

21/1/ 20

Одобрено кафедрой  
«Сопrotивление материалов  
и строительная механика»

## СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания

к выполнению виртуальных лабораторных работ на ПЭВМ

для студентов II курса специальностей

190701 Организация перевозок и управление на транспорте  
(железнодорожный транспорт) (Д)

270102 Промышленное и гражданское строительство (ПГС)

270112 Водоснабжение и водоотведение (ВК)

270204 Строительство железных дорог,  
путь и путевое хозяйство (С)

270201 Мосты и транспортные тоннели (МТ)

для студентов III курса специальностей:

190301 Локомотивы (Т)

190302 Вагоны (В)

190205 Подъемно-транспортные, строительные, дорожные  
машины и оборудование (СМ)

190303 Электрический транспорт железных дорог (ЭПС)



Москва 2007

Составители: канд. техн. наук, проф. Л.Ю. Кузьмин,  
инж. А. Л. Кузьмин

© Российский государственный открытый технический университет  
путей сообщения, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы являются неотъемлемой частью курса «Соппротивление материалов». Профессор С.П. Тимошенко, впервые внедривший лабораторные работы в учебную программу курса в 1908 году в Киевском политехническом институте, писал: «...Совокупность аналитических методов, служащих для определения внутренних усилий, и тех приемов, которыми пользуются при экспериментальном исследовании прочности строительных материалов, составляет предмет науки сопротивления материалов». Современная программа предусматривает проведение цикла лабораторных работ, в ходе которых решаются две принципиально разные проблемы. С одной стороны, проводится экспериментальная проверка справедливости допущений и гипотез, применяемых в теоретических выкладках при выводе окончательных формул. С другой стороны, расчет конструкций или их отдельных элементов не может быть произведен без знания важнейших механических характеристик материала: предельно допустимых напряжений и упругих постоянных материала (модулей упругости  $E$  и  $G$ , и коэффициента Пуассона), которые определяются опытным путем. Таким образом, основными задачами лабораторного практикума являются: исследование механических свойств и определение механических характеристик материалов, опытная проверка теоретических выводов и законов, а также изучение студентами современных экспериментальных методов исследования напряженного и деформированного состояний материала и обработки экспериментальных данных.

В настоящих методических указаниях приведено описание обучающего программного комплекса виртуальных лабораторных работ по шести разделам курса сопротивления материалов и краткая теория. Каждый раздел записан в отдельном файле в каталоге **COLUMBUS -2005**.

Создание такого комплекса обусловлено несколькими причинами: во-первых, существующие в большинстве вузов испытательные машины сильно изношены и часто не поддаются

регулировке; во-вторых, в некоторых филиалах заочных вузов отсутствует испытательная база; в-третьих, совместное проведение реальных испытаний одного образца для всей группы и индивидуальных виртуальных испытаний для каждого студента открывает новые методические возможности при изучении дисциплины «Сопротивление материалов».

В данной версии программного комплекса используется база данных, содержащая свойства материалов, полученные в результате реальных испытаний образцов. Предусмотрена возможность расширения этой информации.

## **ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И УКАЗАТЕЛЬ ФАЙЛОВ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА**

### ***Раздел I. Растяжение и сжатие***

1. Растяжение металлического образца с построением диаграммы — 1.exe.
2. Сжатие металлического образца с построением диаграммы — 2.exe.
3. Испытание деревянных образцов на сжатие — 2.exe.
4. Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона — 9.exe.

### ***Раздел II. Кручение валов***

5. Испытание валов на кручение с определением модуля упругости при сдвиге — 3.exe.

### ***Раздел III. Изгиб балок***

6. Испытание стальной балки на чистый изгиб — 8.exe.
7. Испытание стальной балки на поперечный изгиб — 4.exe.

### ***Раздел IV. Сложное сопротивление***

8. Внецентренное растяжение стального стержня — 5.exe.
9. Внецентренное сжатие стального стержня — 10.exe.
10. Испытание балки на косоу изгиб — 11.exe.

### **Раздел V. Устойчивость**

11. Исследование продольно-поперечного изгиба стержня большой гибкости — 6.ехе.

12. Исследование явления потери устойчивости при сжатии стержня большой гибкости — 6.ехе.

### **Раздел VI. Ударная вязкость**

13. Определение ударной вязкости металлического образца — 7.ехе.

## **ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАБОТЫ НА ПЭВМ**

1. Открывается папка **COLUMBUS-2005**. На экране появляются иконки одиннадцати исполняемых модулей. Для запуска программы лабораторной работы нужно щелкнуть мышью на месте соответствующей иконки.

2. При выполнении каждой лабораторной работы верхняя строка экрана содержит Главное меню лабораторной работы:

<b>ЭКСПЕРИМЕНТ</b>	<b>УПРАВЛЕНИЕ СТЕНДОМ</b>	<b>СТУДЕНТ</b>	<b>ВИД</b>	<b>ПОМОЩЬ</b>
--------------------	-------------------------------	----------------	------------	---------------

При щелчке мышью по клавишам Главного меню открываются следующие подменю.

3. Вторая и последняя строка экрана содержат соответственно панель инструментов и строку состояния, изображением которых можно управлять с помощью подменю «ВИД»:

Показать панель инструментов.

Показать строку состояния.

4. Подменю «ЭКСПЕРИМЕНТ»:

<b>НОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ</b>	<b>CTRL + N</b>
<b>ЗАПИСАТЬ ФАЙЛ РЕЗУЛЬТАТОВ</b>	<b>CTRL + S</b>
<b>ПЕЧАТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ</b>	<b>CTRL + P</b>
<b>ВЫХОД</b>	

В режимах записи и печати открываются соответствующие стандартные диалоговые окна.

5. Подменю «УПРАВЛЕНИЕ СТЕНДОМ»:

<b>НАГРУЗИТЬ</b>
<b>РАЗГРУЗИТЬ</b>
<b>ВЫБРАТЬ МАТЕРИАЛ ОБРАЗЦА</b>

6. Подменю «СТУДЕНТ»:

<b>ФАМИЛИЯ</b>	
<b>ИМЯ</b>	
<b>ОТЧЕСТВО</b>	
<b>УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ</b>	
<b>ГРУППА</b>	
<b>ШИФР</b>	

Каждой строке подменю п.п. 4,5 и названию подменю «СТУДЕНТ» на панели инструментов предусмотрена соответствующая клавиша.

7. На панели инструментов имеется клавиша «I», при нажатии которой на экран выводятся изображение и физические параметры стенда, использованного в данной лабораторной работе.

8. Нажатие левой клавиши мыши на диаграмме приводит к увеличению масштаба по оси деформации в два раза. Нажатие правой клавиши мыши на диаграмме приводит к уменьшению масштаба по оси деформации в два раза.

# РАЗДЕЛ I. РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 РАСТЯЖЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА С ПОСТРОЕНИЕМ ДИАГРАММЫ

**Цель работы:** получение диаграмм растяжения стальных образцов, изучение механических свойств и получение механических характеристик стали по диаграммам растяжения. Рекомендуется провести испытание двух образцов из разных марок сталей (малоуглеродистой и легированной) и сравнить соответствующие диаграммы.

Испытания проводятся с помощью разрывной машины Р-50 с максимальным усилием 490 кН (50 тс), вызывающей растяжение образца увеличением расстояния между захватами машины. Машина снабжена самописцем — устройством, которое автоматически вычерчивает диаграмму растяжения, представляющую зависимость между нагрузкой и удлинением образца. Стандартный образец для испытания на растяжение в странах Европы принимается цилиндрическим с расчетной длиной  $L = 10D$  — длинный образец или  $L = 5D$  — короткий образец. В данном случае используется длинный образец, у которого длина цилиндрической части больше расчетной длины и равна  $L + D$ . Концы образца изготовлены большего диаметра, чтобы предохранить образец от разрушения в зажимах машины, где возникает сложное напряженное состояние.

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

#### 1. Управление движением траверсы разрывной машины без образца

1.1. Нажав однократно клавишу «Голубая стрелка вверх» на панели инструментов, с помощью электромотора перемещаем траверсу вверх. Для остановки — нажать **красную** клавишу.

1.2. Нажав однократно клавишу «Голубая стрелка вниз» на панели инструментов, с помощью электромотора перемещаем траверсу вниз. Для остановки – нажать **красную** клавишу.

Работа электромотора сопровождается соответствующим звуком.

1.3. Для автоматической установки траверсы в исходное положение нужно в диалоговом окне «НАСТРОЙКА», которое открывается нажатием кнопки «I», установить галочку.

## 2. Установка образца

2.1. Открывается окно «НАСТРОЙКА». В этом окне можно менять:

2.1.1. Диаметр образца.

2.1.2. Рабочую длину.

По умолчанию  $L = 0,2$  м,  $d = 0,02$  м.

2.1.3. Скорость проведения испытания, на которую влияют следующие параметры:

- скорость деформирования (0,001–0,02) – параметр, определяющий скорость изменения изображения на экране;
- количество точек (2 – 20) графика в наиболее узкой, имеющей ненулевую ширину, зоне деформации – определяет четкость прорисовки диаграммы;
- количество точек графика для сохранения в файле результатов и для вывода на печать (10 – 10000);
- файл настройки по умолчанию. Эта опция описана в разделе меню «Помощь».

2.2. Выбор материала из базы данных. Нажимается кнопка с изображением образца серого цвета. Подробности в разделе меню «Помощь» — «Управление стендом» — «Выбрать материал образца».

**ВНИМАНИЕ!** Материалы подразделены на классы и группы. Группа, в которой есть данные о материале отмечена знаком «+».

2.3. Установка образца в захватах разрывной машины. Нажимается кнопка с изображением образца красного цвета. При этом в захватах появляется образец серого цвета.



### **3. Режим испытания на растяжение**

Рекомендуется проводить эксперимент в два этапа.

3.1. Деформирование в пределах упругого участка диаграммы. Открывается окно «Настройка» (см. п.2.1) и устанавливается:

- а) скорость деформирования — 0,001 (п.2.1.2);
- б) количество точек 20 (п.2.1.3).

Нажимается кнопка «Запустить гидронасос» и курсор сразу же устанавливается в готовность «Остановить гидронасос».

После нажатия этой кнопки деформирование останавливается на упругом участке диаграммы и можно разгрузить образец до исчезновения напряжений, нажав кнопку «Разгрузка» — демонстрируется свойство упругости.

3.2. Деформирование в упруго-пластической зоне диаграммы. Открывается окно «Настройка» (см. п. 2.1.) и устанавливается:

- а) скорость деформирования — 0,005 (п.2.1.2);
- б) количество точек — 3 (п.2.1.3).

При этом в любой момент можно разгрузить образец и увидеть остаточную деформацию.

Затем нагрузить — диаграмма пойдет по линии разгрузки вверх (гистерезисная петля на экране не показывается). Здесь можно рассказать о явлении «наклепа».

Далее довести до разрушения. Следует отметить, что место разрушения по оси стержня заранее неизвестно.

### **4. Запись результатов испытания на растяжение**

Снять с диаграммы координаты характерных точек. Для этого нужно подвести указатель мыши на экране к соответствующей точке и записать на бланк (прил. № 1) значение силы и абсолютной деформации, которые фиксируются рядом с диаграммой.

Имеется возможность изменить масштаб изображения диаграммы с целью более детального осмотра определенных участков (например площадки текучести). Для этого нужно установить указатель мыши в пределах диаграммы и нажать левую

клавишу. При этом диаграмма растягивается по оси абсцисс и можно более точно определить координаты точек предела пропорциональности и конца площадки текучести.

Если затем нажать правую клавишу, то диаграмма восстанавливается по шагам до исходного вида.

При необходимости можно с помощью подменю «ЭКСПЕРИМЕНТ» вывести на принтер координаты точек диаграммы, построенной самописцем и бланк обработки полученных данных.

### **5. Обработка результатов испытаний**

Построить диаграмму в осях напряжение — относительная деформация и определить опасные напряжения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### СЖАТИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА С ПОСТРОЕНИЕМ ДИАГРАММЫ

Явление простого (равномерного) сжатия можно получить только у сравнительно коротких образцов; в случае длинных стержней одновременно со сжатием может возникнуть другое явление – так называемый продольный изгиб, который легко можно наблюдать, если попытаться сжать тонкую линейку в продольном направлении.

Оказывается, что явление чистого сжатия происходит в образце, длина которого не превышает пятикратной величины его меньшего поперечного размера. С другой стороны, так как при сжатии происходит увеличение поперечных размеров тела, то при очень малой высоте образца большое влияние на результат опыта оказывает трение, развивающееся по поверхностям давления пресса. Для того чтобы правильно судить о качестве различных материалов, существуют правила проведения испытаний и установлены стандартные размеры образцов (см. табл. 1).

Таблица 1

**Нормальные размеры образцов для испытания на сжатие**

Наименование материала	Размеры
Сталь (цилиндр)	$h = d = 2 \text{ см}$
Чугун (цилиндр)	$h = d = 2 \text{ см}$
Естественные камни	$7 \times 7 \times 7 \text{ см}^3$
Цементные камни (раствор)	$7 \times 7 \times 7 \text{ см}^3$
Бетон (куб)	$20 \times 20 \times 20$ – $30 \times 30 \times 30 \text{ см}^3$
Кирпич (кирпич, распиленный пополам)	$12 \times 12 \text{ см}^2$

**Цель работы:** Исследование свойств стали и чугуна при сжатии.

Характер разрушения при сжатии хрупких и пластичных материалов различен.

Диаграмма чугуна в начале прямолинейная. На этом участке диаграммы форма и размеры образца меняются незначительно. При приближении к максимальной нагрузке диаграмма становится более пологой и образец принимает слегка бочкообразную форму. Когда нагрузка достигает наибольшего значения, на поверхности образца появляются трещины под углом близким к  $45^\circ$  к оси – наступает разрушение, которое происходит в основном от сдвигов по площадкам с наибольшими касательными напряжениями. Большинство хрупких материалов (бетон, камень) разрушается при сжатии так же, как чугун, и имеет подобную диаграмму.

Пластичный материал, например низкоуглеродистая сталь, постепенно сжимается в прессе все нарастающей нагрузкой до тех пор, пока не будет приостановлен опыт; образец при этом может быть при отсутствии внешних повреждений спрессован в весьма тонкую пластинку. Первоначальный участок диаграммы сжатия стали – прямолинейный с тем же углом наклона, что и при растяжении. Это свидетельствует о том, что модуль упругости у стали при растяжении и сжатии можно принимать одинаковым. Значения предела пропорциональности и предела текучести стали при растяжении и сжатии практически одинаковы.

## **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ**

### **1. Управление движением верхним столом прессы**

Аналогично, как при растяжении.

### **2. Установка образца**

2.1. Открывается диалоговое окно «НАСТРОЙКА». Кроме настроек, описанных в п. 2.1.1 – 2.1.3. при растяжении, в случае сжатия нужно выбрать тип деформации из двух вариантов:

- сталь;
- чугун.

2.2. Выбор материала из базы данных. Аналогично с растяжением.

2.3. Установка образца между нижним и верхним столами пресса. Аналогично с растяжением — появляется образец в виде цилиндра в увеличенном виде.

### **3. Режим испытания на сжатие**

В окне «НАСТРОЙКА» по умолчанию устанавливаются размеры образцов в зависимости от строки «тип деформации». При желании их можно изменить, **но обязательно нужно установить:**

*Для стали:*

а) скорость деформирования — 0,002 (п.2.1.2.);

б) количество точек — 3 (п. 2.1.3.).

*Для чугуна:* рекомендуется начинать, **войдя в программу вновь**

а) скорость деформирования — 0,003 (п.2.1.2.);

б) количество точек — 2 (п. 2.1.3.).

### **4. Запись результатов испытаний на сжатие**

Снять с диаграммы координаты характерных точек. Для этого нужно подвести указатель мыши на экране к соответствующей точке и записать на бланк (прил. № 2) значение силы и абсолютной деформации, которые фиксируются рядом с диаграммой. При необходимости можно с помощью подменю «ЭКСПЕРИМЕНТ» вывести на принтер диаграмму, построенную самописцем и бланк обработки полученных данных.

### **5. Обработка результатов испытаний**

Построить диаграмму в осях напряжение — относительная деформация на бланке (прил. № 3).

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ИСПЫТАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ОБРАЗЦОВ НА СЖАТИЕ

**Цель работы:** Исследование свойств дерева при сжатии.

Диаграмма сжатия древесины существенно зависит от расположения волокон к направлению сжатия при испытании. Это характерно для анизотропных материалов.

При сжатии вдоль волокон на первоначальном участке древесина работает упруго с прямолинейной диаграммой. Разрушение образца происходит в результате потери местной устойчивости стенок ряда волокон древесины, проявляющейся в образовании характерной складки.

При сжатии образца поперек волокон до небольшой нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности, между нагрузкой и деформацией существует линейная зависимость. Затем деформации быстро увеличиваются, а нагрузка растет незначительно. В результате образец спрессовывается – уплотняется. Разрушающая нагрузка определяется условно.

Она соответствует деформации сжатия образца на 1/3 своей первоначальной высоты.

Сопротивление древесины сжатию вдоль волокон обычно в 8...10 раз больше сопротивления поперек волокон.

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

#### 1. Управление движением верхним столом пресса

Аналогично, как при растяжении.

#### 2. Установка образца

2.1. Открывается диалоговое окно «НАСТРОЙКА». Кроме настроек, описанных в п. 2.1.1 – 2.1.3. при растяжении (см. лаб. работу №1), в случае сжатия нужно выбрать тип деформации из двух вариантов:

- дерево вдоль волокон;
- дерево поперек волокон.

2.2. Выбор материала из базы данных. Аналогично с растяжением.

2.3. Установка образца между нижним и верхним столами пресса. Аналогично с растяжением — появляется образец в виде параллелепипеда в увеличенном виде.

### **3. Режим испытания на сжатие**

В окне «НАСТРОЙКА» по умолчанию устанавливаются размеры образцов в зависимости от строки «тип деформации». При желании их можно изменить, **но обязательно нужно установить:**

- для дерева вдоль волокон:
  - а) скорость деформирования — 0,001 (п.2.1.3.);
  - б) количество точек 7 (п. 2.1.3.);
- для дерева поперек волокон:
  - а) скорость деформирования 0.001 (п.2.1.3.);
  - б) количество точек 2 (п. 2.1.3.).

### **4. Запись результатов испытаний на сжатие**

Снять с диаграммы координаты характерных точек. Для этого нужно подвести указатель мыши на экране к соответствующей точке и записать на бланк (приложение № 2) значение силы и абсолютной деформации, которые фиксируются рядом с диаграммой. При необходимости можно с помощью подменю «ЭКСПЕРИМЕНТ» вывести на принтер диаграмму, построенную самописцем и бланк обработки полученных данных.

### **5. Обработка результатов испытаний**

Построить диаграмму в осях напряжение — относительная деформация на бланке (прил. № 2).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

**Цель работы:** экспериментальное определение величины модуля упругости и коэффициента Пуассона стали при растяжении.

Испытания проводятся с помощью разрывной машины Р-5 с максимальным усилием 49 кН (5 тс), вызывающей растяжение образца увеличением расстояния между захватами машины. Испытывается стальная полоса с проушинами для захватов в виде серег. Расчетный участок, подвергаемый центральному растяжению, имеет длину 0,23 м. Поперечное сечение полосы прямоугольное со сторонами  $0,006 \times 0,03$  м. На двух противоположных широких гранях полосы наклеивают по паре тензодатчиков с базой  $S = 0,02$  м. С помощью тензодатчиков можно экспериментально определить абсолютную деформацию участка  $S$  материала.

С помощью специальных приборов — *тензометров* — определяется абсолютное удлинение отрезка  $\Delta S$  и вычисляется средняя на длине базы относительная деформация  $\tilde{\epsilon} = \Delta S / S$ . Чем меньше база, тем ближе средняя величина относительной деформации к истинной. В данной работе применяются электрические тензометры — *датчики омического сопротивления* — представляющие собой константановую проволоку (сплав меди с никелем) диаметром 0,02 мм, наклеенную на бумагу в виде петель с двумя выводами, служащими для подключения к измерительной схеме. Сверху наклеивается защитная бумага. Датчики приклеиваются к балке карбинольным клеем. Сопротивление такого датчика составляет 150 Ом. Применение проволочных датчиков к измерению деформаций основано на полученной из опыта зависимости между отношением приращения сопротивления  $\Delta R$  к омическому сопротивлению  $R$  и относительной деформацией. Для датчика с константановой проволокой эта зависимость имеет вид:



$$\frac{\Delta R}{R} = 2,1\varepsilon .$$

При деформации материала под действием приложенной нагрузки, изменяется длина витков проволоки и, следовательно ее диаметр, что в свою очередь ведет к изменению омического сопротивления.

Из этой формулы ясно, что для измерения малых  $\Delta S$  требуются схемы высокой чувствительности, в данном случае – мостик сопротивлений. Ток в ветви гальванометра появляется только, когда изменяется сопротивление в рабочем датчике.

Величины абсолютных деформаций баз тензодатчиков, увеличенные в  $10^5$  раз, показываются в окне цифрового индикатора деформаций. Размерность в метрах. Имеется возможность последовательного просмотра показаний каждого тензодатчика.

Нагрузка  $P$  для полосы создается по следующей схеме: поднимается давление масла в гидросистеме, которое контролируется манометром; давление запускает гидромотор, который через редуктор вращает винт, обеспечивающий поступательное движение захвата.

Усилие на приводном винте машины  $P$  определяется по формуле:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \frac{p \cdot q \cdot u}{R \cdot \operatorname{tg} \alpha},$$

где  $p$  — давление, Па;

$q$  — объемная постоянная гидромотора,  $\text{м}^3/\text{рад}$ ;

$u$  — передаточное число редуктора;

$R$  — радиус винта, м;

$\alpha$  — угол подъема винтовой линии винта.

Для значений по умолчанию при  $p = 1$  МПа  $P = 5,7$  кН.

Имеется возможность в режиме «Настройка» установить контроль непосредственно за величиной силы – в этом случае расчет силы  $P$  выполняется по умолчанию.

В процессе проведения лабораторной работы определяются линейные деформации базы тензодатчиков вдоль и поперек оси полосы (стержня).

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. Нагружение и запись экспериментальных данных

1.1. Нажимается кнопка «Запустить гидронасос» — в динамиках включается характерный звук.

1.2. Курсор устанавливается на кнопку с голубой стрелкой вниз — включается режим «Нагрузить».

1.3. Курсор перемещается на красную кнопку «Останов», на которую нужно нажать, когда на динамометре стрелка достигнет отметки 4 кН.

1.4. Последовательное нажатие на кнопку «№» дает возможность записи отсчетов из окна индикатора в журнал испытаний показаний тензодатчиков, увеличенные в  $10^5$  раз. Журнал приводится в прил. №4.

1.5. Последовательно выполняются пункты 2,3,4, доводя силу  $P$  до величины 20 кН.

### 2. Обработка результатов испытаний

2.1. В таблице лабораторного журнала вычисляются разности показаний индикатора по каждому тензомеру на каждом шаге нагрузки и вычисляются четыре средние показания для интервала изменения нагрузки 4 кН:  $\Delta T_1^{\text{cp}}$ ,  $\Delta T_2^{\text{cp}}$ ,  $\Delta T_3^{\text{cp}}$ ,  $\Delta T_4^{\text{cp}}$ .

2.2. Вычисляются средние абсолютные деформации базы вдоль и поперек оси стержня-полосы по формулам:

$$\Delta S_{\text{прод}} = \frac{(\Delta_1^{\text{cp}} + \Delta_3^{\text{cp}})}{2} \cdot 10^{-5}; \quad \Delta S_{\text{попер}} = \frac{(\Delta_2^{\text{cp}} + \Delta_4^{\text{cp}})}{2} \cdot 10^{-5}.$$

3. Вычисляются продольная и поперечная относительные деформации, делением на базу  $S = 0,02$  м:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta S_{\text{прод}}}{0,02}; \quad \varepsilon_{\text{попер}} = \frac{\Delta S_{\text{попер}}}{0,02}.$$

2.4. Вычисляется коэффициент Пуассона

$$\mu = \frac{|\varepsilon_{\text{попер}}|}{\varepsilon_{\text{прод}}}$$

5. Вычисляется площадь поперечного сечения стержня-полосы

$$A = b \times h$$

6. Вычисляется нормальное напряжение в точках поперечного сечения

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

7. Вычисляется модуль упругости

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{прод}}}$$

## РАЗДЕЛ II. КРУЧЕНИЕ ВАЛОВ

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

#### ИСПЫТАНИЕ ВАЛОВ НА КРУЧЕНИЕ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ СДВИГЕ

**Цель работы:** испытание валов на кручение с определением модуля упругости при сдвиге.

Для испытания стержня круглого сечения применяют установку, показанную на фотографии (см. при нажатии кнопки «I» на панели инструментов). Вал жестко закреплен одним торцом от всех перемещений, а на другом снабжен подшипником, не препятствующим повороту опорного сечения относительно продольной оси. При этом перемещения в направлении перпендикулярном оси (изгибные) исключены постановкой опоры под подшипником. В двух сечениях, отстоящих друг от друга на расстоянии  $\ell$ , равном одной трети длины оси вала, к нему приварены две рамки, между которыми на расстоянии  $R$  от оси устанавливается индикатор часового типа. К подвижному торцу приварен рычаг с нагрузочной тарелкой. При приложении нагрузки к рычагу, создается момент, который вызывает кручение вала. При этом сечения вала поворачиваются относительно продольной оси на величину пропорциональную расстоянию этого сечения от заделки. Поэтому концы рамок, прикрепленные к разным сечениям получают разные перемещения вдоль оси индикатора. Величину этой разности  $\Delta h$  можно вычислить с помощью отсчета по шкале индикатора  $T$

$$\Delta h = T \cdot k ,$$

где  $k = 0,00001$  м — цена деления этой шкалы.

Учитывая малость всех перемещений по сравнению с длиной вала, можно считать, что  $\Delta h$  направлена перпендикулярно ра-

диусу  $R$  — расстоянию от оси вала до оси индикатора. Это дает возможность выразить взаимный угол поворота двух сечений относительно продольной оси через величину  $T$ , полученную экспериментально,

$$\varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \Delta h / R = T \cdot k / R .$$

Таким образом, при нагружении тарелки конкретным грузом  $P$  создается крутящий момент  $M = P \cdot L$ , который вызывает поворот  $\varphi$  одного сечения по отношению к другому, находящемуся на расстоянии  $\ell$  от первого.

Результаты этого эксперимента можно использовать для определения величины модуля упругости материала вала при сдвиге  $G$ . Теоретически величина угла закручивания участка  $\ell$  вала равна

$$\varphi = \frac{M \cdot \ell}{G \cdot J_p} .$$

Отсюда 
$$G = \frac{M \cdot \ell}{\varphi \cdot J_p} .$$

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. **Выбор материала вала.** Используя раздел меню «Помощь» — «Настройка эксперимента» выбирается материал.
2. Используя кнопку «**НАГРУЗИТЬ**» панели инструментов или клавишу «**СТРЕЛКА ВНИЗ**» на клавиатуре, положить груз  $P$  массой 1 кг на нагрузочную тарелку.
3. Снять отсчет по шкале индикатора и число записать в таблицу на бланке (прил. № 5).
4. Выполнить пункты 2 и 3 несколько раз.
5. Последовательно снять грузы, используя кнопку «**РАЗГРУЗИТЬ**» панели инструментов или клавишу «**СТРЕЛКА ВВЕРХ**» на клавиатуре, и убедиться, что материал при данном нагружении находится в стадии упругости.
6. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице и вычислить модуль упругости при сдвиге.

## РАЗДЕЛ III. ИЗГИБ БАЛОК

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ НА ЧИСТЫЙ ИЗГИБ

**Цель работы:** определение величины нормальных напряжений в пяти точках по высоте сечения двутавровой балки в условиях чистого изгиба и сравнение экспериментально полученной эпюры напряжений с теоретической; определение величин прогиба середины и угла поворота опорного сечения балки и сравнение их с теоретическими.

Экспериментальное определение напряжений у поверхности тела основано на методе тензометрии. Метод тензометрии состоит в измерении малых деформаций в отдельных точках конструкции и последующем переходе от них к напряжениям с использованием закона Гука. Для замера относительного удлинения на поверхности тела намечается отрезок, длина которого до деформации  $S$  называется базой. С помощью специальных приборов – **тензометров** – определяется абсолютное удлинение отрезка  $\Delta S$  и вычисляется средняя на длине базы относительная деформация  $\tilde{\epsilon} = \Delta S / S$ . Чем меньше база, тем ближе средняя величина относительной деформации к истинной. В данной работе применяются электрические тензометры – **датчики омического сопротивления** – представляющие собой константановую проволоку (сплав меди с никелем) диаметром 0,02 мм, наклеенную на бумагу в виде петель с двумя выводами, служащими для подключения к измерительной схеме. Сверху наклеивается защитная бумага. Датчики приклеиваются к балке карбинольным клеем. База  $S = 20$  мм. Сопротивление такого датчика составляет 150 Ом. Применение проволочных датчиков при измерении деформаций основано на полученной из опыта зависимости между отношением приращения сопротивления  $\Delta R$  к омическому сопротивлению  $R$  и относительной деформацией. Для датчика с константановой проволокой эта зависимость имеет вид:

$$\frac{\Delta R}{R} = 2,1\varepsilon.$$

Из этой формулы ясно, что для измерения малых  $\Delta R$  требуются схемы высокой чувствительности, в данном случае — мостик сопротивлений. Ток в ветви гальванометра появляется только, когда изменяется сопротивление в рабочем датчике.

Чистый изгиб создается на среднем участке шарнирно опертой балки нагруженной двумя равными силами, приложенными на равных расстояниях от опор (симметричное нагружение). В сечениях этого участка изгибающий момент имеет постоянное значение (поперечная сила равна нулю).

При чистом изгибе балок у ненагруженных поверхностей имеет место линейное напряженное состояние. При этом напряжения связаны с относительными деформациями законом Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

Таким образом, зная экспериментально величину относительной деформации, можно вычислить напряжение по тому же направлению.

Тензодатчики наклеены в пяти точках на разной высоте от нейтральной оси поперечного сечения:

$$y_1 = h/2; y_2 = h/4; y_3 = 0; y_4 = -h/4; y_5 = -h/2.$$

Величины абсолютных деформаций баз тензодатчиков, увеличенные в  $10^5$  раз, показываются в окне цифрового индикатора деформаций. Размерность в метрах. Имеется возможность последовательного просмотра показаний каждого тензодатчика.

Под серединой балки установлен индикатор часового типа №1 для измерения прогиба, а в торце балки на приваренной консоли в горизонтальном направлении на расстоянии 0,5 м от оси балки — индикатор №2 для определения угла поворота опорного сечения.

Нагружение производится с помощью гидравлического домкрата и контролируется манометром, показывающим давление масла в гидросистеме, или динамометром (по выбору).

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Настройка параметров. Используя раздел меню «Помощь» — «Настройка эксперимента» выбирается материал балки, размеры поперечного сечения и способ контроля за нагрузкой: либо измеряя давление масла в гидроцилиндре с помощью манометра, либо, в пересчете по умолчанию, с помощью динамометра.
2. Запустить гидронасос.
3. Нажатием кнопки «СТРЕЛКА ВНИЗ» на панели инструментов довести стрелку манометра до отметки 2 МПа, что соответствует усилию 2 кН по шкале динамометра.
4. Щелкая мышью по кнопке «ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ КАНАЛОВ», последовательно соединить электрический мост с клеммами соответствующих тензодатчиков № 1–5 и записать числовые значения в окне измерителя деформаций в графы  $T_1 \div T_5$  таблицы на бланке (прил. № 6).
5. Снять отсчеты по шкалам индикаторов часового типа № 1, 2 и записать их в графы  $T_{y1}, T_{y2}$  той же таблицы.
6. Последовательно увеличивая давление масла равными шагами по шкале манометра или силы по шкале динамометра, выполнить на каждом шаге п.п. 3 и 4.
7. Выключить гидронасос.
8. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице, построить эпюры нормальных напряжений по высоте сечения балки по данным опыта и по теории. Сравнить прогиб в середине пролета и угол поворота опорного сечения по данным опыта и по теории (прил. № 6).



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

# ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ

**Цель работы:** определение величины нормальных напряжений в пяти точках по высоте сечения двутавровой изгибаемой балки и сравнение экспериментально полученной эпюры напряжений с теоретической; определение величин прогиба середины и угла поворота опорного сечения балки и сравнение их с теоретическими.

Экспериментальное определение напряжений у поверхности тела основано на методе тензометрии. Метод тензометрии состоит в измерении малых деформаций в отдельных точках конструкции и последующем переходе от них к напряжениям с использованием закона Гука. Для замера относительного удлинения на поверхности тела намечается отрезок, длина которого до деформации  $S$  называется базой. С помощью специальных приборов – **тензометров** – определяется абсолютное удлинение отрезка и вычисляется средняя на длине базы относительная деформация  $\tilde{\epsilon} = \Delta S / S$ . Чем меньше база, тем ближе средняя величина относительной деформации к истинной. В данной работе применяются электрические тензометры – **датчики омического сопротивления** – представляющие собой константановую проволоку (сплав меди с никелем) диаметром 0,02 мм, наклеенную на бумагу в виде петель с двумя выводами, служащими для подключения к измерительной схеме. Сверху наклеивается защитная бумага. Датчики приклеиваются к балке карбинольным клеем. База  $S = 20$  мм. Сопротивление такого датчика составляет 150 Ом. Применение проволочных датчиков к измерению деформаций основано на полученной из опыта зависимости между отношением приращения сопротивления  $\Delta R$  к омическому сопротивлению  $R$  и относительной деформацией. Для датчика с константановой проволокой эта зависимость имеет вид:

$$\frac{\Delta R}{R} = 2,1\epsilon.$$

Из этой формулы ясно, что для измерения малых  $\Delta R$  требуются схемы высокой чувствительности, в данном случае – мостик сопротивлений. Ток в ветви гальванометра появляется только, когда изменяется сопротивление в рабочем датчике.

При чистом изгибе балок у ненагруженных поверхностей имеет место линейное напряженное состояние. При этом напряжения связаны с относительными деформациями законом Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

Таким образом, зная экспериментально найденную величину относительной деформации, можно вычислить напряжение по тому же направлению. При поперечном изгибе на самом деле имеет место плоское напряженное состояние, но при выводе формулы для нормального напряжения поперечным обжатием пренебрегают и считают напряженное состояние линейным. Это обстоятельство станет причиной отличия теоретической и экспериментальной эпюр напряжений.

Тензодатчики наклеены в пяти точках на разной высоте от нейтральной оси поперечного сечения:

$$y_1 = h/2; y_2 = h/4; y_3 = 0; y_4 = -h/4; y_5 = -h/2.$$

Величины абсолютных деформаций баз тензодатчиков, в м, увеличенные в  $10^5$  раз, показываются в окне цифрового индикатора деформаций. Существует возможность последовательного просмотра показаний каждого тензодатчика.

Под серединой балки установлен индикатор часового типа №1 для измерения прогиба, а под консолью на расстоянии 0,1 м от оси опоры – №2 для определения угла поворота опорного сечения.

Нагружение производится с помощью гидравлического домкрата и контролируется манометром, показывающим давление масла в гидросистеме, или динамометром (по выбору).

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Настройка параметров. Используя раздел меню «Помощь» — «Настройка эксперимента» выбирается материал балки, размеры поперечного сечения.
2. Запустить гидронасос.
3. Нажатием кнопки «СТРЕЛКА ВНИЗ» на панели инструментов довести стрелку манометра до отметки 4 МПа, что соответствует усилию 20 кН.
4. Щелкая мышью по кнопке «ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ КАНАЛОВ», последовательно соединить электрический мост с клеммами соответствующих тензодатчиков № 1–5 и записать числовые значения в окне измерителя деформаций в графы таблицы на бланке (прил. № 7).
5. Снять отсчеты по шкалам индикаторов часового типа №№1,2 и записать их в графы той же таблицы.
6. Последовательно увеличивая давление масла равными шагами по шкале манометра, выполнить на каждом шаге п.п. 3 и 4.
7. Выключить гидронасос.
8. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице, построить эпюры нормальных напряжений по высоте сечения балки по данным опыта и по теории. Сравнить прогиб в середине пролета и угол поворота опорного сечения по данным опыта и по теории (прил. № 7).

## РАЗДЕЛ IV. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ВНЕЦЕНТРЕННОЕ РАСТЯЖЕНИЕ СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ

**Цель работы:** экспериментальное определение нормальных напряжений в поперечном сечении внецентренно растянутого стержня и сравнение их с напряжениями в том же сечении, вычисленными теоретически.

При внецентренном растяжении в поперечном сечении возникают два внутренних силовых фактора: нормальная сила  $N = P$  и изгибающий момент  $M = P \cdot e$ , где  $e$  – эксцентриситет приложения силы по отношению к центру тяжести сечения. Нормальные напряжения от двух этих факторов алгебраически складываются. При этом на разных краях поперечного сечения они различаются по величине, а иногда и по знаку. В эксперименте достаточно определить нормальные напряжения в двух точках 1 и 2. Для этого, так же как в лабораторной работе № 5 применяется метод тензометрии, но в данной работе для определения абсолютной деформации базы применяются *рычажные тензометры*. На экране показана схема такого прибора. Тензометр представляет собой жесткую рамку, соприкасающуюся с образцом в одной точке неподвижным острием, а в другой с помощью подвижной призмочки, соединенной с качающимся стержнем, который в свою очередь соединен со стрелкой, указывающей отсчет по шкале. При деформации расстояние между точками изменяется, и стрелка тензометра это фиксирует. База прибора, то есть расстояние между подвижным и неподвижным остриями в этом приборе равна  $S = 2$  см. Цена деления шкалы тензометра  $m = 0,0001$  см.

Эксцентриситет приложения растягивающей нагрузки  
 $e = 3$  см = 0,03 м.

Ширина сечения  $b = 2$  см = 0,02 м.

Высота сечения  $h = 6$  см = 0,06 м.

Усилие на приводном винте машины  $P$  определяется по формуле:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \frac{p \cdot q \cdot u}{R \cdot \operatorname{tg} \alpha},$$

где  $p$  — давление, Па;  
 $q$  — объемная постоянная гидромотора, м<sup>3</sup>/рад;  
 $u$  — передаточное число редуктора;  
 $R$  — радиус винта, м;  
 $\alpha$  — угол подъема винтовой линии винта.

Эти параметры приведены в диалоговом окне «настройки» и в справочной системе.

Для значений по умолчанию при  $p = 1$  МПа  $P = 5,7$  кН.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Нажатием кнопки «**НАГРУЗИТЬ**» на панели управления, довести стрелку динамометра до отметки 4 кН.
2. По шкале левого и правого тензометров снять показания  $T_1$  и  $T_2$  и записать их в соответствующие графы таблицы на бланке прил. № 8.
3. Последовательно увеличивая давление в гидросистеме равными порциями по шкале манометра, выполнить на каждом шаге п.2.
4. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице, построить эпюры нормальных напряжений по высоте сечения стержня по данным опыта и по теории (прил. № 8).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ

**Цель работы:** экспериментальное определение нормальных напряжений в поперечном сечении внецентренно сжатого стержня круглого поперечного сечения и сравнение их с напряжениями в том же сечении, вычисленными теоретически.

При внецентренном сжатии в поперечном сечении возникают два внутренних силовых фактора: нормальная сила  $N = P$  и изгибающий момент  $M = P \cdot e$ , где  $e$  – эксцентриситет приложения силы по отношению к центру тяжести сечения. Нормальные напряжения от двух этих факторов алгебраически складываются. При этом на разных краях поперечного сечения они различаются по величине, а иногда и по знаку. В эксперименте определяются нормальные напряжения в четырех наиболее удаленных от центра точках. Две точки 1 и 3 находятся в главной плоскости инерции, в которой действует изгибающий момент, а две другие 2 и 4 – в главной плоскости, перпендикулярной первой. Для этого, так же как в лабораторной работе № 5 применяется метод тензометрии. На поверхности стержня в местах, соответствующих указанным точкам наклеены тензодатчики с базой, равной  $S = 2$  см. Величины абсолютных деформаций баз тензодатчиков, в м, увеличенные в  $10^5$  раз, показываются в окне цифрового индикатора деформаций. Существует возможность последовательного просмотра показаний каждого тензодатчика.

Стержень длиной 0,3 м. Диаметр поперечного сечения 0,08 м. Эксцентриситет приложения растягивающей нагрузки  $e = 2$  см = 0,02 м.

Усилие от пресса передается через шарики в точках половины радиуса поперечного сечения и направлено параллельно оси стержня.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Настройка параметров. Выбрать способ контроля величины нагрузки: с помощью динамометра, или по манометру.
2. Включить гидронасос.
3. Нажатием кнопки «**НАГРУЗИТЬ**» на панели управления, довести стрелку динамометра до отметки 30 кН.
4. Щелкая мышью по кнопке «**ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ КАНАЛОВ**», последовательно соединить электрический мост с клеммами соответствующих тензодатчиков №1–4 и записать числовые значения из окна измерителя деформаций в графы  $T_1$  –  $T_4$  таблицы на бланке (прил. № 9).
5. Последовательно увеличивая давление масла равными шагами по шкале манометра или динамометра, выполнить на каждом шаге п.п. 3 и 4.
6. Выключить гидронасос.
7. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице, построить эпюры нормальных напряжений по диаметру сечения балки по данным опыта и по теории. Сравнить обе эпюры.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### ИСПЫТАНИЕ БАЛКИ НА КОСОЙ ИЗГИБ

**Цель работы:** определение величины перемещения центра сечения на свободном конце консольной балки и сравнение ее с теоретической.

Косым изгибом называется такое нагружение балки поперечной нагрузкой, когда в поперечном сечении возникают два изгибающие моменты относительно главных центральных осей инерции поперечного сечения.

Косой изгиб бывает двух видов: плоский и пространственный. При плоском изгибе вся поперечная нагрузка лежит в одной плоскости, проходящей через ось балки и не совпадающей ни с одной из главных плоскостей инерции балки.

В лабораторной работе рассматривается балка, жестко защемленная одним концом и свободная на другом. На свободном конце приложена сосредоточенная сила веса груза. Испытательная установка дает возможность менять положение главных осей инерции поперечного сечения относительно плоскости действия сосредоточенного груза. При этом с помощью струбцины оси двух индикаторов всегда устанавливаются вдоль главных осей инерции. Таким образом, можно экспериментально определить составляющие прогиба вдоль главных осей. При этом плоскость, в которой лежат центры тяжести сечений балки (упругая линия), не совпадает с плоскостью действия нагрузки.

В нашем случае главная центральная ось  $U$  параллельна большей стороне прямоугольника. Положительное направление поворота оси  $U$  к плоскости действия силы  $\alpha$  — против часовой стрелки при взгляде на сечение со свободного конца балки.

С теоретической точки зрения косой изгиб можно рассматривать как совокупность двух плоских поперечных изгибов. При этом внешняя нагрузка раскладывается по направлению главных центральных осей инерции поперечного сечения.



## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Настройка параметров. Используя раздел «I» панели инструментов выбирается материал балки, размеры поперечного сечения и угол наклона оси  $U$  относительно направления силы..
9. Нажатием кнопки «СТРЕЛКА ВНИЗ», загрузить балку грузом весом 10 Н.
10. Снять отсчеты по шкалам индикаторов часового типа №1, 2 и записать их в графы  $T_x$ ,  $T_y$  той же таблицы.
11. Последовательно увеличивая величину сосредоточенной силы  $P$ , выполнить на каждом шаге п. 3 .
12. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице. Сравнить прогиб на конце балки по данным опыта и по теории (прил. № 10).
13. Найти угол между плоскостью нагрузки и плоскостью прогиба.

## РАЗДЕЛ V. УСТОЙЧИВОСТЬ

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА СТЕРЖНЯ БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ

**Цель работы:** изучение продольно-поперечного изгиба стержня в пределах упругих деформаций, опытное определение прогибов сжато-изогнутого стержня и на основе анализа изменения этих прогибов — определение величины критической сжимающей силы для шарнирно опертого стержня.

В эксперименте нагружается шарнирно опертая балка, которая испытывает одновременно сжатие с поперечным изгибом (продольно-поперечный изгиб). Установка показана на дисплее. Постоянной поперечной нагрузкой служит вес груза  $G$ . Под нагрузкой установлен индикатор часового типа для определения прогиба. В этом испытании балка уже изогнута до возникновения сжимающей силы, а при увеличении этой силы прогиб балки увеличивается непропорционально величине силы. Можно построить график зависимости прогиба балки от величины сжимающей силы. При приближении силы к величине, определяемой по формуле Эйлера, ординаты прогиба середины балки на графике неограниченно увеличиваются в соответствии с формулой

$$y = \frac{y_0}{1 - \frac{P}{P_{\text{Э}}}},$$

где  $y_0$  — прогиб середины балки от поперечной нагрузки (веса груза  $G$ ), определяемый по формуле

$$y_0 = \frac{Gl^3}{48 \cdot EJ},$$

$P$  — сжимающая сила,

$$P_3 = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{l^2}.$$

Построив график  $y = y(P)$ , можно найти абсциссу вертикальной асимптоты, которая численно близка к величине критической силы для шарнирно опертого стержня.

Размеры стержня можно получить, щелкнув по кнопке «**ПАРАМЕТРЫ СТЕНДА**».

Ширина поперечного сечения (в плоскости, перпендикулярной плоскости продольного изгиба)  $b = 0,022$  м.

Высота поперечного сечения  $h = 0,004$  м.

Длина стержня  $l = 0,53$  м.

Величина поперечной нагрузки при продольно-поперечном изгибе  $G = 0,001$  кН.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Щелкнув мышью по кнопке «**ПАРАМЕТРЫ СТЕНДА**», выбрать эксперимент продольно-поперечного изгиба и, увеличивая сжимающую нагрузку малыми порциями, на каждом шаге фиксировать отсчет по индикатору часового типа, который записать в таблицу на бланке прил. № 11. По данным опыта построить график  $y = y(P)$  и, экстраполируя, определить приближенное значение  $P_{кр}$  для шарнирно опертого стержня.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОТЕРИ**  
**УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ СЖАТИИ СТЕРЖНЯ**  
**БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ**

**Цель работы:** изучение продольного изгиба стержня в пределах упругих деформаций, опытное определение величины критической силы и сравнение ее с теоретическим значением, вычисленным по формуле Эйлера.

Теоретически, при центральном сжатии в сечении стержня должны появиться нормальные сжимающие напряжения, равномерно распределенные по площади сечения. Это будет иметь место в идеальном случае: ось стержня идеально прямая, сила приложена точно в центре тяжести сечения и направлена по оси, отсутствуют воздействия, направленные поперек оси стержня.

На практике идеального нагружения достичь невозможно — всегда будут иметь место *малые возмущения*, изгибающие стержень с самого начала. Это могут быть малые отклонения оси от идеальной прямой, воздействие температуры, поперечное воздействие ветра или их сочетания, предусмотреть которые заранее невозможно.

Проектировщик должен быть убежден, что состояние сжатия от малых возмущений резко не изменится — оно будет *устойчиво* к этим возмущениям.

Оказывается, что если сжимающая сила меньше определенного значения, называемого критическим, то малые возмущения приводят к малым отклонениям стержня от прямой. Если возмущения исчезают, то стержень возвращается в исходное сжатое состояние, если же возмущения не исчезают, то вызванные ими отклонения незначительны. В этом случае обеспечена *устойчивость центрального сжатия*. Но если сжимающая сила достигнет критического значения, то действие малых возмущений становится существенно заметным — стержень получает большие отклонения оси от проектной прямой, т. е. становится

сжато-изогнутым и не возвращается в исходное состояние после исчезновения возмущения. Это явление называют *потерей устойчивости центрального сжатия* или *продольным изгибом*.

Для длинных стержней такое состояние наступает при сжимающих напряжениях меньших предела пропорциональности – в упругой стадии. Оно опасно для самого стержня, так как он не был рассчитан на действие дополнительного изгибающего момента, но более всего для *конструкции*, в состав которой он входит – потеря устойчивости одного стержня может быть причиной разрушения всей конструкции, так как в этот момент стержень внезапно выключается из состава конструкции – исчезает необходимая связь.

Сказанное выше определяет важность знания величины критической силы  $P_{кр}$ .

Из курса «Сопротивление материалов» известно, что  $P_{кр}$  зависит от величины гибкости

$$\lambda = \frac{\mu l}{i},$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий условия закрепления торцов сжатого стержня (см. таблицу);

$l$  – длина стержня (расстояние между опорами);

$i$  – радиус инерции поперечного сечения относительно оси перпендикулярной плоскости, в которой рассматривается возможное выпучивание.

$\mu$	Условия закрепления концов стержня
1	Шарниры по концам
2	Жесткое защемление одного при свободном другом
0,7	Жесткое защемление одного и шарнир на другом
0,5	Жесткое защемление по концам

Для стержней большой гибкости, когда  $\lambda > \lambda_0$ ,  $P_{кр}$  вычисляется по формуле Эйлера.

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{(\mu l)^2},$$

где  $E$  — модуль упругости материала;  $J$  — главный, центральный момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба;  $\lambda_0$  — предельная гибкость, величина зависящая от физических свойств материал

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{\text{пц}}}},$$

где  $\sigma_{\text{пц}}$  — предел пропорциональности.

Для стержней малой гибкости ( $\lambda \leq \lambda_0$ ) критическая сила находится по формуле Ясинского-Тетмайера.

В данной лабораторной работе используются стержни большой гибкости. Увеличивая сжимающую силу, отмечают момент начала заметного выпучивания и фиксируют экспериментальное значение критической силы.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Щелкнуть мышью по кнопке «ПАРАМЕТРЫ СТЕНДА» и затем выбрать тип закреплений концов стержня.
2. Запустить гидронасос.
3. Нажатием кнопки «НАГРУЗИТЬ» довести давление в гидросистеме до значения, соответствующего появлению выпучивания и записать результат на бланке прил. №12. При каждом шаге нагружения давление в МПа фиксируется манометром. Для удобства имеется окно с значением сжимающей силы.
4. Определить величину критической по формуле Эйлера и сравнить с результатом опыта.
5. В данной версии при достижении критической силы увеличение сжимающей нагрузки на графике прекращается — устанавливается безразличное равновесие. Дополнительное нажатие кнопки «НАГРУЗИТЬ» приводит к потере устойчивости центрального сжатия.

## РАЗДЕЛ VI. УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

**Цель работы:** определение с помощью маятникового копра величины ударной вязкости стандартного образца по ГОСТ 9454-60 сечением  $10 \times 10$  мм и длиной пролета 40 мм, имеющего в середине пролета надрез на глубину 2 мм.

Согласно ГОСТ 9454-60 ударная вязкость  $kНм/см^2$  равна

$$a = \frac{A}{F},$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на излом;

$F$  – площадь поперечного сечения в плоскости надреза.

Маятник копра поднимается на высоту  $H$  и фиксируется, в самой низкой точке траектории движения устанавливается образец надрезом в сторону движения, отпущенный маятник ломает образец и взлетает на высоту  $h$ , меньшую, чем  $H$ .

Таким образом,

$$A = P (H - h),$$

где  $P$  – вес маятника, который через заданную массу выражается следующим образом:

$$P = m g, \quad g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Настройка параметров. Используя раздел «I» панели инструментов выбирается материал образца, размеры поперечного сечения.

2. Нажатием и удержанием стрелки «вверх» поднимается маятник на высоту  $H$ . Это положение фиксируется. На циферблате черная стрелка показывает отсчет, который записывается в журнал наблюдений в графе  $T_{\text{макс}}$ .
3. Устанавливается образец, нажатием клавиши со схемой образца красного цвета.
4. Нажатием кнопки «СТРЕЛКА ВНИЗ» на панели инструментов освобождается маятник. Образец разрушается.
5. В журнал в графе  $T_{\text{мин}}$  записывается цифра, на которую указывает красная стрелка.
6. Последовательно меняя материал образца, выполнить п.п. 1 – 5.
7. Обработать полученные экспериментальные данные в таблице, определить ударную вязкость для различных материалов и сделать выводы (прил. № 13). При этом следует иметь в виду, что для экономии места на шкале энергии показывается число десятков делений, что и учтено в таблице обработки данных.



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**  
**РАСТЯЖЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА**  
**С ПОСТРОЕНИЕМ ДИАГРАММЫ**

**Машина: Разрывная ГМС – 50**  
**Диаметр образца 20 мм**  
**Расчетная длина 200 мм**

Таблица значений, снятых с диаграммы, построенной самописцем в осях  $P, \Delta\ell$

№ п/п	Координаты точки на диаграмме	Марка стали	Марка стали или чугуна
1	Сила в кН, соответствующая пределу пропорциональности $P_{\text{пц}} =$		
2	Сила в кН, соответствующая пределу текучести $P_{\text{Т}} =$		
3	Сила в кН, соответствующая пределу временного сопротивления $P_{\text{вр}} =$		
4	Сила в кН, соответствующая разрыву образца $P_{\text{р}} =$		
5	Абсолютная деформация в м, соответствующая пределу пропорциональности $\Delta\ell_{\text{пц}} =$		
6	Абсолютная деформация в м, соответствующая концу площадки текучести $\Delta\ell_{\text{Т}} =$		
7	Абсолютная деформация в м, соответствующая пределу временного сопротивления $\Delta\ell_{\text{вр}} =$		
8	Абсолютная деформация в м, соответствующая разрыву образца $\Delta\ell_{\text{р}} =$		

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Площадь поперечного сечения образца до испытания

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \quad \text{м}^2.$$

Таблица вычисления координат точек диаграммы растяжения в осях  $\sigma$ ,  $\xi$

№ п/п	Координаты точки на диаграмме	Марка стали	Марка стали или чугуна
1	Предел пропорциональности в МПа $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
2	Предел текучести в МПа $\sigma_{\text{T}} = \frac{P_{\text{T}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
3	Предел временного сопротивления в МПа $\sigma_{\text{вР}} = \frac{P_{\text{вР}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
4	Относительная деформация, соответствующая пределу пропорциональности $\xi_{\text{пц}} = \frac{\Delta \ell_{\text{пц}}}{\ell} =$		
5	Относительная деформация, соответствующая концу площадки текучести $\xi_{\text{T}} = \frac{\Delta \ell_{\text{T}}}{\ell} =$		
6	Относительная деформация, соответствующая пределу врем. сопротивления $\xi_{\text{вР}} = \frac{\Delta \ell_{\text{вР}}}{\ell} =$		

**Диаграммы в осях  $P, \Delta \ell$**

$P$									
0									$\Delta \ell$

**Диаграммы в осях  $\sigma, \xi$**

$\sigma$									
0									$\xi$

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**  
**СЖАТИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА**  
**С ПОСТРОЕНИЕМ ДИАГРАММЫ**

**Машина: ПГ- 100А**  
**Диаметр образца 20 мм**  
**Высота 20 мм**

Таблица значений, снятых с диаграммы, построенной самописцем в осях  $P$ ,  $\Delta\ell$ .

№ п/п	Координаты точки на диаграмме	Марка стали	Марка чугуна
1	Сила в кН, соответствующая пределу пропорциональности $P_{\text{пл}} =$		
2	Сила в кН, соответствующая пределу текучести $P_{\text{т}} =$		
3	Сила в кН, соответствующая разрушению образца $P_{\text{р}} =$		
4	Абсолютная деформация в м, соответствующая пределу пропорциональности $\Delta\ell_{\text{пл}} =$		
5	Абсолютная деформация в м, соответствующая разрушению образца $\Delta\ell_{\text{р}} =$		

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Площадь поперечного сечения образца до испытания

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \text{_____} \text{ м}^2$$

Таблица вычисления координат точек диаграммы сжатия в осях  $\sigma$ ,  $\xi$

№ п/п	Координаты точки на диаграмме	Марка стали	Марка чугуна
1	Предел пропорциональности в МПа $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
2	Предел текучести в МПа $\sigma_{\text{Т}} = \frac{P_{\text{Т}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
3	Напряжение при разрушении в МПа $\sigma_{\text{Р}} = \frac{P_{\text{Р}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
4	Относительная деформация, соответствующая пределу пропорциональности $\xi_{\text{пц}} = \frac{\Delta l_{\text{пц}}}{\ell} =$		
5	Относительная деформация, соответствующая концу площадки текучести $\xi_{\text{Т}} = \frac{\Delta l_{\text{Т}}}{\ell} =$		
6	Относительная деформация, соответствующая разрушению $\xi_{\text{Р}} = \frac{\Delta l_{\text{Р}}}{\ell} =$		

**Диаграммы в осях  $P, \Delta\ell$**

$P$									
0									$\Delta\ell$

**Диаграммы в осях  $\sigma, \xi$**

$\sigma$									
0									$\xi$

Подпись студента \_\_\_\_\_

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**  
**ИСПЫТАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ОБРАЗЦОВ**  
**НА СЖАТИЕ**

**Машина: ПГ- 100А**

**Образец: сосновый кубик  $5 \times 5 \times 5$  см**

Таблица значений, снятых с диаграммы, построенной самописцем в осях  $P, \Delta \ell$ .

№ п/п	Координаты точки на диаграмме	Вдоль волокон	Поперек волокон
1	Сила в кН, соответствующая пределу пропорциональности $P_{\text{пц}} =$		
2	Сила в кН, соответствующая разрушению образца $P_{\text{р}} =$		
3	Абсолютная деформация в м, соответствующая пределу пропорциональности $\Delta \ell_{\text{пц}} =$		
4	Абсолютная деформация в м, соответствующая разрушению образца $\Delta \ell_{\text{р}} =$		

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Площадь поперечного сечения образца  $F = 5 \times 5 = 25 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Таблица вычисления координат точек диаграммы сжатия в осях  $\sigma, \xi$

№ п/п	Координаты точки на диаграмме	Вдоль волокон	Поперек волокон
1	Предел пропорциональности в МПа $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}} \cdot 10^{-3}}{F} =$		
2	Напряжение при разрушении в МПа $\sigma_P = \frac{P_P \cdot 10^{-3}}{F} =$		
3	Относительная деформация, соответствующая пределу пропорциональности $\xi_{\text{пц}} = \frac{\Delta \ell_{\text{пц}}}{\ell} =$		
4	Относительная деформация, соответствующая разрушению $\xi_P = \frac{\Delta \ell_P}{\ell} =$		

### Диаграммы в осях $P, \Delta \ell$

$P$									
0									$\Delta \ell$



Диаграммы в осях  $\sigma, \xi$

$\sigma$									
0									$\xi$

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ  
И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА СТАЛИ**

**Машина: Разрывная Р – 5  
Ширина сечения  $b = 30$  мм  
Высота сечения  $h = 6$  мм  
Расчетная длина участка 230 мм**

**Журнал испытаний**

Нагрузка $P$ , кН	$T_1$	$\Delta T_1$	$T_2$	$\Delta T_2$	$T_3$	$\Delta T_3$	$T_4$	$\Delta T_4$
4								
8								
12								
16								
20								
$\Delta T_1^{cp}$			$\Delta T_2^{cp}$		$\Delta T_3^{cp}$		$\Delta T_4^{cp}$	

Вычисление:

1. Абсолютная деформация базы тензометра:  
вдоль и поперек оси

$$\Delta S_{\text{прод}} = \frac{(\Delta T_1^{cp} + \Delta T_3^{cp})}{2} \cdot 10^{-5} =$$

$$\Delta S_{\text{попер}} = \frac{(\Delta T_2^{cp} + \Delta T_4^{cp})}{2} \cdot 10^{-5} =$$

2. Вычисляются продольная и поперечная относительные деформации, делением на базу  $S = 0,02$  м:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta S_{\text{прод}}}{0,02} =$$

$$\varepsilon_{\text{попер}} = \frac{\Delta S_{\text{попер}}}{0,02} =$$

3. Вычисляется коэффициент Пуассона

$$\mu = \frac{|\varepsilon_{\text{попер}}|}{\varepsilon_{\text{прод}}} =$$

4. Вычисляется площадь поперечного сечения стержня-палосы

$$A = b \times h = \quad \text{м}^2.$$

5. Вычисляется нормальное напряжение в точках поперечного сечения

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad \text{МПа}.$$

6. Вычисляется модуль упругости

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{прод}}} = \quad \text{МПа}.$$

Выводы: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5**  
**ИСПЫТАНИЕ ВАЛОВ НА КРУЧЕНИЕ**  
**С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ**  
**ПРИ СДВИГЕ**

**Машина: Установка на кручение**

**Материал – сталь; диаметр вала  $d = 0,016$  м**

**Длина расчетного участка  $l = 0,19$  м; расстояние индикатора от оси вала  $R = 0.1$  м; длина рычага  $L = 1$  м;  $P = 0,01$  кН**

**Таблица экспериментальных данных при кручении вала**

Крутящий момент $M$ , кНм	Приращение крутящего момента $\Delta M$ , кНм	Показание индикатора $T$	Приращение показания индикатора $\Delta T$
		$\Delta T_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i}{n} =$	

Угол закручивания

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T_{\text{ср}} \cdot k}{R} =$$

Полярный момент инерции

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32} =$$

Модуль упругости при сдвиге

$$G = \frac{\Delta M \cdot l}{\Delta\varphi \cdot J_p} =$$

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6**  
**ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ**  
**НА ЧИСТЫЙ ИЗГИБ**

(Направить шкалу динамометра и манометра:  
 уменьшить цифры вдвое!)

**Машина: Установка для испытаний на изгиб**  
**Сечение балки – двутавр № 10**

В дальнейшем **расчетные параметры:**

$l = 2$  м — пролет балки;

$k_T = 10$  м — коэффициент увеличения прибором абсолютной деформации базы тензодатчика;

$k = 10$  м — цена деления индикатора часового типа;

$J_x^u = 245 \cdot 10^{-8}$  м<sup>4</sup> — момент инерции сечения балки относительно нейтральной оси;

$E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа — модуль упругости материала балки

$a = 1$  м — расстояние от оси опоры до расчетного сечения

$L = 0,45$  м — расстояние между сосредоточенными силами

$b^p = 0,5$  м — высота подъема оси индикатора №2 по отношению к оси балки

**Экспериментальные величины:**

Нормальные напряжения

$$\sigma_i = \frac{\Delta T_{\text{ср}i}}{0,02 \cdot k_T} \cdot E =$$

$$\sigma_1 = \qquad \qquad \qquad \sigma_2 =$$

$$\sigma_3 =$$

$$\sigma_4 = \qquad \qquad \qquad \sigma_5 =$$

Прогиб середины балки

$$f = k_u \cdot \Delta T_{\text{ср}1}$$

Угол поворота опорного сечения

$$\varphi = \frac{k_u \cdot \Delta T_{\text{ср}2}}{b}$$

Таблица экспериментальных данных при изгибе двутавровой балки

$P$	$\Delta P$	$T_1$	$\Delta T_1$	$T_2$	$\Delta T_2$	$T_3$	$\Delta T_3$	$T_4$	$\Delta T_4$	$T_5$	$\Delta T_5$	$T_{y_1}$	$\Delta T_{y_1}$	$T_{y_2}$	$\Delta T_{y_2}$

**Теоретические величины:**

Приращение изгибающего момента в расчетном сечении

$$\Delta M = \Delta P \cdot (l - L_p) / 2$$

Нормальные напряжения

$$\sigma_1 = \qquad \qquad \qquad \sigma_2 =$$

$$\sigma_3 =$$

$$\sigma_4 = \qquad \qquad \qquad \sigma_5 =$$

Прогиб балки в середине

$$f = \frac{\Delta P \cdot (l - L_p)}{E \cdot J_x} \left[ \frac{(l - L_p)^2}{24} + \frac{(2l - L_p)L_p}{16} \right] =$$

Угол поворота опорного сечения

$$\varphi = \frac{\Delta P \cdot (l - L_p)}{2 \cdot E \cdot J_x} \left[ \frac{(2l + L_p)(l - L_p)}{12l} + \frac{L_p}{2} + \frac{(l - L_p)^2}{12l} \right] =$$

Выводы: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ

**Машина: Установка для испытаний на изгиб  
Сечение балки – двутавр № 20 а**

В дальнейшем **расчетные параметры:**

$k_T = 10$  м — коэффициент увеличения прибором абсолютной деформации базы тензодатчика,

$k_u = 10$  м — цена деления индикатора часового типа,

$J_x^u = 2370 \cdot 10^{-8}$  м<sup>4</sup> — момент инерции сечения балки относительно нейтральной оси

$E = 2 \cdot 10^5$  МПа — модуль упругости материала балки

$a = 0,5$  м — расстояние от оси опоры до расчетного сечения

**Экспериментальные величины:**

Нормальные напряжения  $\sigma_i = \frac{\Delta T_{cpi}}{0,02 \cdot k_T} \cdot E$

$\sigma_1 =$   $\sigma_2 =$

$\sigma_3 =$

$\sigma_4 =$   $\sigma_5 =$

Прогиб середины балки  $f = k_u \cdot \Delta T_{y_{cp1}} =$

Угол поворота опорного сечения  $\varphi = \frac{k_u \cdot \Delta T_{y_{cp2}}}{0,1} =$

**Теоретические величины:**

Приращение изгибающего момента в расчетном сечении

$$\Delta M = \Delta P \cdot a / 2$$

Нормальные напряжения

$$\sigma_i = \frac{\Delta M \cdot y_i}{J_x}$$



$$\sigma_1 = \qquad \qquad \qquad \sigma_2 =$$

$$\sigma_3 =$$

$$\sigma_4 = \qquad \qquad \qquad \sigma_5 =$$

Прогиб балки в середине

$$f = \frac{\Delta P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J_x} =$$

Угол поворота опорного сечения

$$\varphi = \frac{\Delta P \cdot l^2}{16 \cdot E \cdot J_x} =$$

Выводы: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8  
ВНЕЦЕНТРЕННОЕ РАСТЯЖЕНИЕ  
СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ**

**Машина: Разрывная Р-5  
Тензометры рычажные**

База тензометра  $S = 2$  см.

Цена деления шкалы тензометра  $m = 0,0001$  см.

Эксцентриситет приложения растягивающей нагрузки  $e = 3$  см = 0,03 м.

Приращение нагрузки  $\Delta P = 4$  кН.

Ширина сечения  $b = 2$  см = 0,02 м.

Высота сечения  $h = 6$  см = 0,06 м.

**Таблица результатов наблюдений**

Нагрузка $P$ , КН	Прираще- ние нагрузки $\Delta P$ , КН	Показание тензометра $T_1$	Показание тензометра $T_2$	Прираще- ние пока- зания $\Delta T_1$	Прираще- ние пока- зания $\Delta T_2$
		$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta T_i}{n} =$			

**Определить:**

1. Геометрические характеристики сечения стального образца:

$$\text{Площадь сечения } A = \quad \text{см}^2 = \quad \text{м}^2.$$

Момент инерции сечения относительно центральной оси

$$J_Y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \quad \text{см}^4 = \quad \text{м}^4$$

Радиус инерции сечения

$$i_y = \sqrt{\frac{J_Y}{A}} = \quad \text{см} = \quad \text{м}.$$

Момент сопротивления сечения при изгибе

$$W_Y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \quad \text{см}^3 = \quad \text{м}^3$$

2. Изгибающий момент в исследуемом поперечном сечении образца

$$\Delta M_Y = \Delta P \cdot e =$$

3. Нормальные напряжения в исследуемом поперечном сечении образца по теоретическому расчету

$$\sigma_1 = \frac{\Delta P}{A} - \frac{\Delta M_Y}{W_Y} =$$

$$\sigma_2 = \frac{\Delta P}{A} + \frac{\Delta M_Y}{W_Y} =$$

4. Нормальное напряжение в центре тяжести исследуемого поперечного сечения образца по теоретическому расчету

$$\sigma_0 = \frac{\Delta P}{A} =$$

5. Координату нулевой линии по теоретическому расчету

$$a_x = -\frac{i_y^2}{x_p} =$$

6. Нормальные напряжения в исследуемом поперечном сечении образца по данным опыта

$$\sigma_1 = \frac{\Delta T_{1CP} \cdot m}{S} \cdot E =$$

$$\sigma_2 = \frac{\Delta T_{2CP} \cdot m}{S} \cdot E =$$

7. Координату нулевой линии по данным опыта

$$a_x = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} =$$

**ПОСТРОИТЬ:**

Эпюры нормальных напряжений в исследуемом сечении образца

По теоретическому расчету	По данным опыта

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9**  
**ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ СТАЛЬНОГО**  
**СТЕРЖНЯ**

**Машина: Пресс 100 т**  
**Диаметр сечения  $d = 80$  мм**  
**Высота стержня  $h = 300$  мм**

**Журнал испытаний**

Нагрузка $P$ , кН	$T_1$	$\Delta \dot{\theta}_1$	$T_2$	$\Delta \dot{\theta}_2$	$T_3$	$\Delta \dot{\theta}_3$	$T_4$	$\Delta \dot{\theta}_4$
30								
60								
90								
120								
150								
$\Delta T_1^{\text{cp}} =$		$\Delta T_2^{\text{cp}} =$		$\Delta T_3^{\text{cp}} =$		$\Delta T_4^{\text{cp}} =$		

**Обработка результатов:**

1. Абсолютная деформация базы тензометров:

$$\Delta S_1 = \Delta T_1^{\text{cp}} \cdot 10^{-5} =$$

$$\Delta S_2 = \Delta T_2^{\text{cp}} \cdot 10^{-5} =$$

$$\Delta S_3 = \Delta T_3^{\text{cp}} \cdot 10^{-5} =$$

$$\Delta S_4 = \Delta T_4^{\text{cp}} \cdot 10^{-5} =$$

2. Вычисляются продольная и поперечная относительные деформации, делением на базу  $S = 0,02$  м:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta S_i}{0,02} =$$

$$\varepsilon_1 =$$

$$\varepsilon_2 =$$

$$\varepsilon_3 =$$

$$\varepsilon_4 =$$

4. Вычисляются нормальные напряжения по закону Гука в МПа

$$\sigma_i = E \varepsilon_i$$

$$\sigma_1 =$$

$$\sigma_3 =$$

$$\sigma_2 =$$

$$\sigma_4 =$$

### Вычисления по теоретическим формулам:

2. Геометрические характеристики сечения стального образца:

$$\text{Площадь сечения } A = \frac{\pi d^2}{4} = \quad \text{м}^2.$$

Момент инерции сечения относительно центральной оси

$$J = \frac{\pi d^4}{64} = \quad \text{м}^4.$$

Радиус инерции сечения

$$i = \sqrt{\frac{J}{A}} = \frac{d}{4} = \quad \text{м}.$$

Момент сопротивления сечения при изгибе

$$W = \frac{\pi d^3}{32} = \quad \text{м}^3.$$

2. Изгибающий момент в исследуемом поперечном сечении образца

$$\Delta M = \Delta P \cdot e = \quad \text{кНм}.$$



4. Нормальные напряжения в исследуемом поперечном сечении образца по теоретическому расчету

$$\sigma_1 = -\frac{\Delta P}{A} - \frac{\Delta M}{W} =$$

$$\sigma_3 = -\frac{\Delta P}{A} + \frac{\Delta M}{W} =$$

4. Нормальное напряжение в центре тяжести исследуемого поперечного сечения образца по теоретическому расчету

$$\sigma_2 = \sigma_4 = -\frac{\Delta P}{A} =$$

5. Координату нулевой линии по теоретическому расчету

$$a = -\frac{i^2}{e} =$$

**ПОСТРОИТЬ:**

Эпюры нормальных напряжений в исследуемом сечении образца

По теоретическому расчету	По данным опыта

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10**  
**ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ НА КОСОЙ**  
**ИЗГИБ**

**Машина: Установка для испытаний на изгиб**  
**Сечение балки – прямоугольное  $0,012 \times 0,024$  м**  
**Пролет консольной балки  $l = 0,7$  м**

В дальнейшем **расчетные параметры:**  
 $k = 10^{-5}$  м — цена деления индикатора часового типа,  
 $E^u = 2,1 \cdot 10^5$  МПа — модуль упругости материала балки.

**Таблица экспериментальных данных при изгибе балки при  $\alpha =$**

$P$	$\Delta P$	$T_x$	$\Delta T_x$	$T_y$	$\Delta T_y$
		$\Delta T_x^{cp} =$		$\Delta T_y^{cp} =$	

### Экспериментальные величины:

Составляющие прогиба свободного торца балки по главным осям:

$$f_x = k_u \cdot \Delta T_x^{\text{cp}} =$$

$$f_y = k_u \cdot \Delta T_y^{\text{cp}} =$$

### Теоретические величины:

Приращение изгибающего момента в расчетном сечении

$$\Delta M = \Delta P \cdot l$$

Составляющая прогиба на конце консоли по главной оси Y:

$$f_y = \frac{\Delta P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_x} \cos \alpha =$$

Составляющая прогиба на конце консоли по главной оси X:

$$f_x = \frac{\Delta P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_y} \sin \alpha =$$

Величина полного прогиба на конце консоли равна

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} =$$

Вектор прогиба составляет с наклонной осью Y угол  $\varphi$ , тангенс которого равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{f_x}{f_y} =$$

Угол  $\alpha$  считается положительным при повороте вертикальной оси Y против часовой стрелки, если смотреть на балку со стороны свободного торца. Угол  $\varphi$  считается положительным, если происходит по ходу часовой стрелки.

**Векторная схема перемещения свободного торца консольной балки**

Выводы: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА СТЕРЖНЯ БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ**

**Машина: Установка для испытания на продольно-поперечный изгиб**

Ширина поперечного сечения (в плоскости, перпендикулярной плоскости продольного изгиба)  $b = 0,022$  м.

Высота поперечного сечения  $h = 0,004$  м.

Длина стержня  $l = 0,53$  м.

Величина поперечной нагрузки  $G = 0,001$  кН.

Предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}} = 200$  МПа.

Модуль упругости материала  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

**Таблица экспериментального определения прогибов при продольно-поперечном изгибе горизонтального шарнирно опертого сжатого стержня**

Величина сжимающей силы $P$ , кН	Отсчет по шкале индикатора $V$	Величина прогиба балки $y = k_u \cdot V$ , м
0		—

$k_u = 10^{-5}$  м — цена деления шкалы индикатора часового типа.

**График прогиба в середине балки при продольно-поперечном изгибе**

$f$									
0									$P$

Выводы \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОТЕРИ**  
**УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ СЖАТИИ СТЕРЖНЯ**  
**БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ**

**Машина: Установка для испытания на продольный изгиб**

Ширина поперечного сечения (в плоскости, перпендикулярной плоскости продольного изгиба)  $b = 0,022$  м.

Высота поперечного сечения  $h = 0,004$  м.

Длина стержня  $l = 0,53$  м.

Предел пропорциональности  $\sigma_{\text{ПЦ}} = 200$  МПа.

Модуль упругости материала  $E = 2 \times 10^5$  МПа.

Предельная гибкость, величина зависящая от физических свойств материала

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{\text{ПЦ}}}}$$

**Таблица результатов экспериментального определения критической силы**

$\mu$	РКР	Условия закрепления концов стержня
1		Шарниры по концам
2		Жесткое защемление одного при свободном другом
0,7		Жесткое защемление одного и шарнир на другом
0,5		Жесткое защемление по концам

**Теоретическое определение  $P_{\text{КР}}$**

Площадь поперечного сечения  $A = b \cdot h =$  м<sup>2</sup>

Момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости выпучивания  $J_x = \frac{bh^3}{12}$  м<sup>4</sup>

Радиус инерции  $i_x = \sqrt{\frac{J_x}{A}}$  м

**Таблица вычислений критической силы и напряжения**

	Гибкость $\lambda = \frac{\mu l}{i}$	$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{(\mu l)^2}$	$\sigma_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{кр}}}{A}$
1			
2			
0,7			
0,5			

Выводы \_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА**

**Машина: Маятниковый копер 30**

**Ширина сечения  $b = 10$  мм**

**Высота сечения  $h = 10$  мм**

**Глубина надреза  $= 2$  мм**

**Масса маятника  $M = 20,387$  кг**

Расчетная площадь сечения  $F = b(h - \Delta) =$      $\text{см}^2$

Цена деления шкалы измерителя энергии

$\mathcal{E}_0 = 2,999$  Дж

**Номера материалов:**

- 1. Сталь углеродистая**
- 2. Сталь нержавеющая**
- 3. Чугун серый**
- 4. Чугун ковкий**
- 5. Титановый сплав**

**Журнал испытаний и результатов**

№ материала	$T_{\text{макс}}$	$T_{\text{мин}}$	$\Delta T$	$A = \Delta T \cdot \mathcal{E}_0 \cdot 10,$ Дж	$a = \frac{A}{F},$ Дж/см <sup>2</sup>
1					
2					
3					
4					
5					

Выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Подпись студента

Подпись преподавателя

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
Методические указания  
к выполнению виртуальных лабораторных работ на ПЭВМ

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

---

Тип.зак.	Изд.зак. 171	Тираж 10 000 экз.
Подписано в печать 26.03.07	Гарнитура Newton	Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>
Усл.печ.л. 4,75		

---

Издательский центр РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2