma_0(0)}{E} = \frac{\sigma_0(t)}{E} + \varepsilon_c(t).$$

Скорость снижения напряжений во времени зависит от скорости деформации ползучести:

$$\frac{\partial \varepsilon_0(0)}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_0(t)}{E \partial t} + \dot{\varepsilon}_c(t) \quad \text{или} \quad \frac{\partial \sigma_0(t)}{\partial t} = -\dot{\varepsilon}_c(t) \cdot E.$$

График зависимости напряжения от времени называется кривой релаксации (рис. 1).

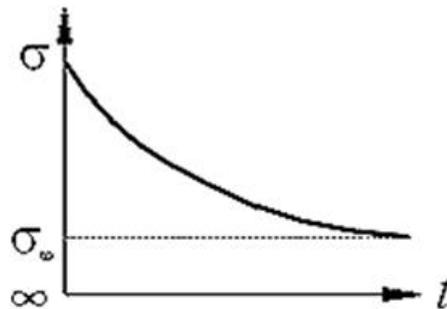


Рис.1. Кривая релаксации

Явление релаксации напряжений является процессом уменьшения напряжений, который обусловлен перестройкой внутри материала с разрушением одних связей и возникновением других. Релаксация имеет ту же природу, что и ползучесть. По результатам испытаний строится кривая уменьшения напряжения во времени, причем некоторая часть первоначального напряжения сохраняется очень долго.

Эффект ползучести считается заметным, если за период эксплуатации конструкции деформация ползучести оказывается по порядку величины не меньше начальной деформации.

Ползучесть строительных материалов может проявляться и при обычных для сооружений температурах. Полимеры и каучук обладает ползучестью при комнатной температуре, напряжениях ниже предела пропорциональности и времени нагружения порядка нескольких месяцев.

Если температура и начальные напряжения соответствуют возникновению ползучести, то при неизменных деформациях будет наблюдаться уменьшение напряжений в конструкции.

Уменьшение напряжений с течением времени при постоянной температуре и неизменной деформацией называется релаксацией напряжений.

Частный случай обратной ползучести, когда деформация ползучести уменьшается до нуля, называется упругим последствием.

Таким образом, при упругом последствии  $\varepsilon_\infty = 0$ , и образец полностью восстанавливает свои размеры за достаточно долгое время.

При расчетах на ползучесть долговечность конструкции задана, и в течение времени действия нагрузок необходимо обеспечить выполнение двух критериев: критерия допустимой деформации ползучести и критерия длительной прочности.

Эти критерии выражаются соответствующими неравенствами:

$$|\varepsilon_c(t)| \leq [\varepsilon_c] \quad \text{и} \quad |\sigma_c(t)| \leq [\sigma_{nc,t}].$$

Здесь в правой части соответственно допустимая деформация ползучести и допустимое напряжение при длительной нагрузке.

Допустимая деформация  $[\varepsilon_c]$  задается техническими условиями на проектирование. Допустимое напряжение  $[\sigma_{nc,t}]$  есть убывающая функция требуемой долговечности  $t$ , порядок ее задания обосновывается ниже.

При выборе запаса прочности следует иметь в виду, что предел длительной прочности имеет гораздо большие границы доверительного интервала, чем предел прочности.

Частный случай ползучести, когда деформация ползучести изменяется пропорционально действующему напряжению, называется линейной ползучестью. Более точно, линейной ползучестью будем называть случай, когда деформация ползучести от суммы напряжений есть сумма деформаций от каждого из напряжений.

В теории ползучести существует такое явление, как замедленное разрушение. Этот термин означает длительное разрушение, которое происходит при релаксации напряжений при затухающей ползучести. Накопление повреждений и уменьшение пластичности может привести со временем к разрушению даже при меньших напряжениях.

### 2.3. Испытания на ползучесть. Кривые ползучести

Экспериментальное исследование ползучести материалов даёт чрезвычайно важную практическую информацию и вносит существенный вклад в теоретические представления о поведении материалов под действием механических нагрузок.

Для изучения ползучести вязкоупругих материалов на образец воздействуют растягивающим усилием, за счет которого развивается напряжение  $\sigma$ , и его уровень поддерживается некоторое время, в течение которого деформация  $\varepsilon$  непрерывно растёт (явление ползучести), подчиняясь закону:

$$\varepsilon(t) = J(t)\sigma,$$

где  $J(t)$  – податливость при ползучести, представляющая собой функцию, вид которой предопределяет характер изменения деформации во времени.

Таким образом, для оценки ползучести измеряют деформацию, развивающуюся во времени. В большинстве методов определяют удлинение образца под действием растягивающей силы, однако ползучесть можно оценивать также при сдвиге, кручении, сжатии или изгибе.

По результатам испытаний строят кривые ползучести: зависимость относительной деформации от времени  $\varepsilon(t)$  или податливости от времени:

$$J(t) = \varepsilon(t)/\sigma.$$

Метод определения ползучести материалов при одноосном растяжении стандартизирован. Сущность метода заключается в длительном нагружении образца в условиях постоянных температуры и влажности. Результаты таких испытаний могут быть использованы для прогнозирования деформационного поведения и разрушения строительных конструкций в условиях эксплуатации, а значит прогнозирования их надежности.

Удлинение образца можно регистрировать прибором автоматической записи, а при отсутствии такового удлинение измеряют периодически: через 1, 3, 10, 30, 100 часов и так далее с таким расчётом, чтобы логарифм времени изменялся примерно на 0,5.

Таким образом, строят серию кривых ползучести материала при различных значениях растягивающей нагрузки и соответствующих значениях напряжения.

По полученным экспериментальным данным определяется предел ползучести, как напряжение, которое вызывает заданную деформацию по истечению заданного времени. Иногда, сопротивление ползучести материалов характеризуется величиной скорости деформирования по прошествии заданного времени.

Такие кривые имеют место для многих материалов, в том числе полимеров, металлов и бетона. Однако интенсивность ползучести и вид кривых

зависит от структурного механизма этого процесса, то есть от структуры материала и от условий, в которых происходит ползучесть.

Основой ползучести для полимерных материалов является перемещение макромолекул и изменение их формы, сопровождающиеся разрывом и возникновением новых физических связей (их рекомбинацией) под действием приложенной нагрузки и температуры.

В зависимости от совокупности внешних условий и характеристик структуры материала процесс ползучести может развиваться по-разному, и соответственно будет отличаться конфигурация кривых ползучести.

Возможные конфигурации кривых ползучести с мгновенно упругой составляющей деформации  $\varepsilon_0$  и неустановившейся скоростью деформирования в течение времени  $t_1$  представлены на рис. 2.

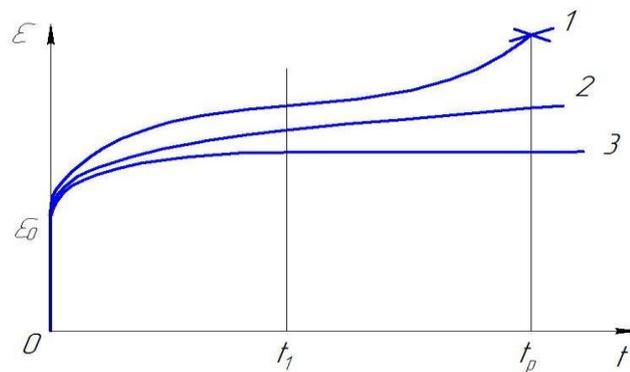


Рис. 2. Кривые ползучести

1- прекращение ощутимых признаков ползучести в связи с деформационным упрочнением материала;

2 – установившаяся ползучесть;

3 – ползучесть с ускорением деформирования и последующим разрушением в момент времени  $t_p$ .

В зависимости от цели испытания определяют следующие показатели:

- относительную деформацию – отношение приращения длины деформируемого участка (базы) образца в данный момент времени к начальной длине этого участка;
- среднюю скорость ползучести – отношение деформации образца за время испытаний к величине этого времени;
- показатель ползучести – увеличение деформации  $\Delta\varepsilon$  в течение заданного промежутка времени  $(t_2 - t_1)$ , выраженное в процентах к общей деформации  $\varepsilon$  в заданный момент времени  $t_1$ ;
- модуль ползучести – отношение напряжения  $\sigma_0$  к деформации  $\Delta\varepsilon$ , развиваемой в течение заданного промежутка времени;
- начальную деформацию ползучести – отношение приращения длины базы образца через минуту после приложения полной нагрузки к начальной длине базы образца;
- податливость – величину, обратную модулю ползучести.

Построение нескольких кривых ползучести данного материала при различных растягивающих нагрузках позволяет выявить величину критической нагрузки, при которой начинает происходить разрушение образца за время испытаний.

Кроме того, с помощью обработки совокупности таких кривых строят графическую зависимость величины напряжения от деформации, развиваемой в течение заданного времени с момента приложения заданной нагрузки, а также определяют следующие показатели, характеризующие механическое поведение материала во времени:

- условную (деформационную) долговременную прочность – напряжение, вызывающее заданную величину деформации за определённое время с момента приложения нагрузки;

- долговечность (время до разрушения) – время с момента приложения к образцу заданной нагрузки до момента его разрыва;

- долговременную (длительную) прочность – напряжение, вызывающее разрыв образца за определённое время с момента приложения к нему заданной нагрузки.

Рассмотрим напряжение или отношение деформации к постоянно действующему напряжению, то есть определим податливость при ползучести.

В большинстве методов определяется удлинение образца под действием силы, но ползучесть можно определить при сдвиге, кручении, сжатии или изгибе.

#### 2.4. Определение параметров ползучести при растяжении образца

Относительное удлинение ( $\varepsilon_t$ ) в момент  $t_n$  вычисляют по формуле:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где  $\Delta l$  – приращение длины образца в момент времени  $t_n$ , мм по диаграмме (см. рис. 3);

$l_0$  – начальная длина базы образца, мм.

Далее кривая  $\Delta l - F$  обрабатывается по оси  $\Delta l$ . В результате получают кривую ползучести  $\Delta l - t$ . По аналогичной методике проводят построение семейства кривых  $\Delta l - t$  для различных значений нагрузки  $F$ .

При этом проводят расчет напряжений  $\sigma$ , соответствующих нагрузкам  $F$  на различных этапах испытаний, а так же перерасчет абсолютного удлинения в относительное.

В результате получают семейство кривых  $\varepsilon - t$  при различных значениях параметра  $\sigma$  (рис. 3).

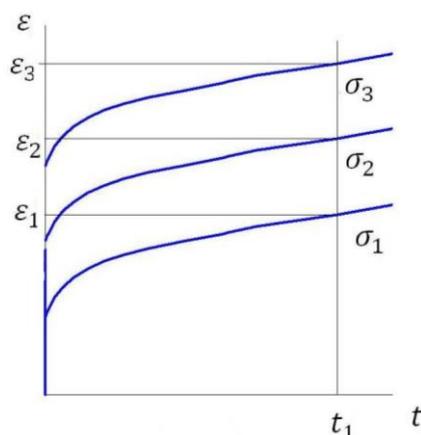


Рис. 3. Семейство типовых кривых ползучести

Результаты испытания обрабатывают следующим образом: для заданного преподавателем значения времени  $t_1$  определяют из кривых ползучести ряд значений деформации ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  и т.д.), отвечающих заданным напряжениям ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  и т.д.); строят кривую: напряжение ( $\sigma$ ) – деформация ( $\varepsilon$ ) по точкам с координатами  $(\sigma_1, \varepsilon_1), (\sigma_2, \varepsilon_2), (\sigma_3, \varepsilon_3)$  и т.д.

Значения времени  $t_1$ , для которых строят изохронные кривые «напряжение – деформация», могут быть указаны в стандартах или технических условиях на материал. Обычно значения  $t_1$  рекомендуется брать из ряда 1, 3, 10, 30, 100 ч.

Из кривой «напряжение – деформация» определяют условную (деформационную) долговременную прочность  $\sigma_y$ , как напряжение, при котором за заданное время ( $t_1$ ) достигается заданная деформация  $\varepsilon_1$  (рис. 4).

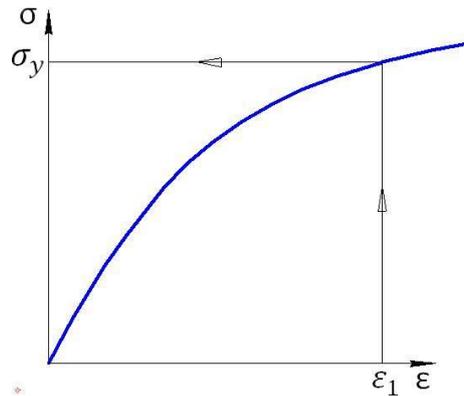


Рис. 4. Зависимость  $\epsilon - \sigma$  для определения условной прочности

Среднюю скорость ползучести ( $K_t$ ) вычисляют по формуле:

$$K_t = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1}, \text{ ч}^{-1},$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – деформация в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Для определения  $K_t$  используют один из графиков на рис. 3.

Параметры  $\sigma$ ,  $t_1$  и  $t_2$  заданы.

Показатель ползучести ( $\beta_t$ ) вычисляют по формуле:

$$\beta_t = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1},$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – деформация в момент времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Модуль ползучести ( $E_t$ ) вычисляют по формуле:

$$E_t = \frac{\sigma}{\epsilon_t}, \text{ МПа},$$

где  $\sigma$  – испытательное напряжение, МПа;

$\epsilon_t$  – деформация в момент времени  $t$ .

Деформация непрерывно растет и подчиняется закону:

$$\varepsilon(t) = I_t(t) \sigma_0,$$

$I_t(t)$  - податливость – это функция, которая определяет характер изменения деформации во времени.

Податливость  $I_t(t)$  вычисляют по формуле:

$$I_t = \frac{1}{E_t}, 1/\text{МПа},$$

где  $E_t$  – модуль ползучести, МПа.

Если деформация ползучести изменяется пропорционально действующему напряжению, ползучесть является линейной, то есть деформация ползучести от суммы напряжений есть сумма деформаций от каждого из напряжений, при этом предполагается, что напряжения не меняются во времени.

В конструкциях из металла при повышенных температурах ползучесть является нелинейной, и определяется формулой  $\dot{\varepsilon} = k\sigma_p^n$  при  $n \neq 1$ .

В этом случае существует и другая особенность: большая часть деформации ползучести необратима. При повышенных температурах деформация ползучести  $\varepsilon_c$  является функцией не только напряжения  $\sigma$  и времени  $t$ , но и температуры  $T$ .

Такие строительные материалы, как бетон, кирпичная кладка, при нормальных температурах и небольших нагрузках обладают свойством линейной ползучести, в противном случае – нелинейной.

## 2.5. Теории ползучести

Сущность теорий ползучести состоит в выборе основных переменных, определяющих процесс ползучести, и установлении функциональных зависимостей между ними. Известны четыре основные теории ползучести, построенные на различных гипотезах.

*Теория течения.* Она основана на предположении существования постоянной зависимости между скоростью пластической деформации, напряжением и временем:

$$\dot{\varepsilon}_n = f(t, \sigma).$$

Полученное дифференциальное уравнение теории течения справедливо при не слишком малых скоростях ползучести и медленно изменяющихся напряжениях, достаточно больших в начале процесса. Оно нашло применение в расчетах металлических узлов и соединений при высоких температурах.

*Теория упрочнения.* Под упрочнением подразумеваются такие изменения в материале, которые происходят по мере накопления деформаций ползучести и приводят к снижению скорости ползучести при заданных напряжении и температуре.

В данной теории предполагается существование постоянной зависимости между пластической деформацией, скоростью пластической деформации и напряжением:

$$\dot{\varepsilon}_n = f(\sigma, \varepsilon_n).$$

Теория упрочнения удовлетворительно описывает ползучесть при не очень сложных законах изменения внешних нагрузок.

*Теории наследственности и старения.* В этих теориях принята гипотеза о существовании постоянной зависимости между пластической деформацией, напряжением и временем  $\dot{\varepsilon}_n = f(t, \sigma)$ . Они описываются схожими интегральными уравнениями. В теории старения механические характеристики принимаются зависящими от возраста материала.

При линейной ползучести, если материал конструкции не обладает свойством старения, зависимость между напряжениями и деформацией можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon(t, \sigma) = \sigma \delta(t, \tau),$$

где  $\delta(t, \tau) = 1/E + c(t - \tau)$ ;  $c(t - \tau)$  – определяет деформацию ползучести при единичном напряжении  $\sigma = 1$  и  $0 < \tau < t$ ,  $c(0) = 0$ .

В общем случае, когда переменными являются как напряжение, так и деформация соотношения между ними с учетом свойства наследственности и старения в рамках линейной теории записывается в виде:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_{t_0}^t K(t, \tau) \sigma(\tau) d\tau,$$

где  $K(t, \tau) = -\frac{\partial}{\partial \tau} \delta(t, \tau)$ .

Теория ползучести, в основу которой положено данное выражение, носит название *теории наследственного старения*.

### 3. Примеры выполнения лабораторной работы

**Образец №1:** нить из полиамида,  $d = 2\text{мм}$ , длина  $600\text{мм}$ ,  $m = 4,2\text{кг}$

1. Определяем  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{8}{600} = \dots; \quad \varepsilon_2 = \frac{3}{600} = \dots; \quad \varepsilon_3 = \frac{2}{600} = \dots; \quad \varepsilon_4 = \frac{1}{600} = \dots; \quad \varepsilon_5 = \frac{0,5}{600} = \dots$$

2. Определяем податливость  $I$ :

$$I = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad \text{и} \quad \sigma = \frac{P}{A}, \quad A - \text{площадь поперечного сечения нити.}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{мм}^2$$

В результате получаем:

$$I_1 = \frac{\varepsilon_0}{\sigma} = \frac{\dots}{13,4} = \dots; \quad I_2 = \frac{\dots}{13,4} = \dots; \quad I_3 = \frac{\dots}{13,4} = \dots; \quad I_4 = \frac{\dots}{13,4} = \dots; \quad I_5 = \frac{\dots}{13,4} = \dots$$

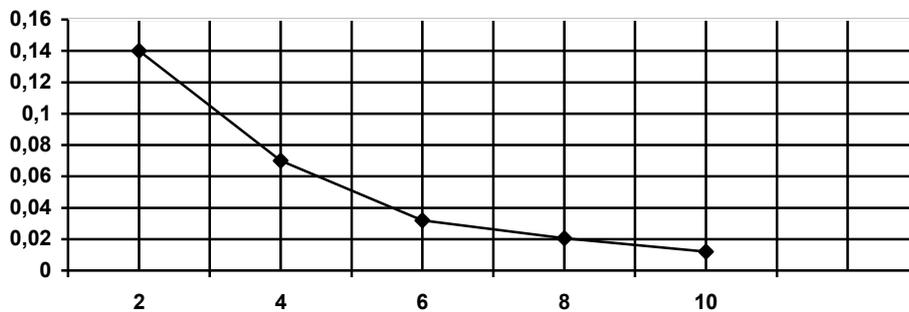
3. Определяем модуль упругости  $E$ :

$$E = \frac{1}{I}$$

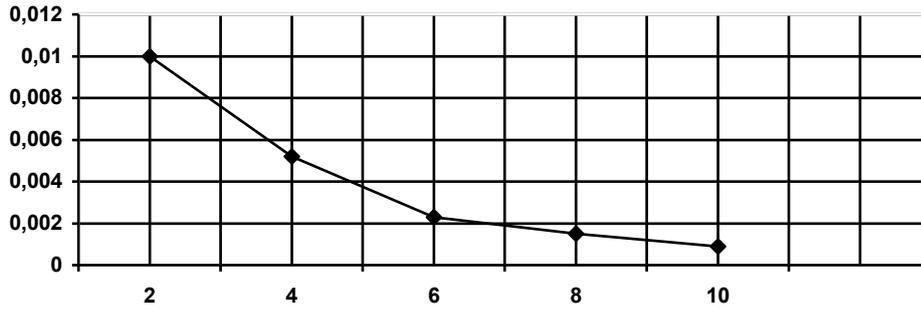
$$E_1 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_2 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_3 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_4 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_5 = \frac{1}{\dots} = \dots$$

Время, с	$\Delta l$ , мм	$\varepsilon(t)$ , %	$I(t)$ , МПа	$E(t)$ , МПа
2	3			
4	2			
6	1			
8	0,5			

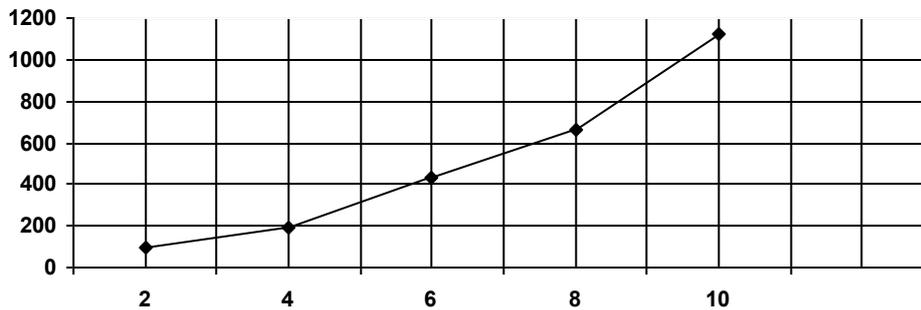
4. Графическая зависимость  $\varepsilon(t)$ .



5. Графическая зависимость  $I(t)$ .



6. Графическая зависимость  $E(t)$ .



**Образец №2:** нить из полиамида ,  $d = 1\text{мм}$ , длина  $90\text{мм}$ ,  $m = 4,2\text{кг}$

1. Определяем  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{102}{900} = \dots; \quad \varepsilon_2 = \frac{10}{900} = \dots; \quad \varepsilon_3 = \frac{8}{900} = \dots; \quad \varepsilon_4 = \frac{5}{900} = \dots; \quad \varepsilon_5 = \frac{3}{900} = \dots;$$

$$\varepsilon_6 = \frac{2}{900} = \dots; \quad \varepsilon_7 = \frac{1}{900} = \dots$$

2. Определяем податливость  $I$ :

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,785\text{мм}^2$$

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{\dots}{53,5} = \dots; \quad I_2 = \frac{\dots}{53,5} = \dots; \quad I_3 = \frac{\dots}{53,5} = \dots; \quad I_4 = \frac{\dots}{53,5} = \dots; \quad I_5 = \frac{\dots}{53,5} = \dots;$$

$$I_6 = \frac{\dots}{53,5} = \dots; \quad I_7 = \frac{\dots}{53,5} = \dots$$

3. Определяем модуль упругости E:

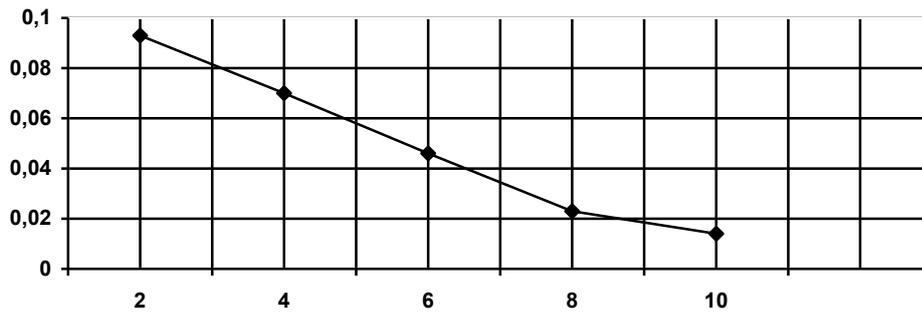
$$E = \frac{1}{I}$$

$$E_1 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_2 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_3 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_4 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_5 = \frac{1}{\dots} = \dots;$$

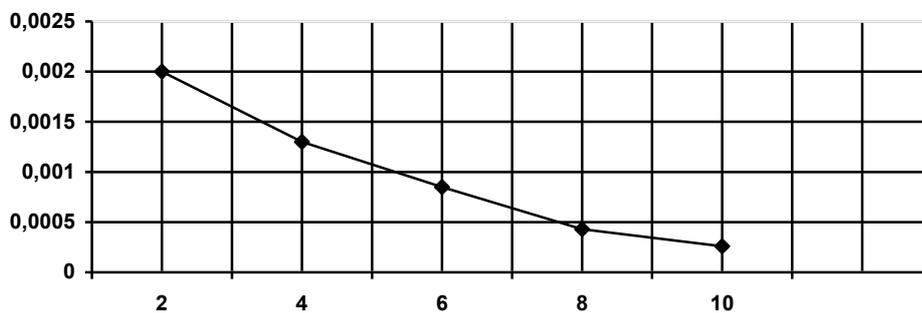
$$E_6 = \frac{1}{\dots} = \dots; \quad E_7 = \frac{1}{\dots} = \dots$$

Время, с	$\Delta l$ , мм	$\varepsilon(t)$ , %	I(t), МПа	E(t), МПа
2	102			
4	10			
6	8			
8	5			
10	3			
12	2			
14	1			

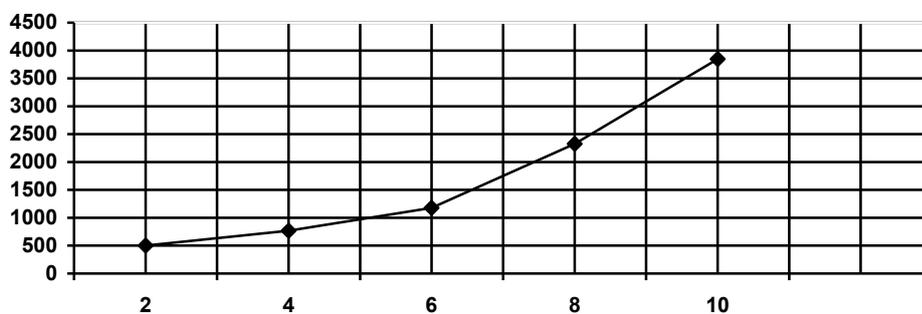
4. Графическая зависимость  $\varepsilon(t)$ .



5. Графическая зависимость  $I(t)$ .



6. Графическая зависимость  $E(t)$ .



**Рекомендация:** Необходимо сравнить свойства полимерной нити при разных данных образца.

#### **4. Основные правила техники безопасности**

1. Запрещается устанавливать образец и приводить испытания на лабораторной установке без разрешения руководителя.
2. При выполнении работы запрещается ходить за щиты, ограждающие лабораторную установку.
3. Необходимо находиться от испытываемого образца на расстоянии не менее 0,5 м.
4. Запрещается подходить к лабораторным установкам, не связанным с выполнением работы.

#### **5. Контрольные вопросы**

1. Дайте определение ползучести.
2. Сформулируйте теорию ползучести – теорию течения.
3. Сформулируйте теорию ползучести – теорию упрочения.
4. Сформулируйте теорию ползучести – теорию наследственности и старения.
5. Дайте определение податливости.
6. Как определяется скорость ползучести.