

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

к лабораторным работам по курсу «Соппротивление материалов»
для студентов всех форм обучения
всех направлений и специальностей
с методическими рекомендациями к выполнению

Часть 2

Студент _____

Факультет _____

Группа _____

Кафедральный зачет _____

Преподаватель _____

_____ « ____ » _____ 20 ____ г.
/подпись/

Рабочая тетрадь к лабораторным работам по курсу «Сопротивление материалов» предназначена для студентов всех форм обучения всех направлений и специальностей, которые изучают курс «Сопротивление материалов». Представленные в тетради лабораторные работы охватывают такие разделы курса, как расчет статически неопределимых стержневых систем, сложное сопротивление и устойчивость механических систем. В помощь студенту в каждой лабораторной работе приводятся краткие теоретические сведения и формулы для обработки экспериментальных данных и проведения расчетов. Для успешной защиты курса лабораторных работ в конце рабочей тетради приводится перечень вопросов для самостоятельной проработки студентами.

*Утверждено на заседании кафедры
«Динамика, прочность машин
и сопротивление материалов»*

Составители: А.С. Груздев, М.Н. Лукьянов, В.С. Надеждин, М.Р. Рыбакова

Выполнена в рамках государственного задания вузам (проект № 2290)

Издается в авторской редакции

*Компьютерная верстка: Ю.С. Акульшина
Оформление обложки: Н.Р. Гуськова*

Подписано в печать 06.02.2017

Формат бумаги 60×84/8.

Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,4. Тираж 300. Заказ № 70

*Издательство Московского Политеха, 115280, Москва, Автозаводская, 16
www.mospolytech.ru; e-mail: izdat.mospolytech@yandex.ru; тел. (495) 276-33-67*

Отпечатано в типографии издательства Московского Политеха

Содержание

Введение	4
Испытательное оборудование и измерительные приборы	5
Лабораторная работа № 1 «Опытная проверка теоремы о взаимности работ»	9
Лабораторная работа № 2 «Исследование напряженного и деформированного состояния плоской статически неопределимой рамы»	14
Лабораторная работа № 3 «Исследование напряженного состояния бруса большой кривизны при плоском поперечном изгибе»	21
Лабораторная работа № 4 «Исследование напряженного состояния бруса при внецентренном растяжении»	28
Лабораторная работа № 5 «Определение напряжений и перемещений в балке при косом изгибе»	33
Лабораторная работа № 6 «Определение критической силы для гибкого центрально сжатого стержня»	39
Приложение № 1 Вопросы для самопроверки	45
Приложение № 2 Рекомендуемая литература	49

Введение

Подготовка к лабораторным работам предполагает кроме изучения настоящих методических указаний работу с литературой, указанной в приложении № 2 и лекционными материалами.

К лабораторным работам допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности. Перед проведением экспериментальной части студентам даются краткие теоретические сведения по теме лабораторной работы. Исходные, экспериментальные и расчетные данные заносятся в таблицы. По завершении экспериментальной части проводится обработка результатов, вычисляются погрешности, делаются выводы.

Обработка результатов осуществляется в отдельной тетради. Все вычисления проводятся в единой системе «СИ».

Защита лабораторных работ предполагает ответы на вопросы, предложенные в приложение № 1. Ответ дается студентом без предварительной подготовки. Неправильный ответ на любой вопрос исключает положительную оценку защиты лабораторной работы.

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Универсальный лабораторный стенд СМ

Стенд универсальный лабораторный по сопротивлению материалов СМ-1 (далее – стенд) предназначен для проведения лабораторных работ по разделу «Сопротивление материалов».

Стенд предназначен для работы при температурах от + 10 до + 35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при температуре + 25 °С.

Устройство и принцип работы

Внешний вид стенда приведен на рис. 1. Он представляет собой лабораторный стол с комплектом наладок, хранимых в ящиках стола и устанавливаемых на столе при проведении соответствующей лабораторной работы.

Стол состоит из сварного каркаса 1, встроенной плиты 2 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней (опорной) плоскости для закрепления элементов 3 при выполнении работ, набора выдвижных ящиков 4 для хранения этих элементов, роликов (колес) 5 для возможности передвижения стенда в пределах лаборатории и четырех опор 6 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ.

Измеритель деформации тензометрический цифровой ИТЦ-01 (поз. 7 на рис. 1) при проведении лабораторных работ подключается к источнику питания и кабелем к разъему испытуемого образца при необходимости.

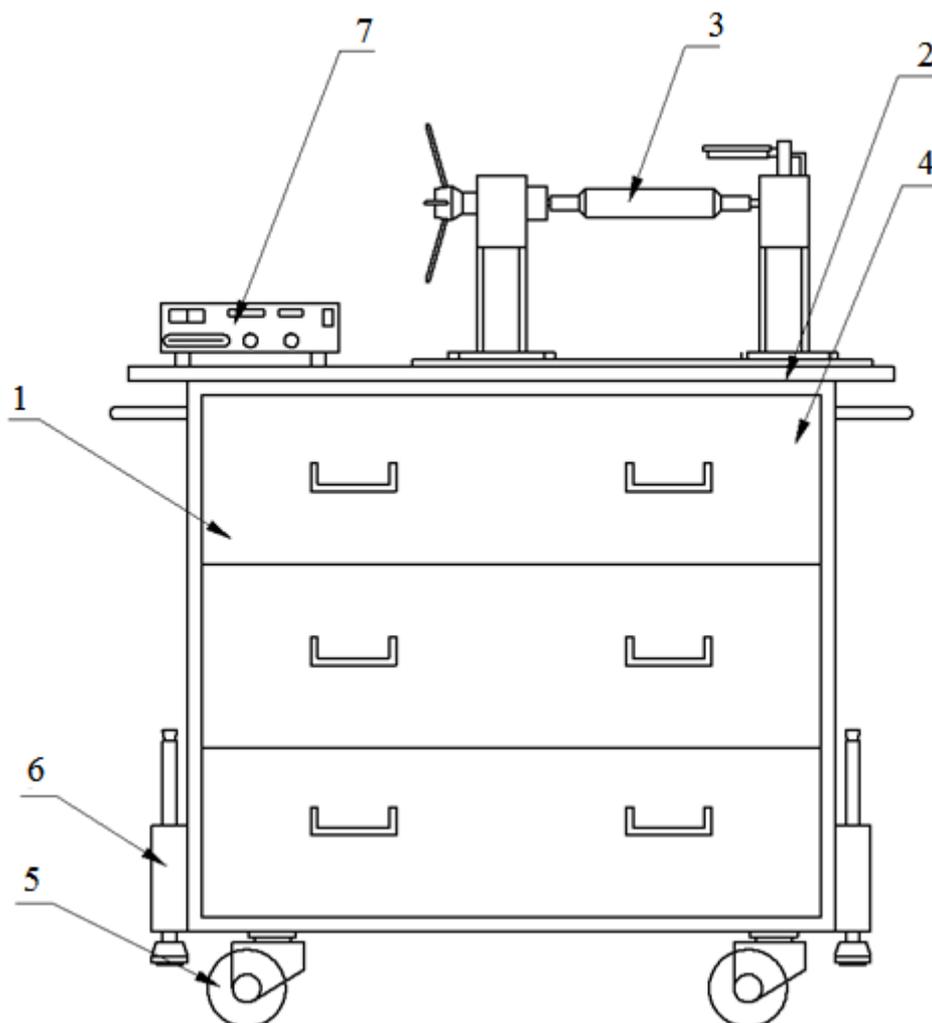


Рис. 1. Универсальный лабораторный стенд СМ

Стрелочный индикатор

Стрелочный индикатор (рис. 2) служит для измерения линейных перемещений. Для проведения измерения корпус прибора 1 по средствам втулки 3 устанавливается на неподвижную деталь, а его стержень 2, под действием пружины, расположенной внутри корпуса прижимается к перемещающейся детали.

Осевое перемещение измерительного стержня 2 вызывает поворот стрелки, указывающей на циферблате величину, измеряемого перемещения. Увеличение прибора достигается за счет зубчатой передачи, соединяющей стержень 2 и стрелку.

Индикаторы изготавливаются с ценой деления 0,01 мм, 0,05 мм и 0,001 мм. Конструкция прибора допускает поворот стрелки на несколько оборотов, при этом число оборотов отсчитывается по вспомогательной шкале, расположенной на том же циферблате.

Величина линейного перемещения определяется стрелочным индикатором следующим образом:

$$v = \Delta \cdot k,$$

где Δ – разность показаний по шкале индикатора,
 k – цена деления стрелочного индикатора.

Угломер Бояршинова

Угломер Бояршинова (рис. 3) применяется для измерения малых углов закручивания. Он состоит из двух специальных кронштейнов 1 и 2 закрепленных на рабочей части образца и стрелочного индикатора 3, закрепленного в кронштейне 2. При закручивании образца один кронштейн относительно другого поворачивается и стрелочный индикатор 3 измеряет линейное перемещение Δ .

Тогда угол закручивания, ввиду его малости, может быть определен по следующей формуле:

$$\phi = \frac{\Delta \cdot k}{R},$$

где Δ – разность показаний по шкале индикатора,
 k – цена деления стрелочного индикатора,
 R – радиус крепления индикатора.

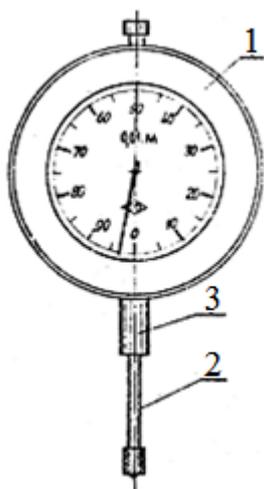


Рис. 2. Стрелочный индикатор

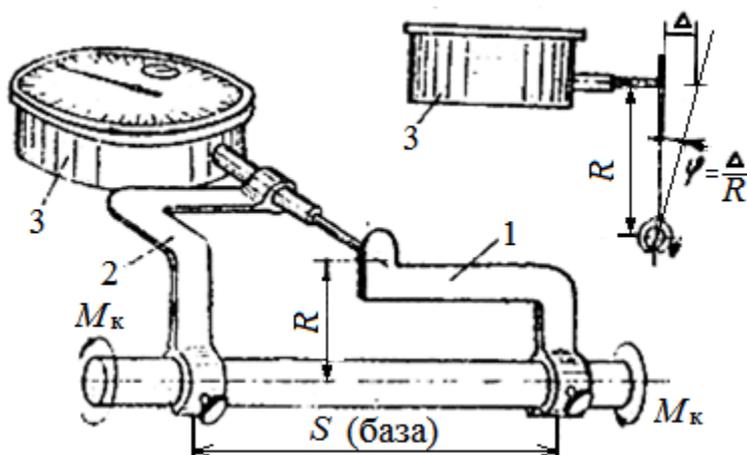


Рис. 3. Угломер Бояршинова

При вычислении значения k и R подставляют в одной размерности, например, в мм.

Тензорезистор

Тензорезистор (рис. 4) применяется для измерения линейных деформаций. Принцип действия основан на тензорезистивном эффекте: изменение омического сопротивления проводника при его деформации. Состоит из проволочной решетки и подложки, к концам решетки припаяны провода для подключения к измерительной системе.

Тензорезистор закрепляется на детали (например, с помощью клея) и благодаря своим малым размерам и весу становится с ней одним целым, поэтому деформация детали полностью воспринимается проволочной решеткой, являющейся чувствительным элементом тензорезистора. Тензорезистор устанавливается на детали в направлении действия главных напряжений, если оно неизвестно, то устанавливается розетка из трех тензорезисторов (рис. 5), ориентированная произвольным образом. Результаты измерений деформаций, с помощью розетки позволяют определить величины главных напряжений и направление их действия.

Деформация определяется следующей формулой:

$$\varepsilon = \Delta T \times k,$$

где Δ – разность показаний тензорезистора, снятых с помощью измерительной системы,

k – цена единицы дискретности измерителя деформации.

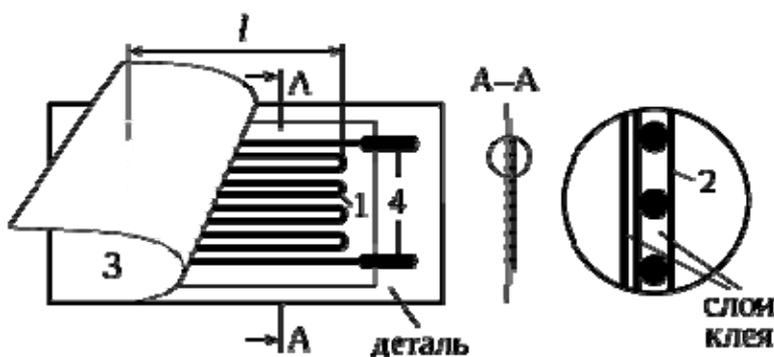


Рис. 4. Тензорезистор:

1 – проволочная решетка; 2 – защитная пленка;
3 – подложка; выводы; l – база тензорезистора

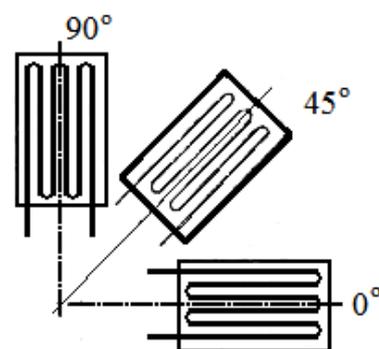


Рис. 5. Розетка из 3-х тензорезисторов

Лабораторная работа № 1

«ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ РАБОТ»

Цель работы: проверка справедливости теоремы о взаимности работ и сопоставление результатов определения перемещений экспериментальным и теоретическим методами.

Краткие теоретические сведения

Теорема о взаимности работ звучит следующим образом: работа силовых факторов первого состояния на соответствующих перемещениях их точек приложения от сил второго состояния равна работе силовых факторов второго состояния на соответствующих перемещениях их точек приложения от сил первого состояния.

Рассмотрим конструкцию, расчетная схема которой показана на рис. 6а. Согласно теореме можно записать равенство:

$$F\delta_{BA} = M\theta_{AB}.$$

где δ_{BA} – перемещение сечения **B** от момента **M** (состояние 2), что соответствует схеме на рис. 6б;

θ_{AB} – угол поворота сечения **A** от силы **F** (состояние 1), что соответствует схеме на рис. 6в.

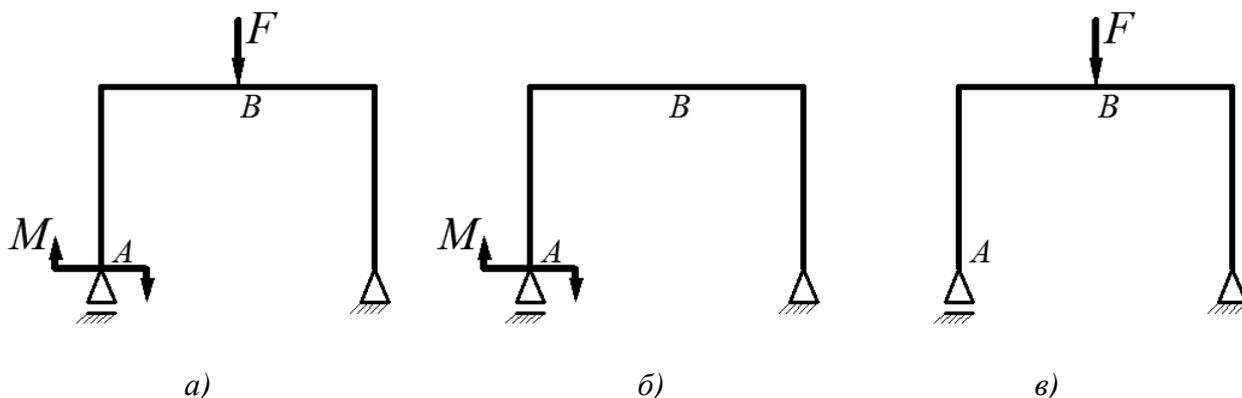


Рис. 6. Расчетная схема

Описание лабораторной установки и оборудования

Лабораторная установка (рис. 7) состоит из плоской рамы П-образного контура квадратного поперечного сечения **2** в сборе с подшипниковыми узлами **3**, один из которых крепится с помощью кронштейна **4** и болтового соединения **5** к столу **1**, а другой опирается на элемент **15**, предварительно прикрепленный к столу. Посередине горизонтального участка рамы подвешиваются грузы **14** (каждая гиря весом по 10Н) с помощью серьги **12** и подвеса **13**. Для определения перемещения сечения рамы **В** на стол устанавливается индикаторная стойка **6** и фиксируется болтовым соединением. На стойку надевается бобышка **8** и фиксируется на нужной высоте винтами **7**. В отверстие бобышки вставляется стержень **9**, а в отверстие стержня – индикатор стрелочного типа **10**, после чего фиксируется винтом **11**, при этом ножка индикаторной головки опирается на раму.

Для измерения угла поворота сечения **А** используется угломер, который состоит из индикатора стрелочного типа **19**, стойки **18**, рычага упора ножки индикатора **17**, накрученного на ось **16**. Для приложения изгибающего момента в сечении **А** угломер снимается, а на ось **16** навинчивается груз **20**.

Порядок выполнения работы

Последовательность выполнения работы:

1. Записать исходные данные в таблицу 1.
2. Собрать статически определимую раму согласно рис. 2.
3. Снять показания индикатора угломера **19**, закрепленного на стойке **18**.
4. Нагрузить раму в сечении **В** грузом 20 Н и повторить пункт 2.
5. Убрать стойку **18** и рычаг упора ножки индикатора **17**, накрутить на ось **16** груз **20** до упора, тем самым создавая на подвижной опоре **А** момент $M = 2 \text{ Нм}$.
6. Снять показания индикатора **10**, закрепленного на стойке и опирающегося своей ножкой на раму в сечении **В** и записать в таблицу 2.
7. Открутить груз **20** и вновь снять показания индикатора **10**.
8. Определить прогиб сечения **В** рамы от действия момента силы **М** как разницу показаний индикатора **10**.

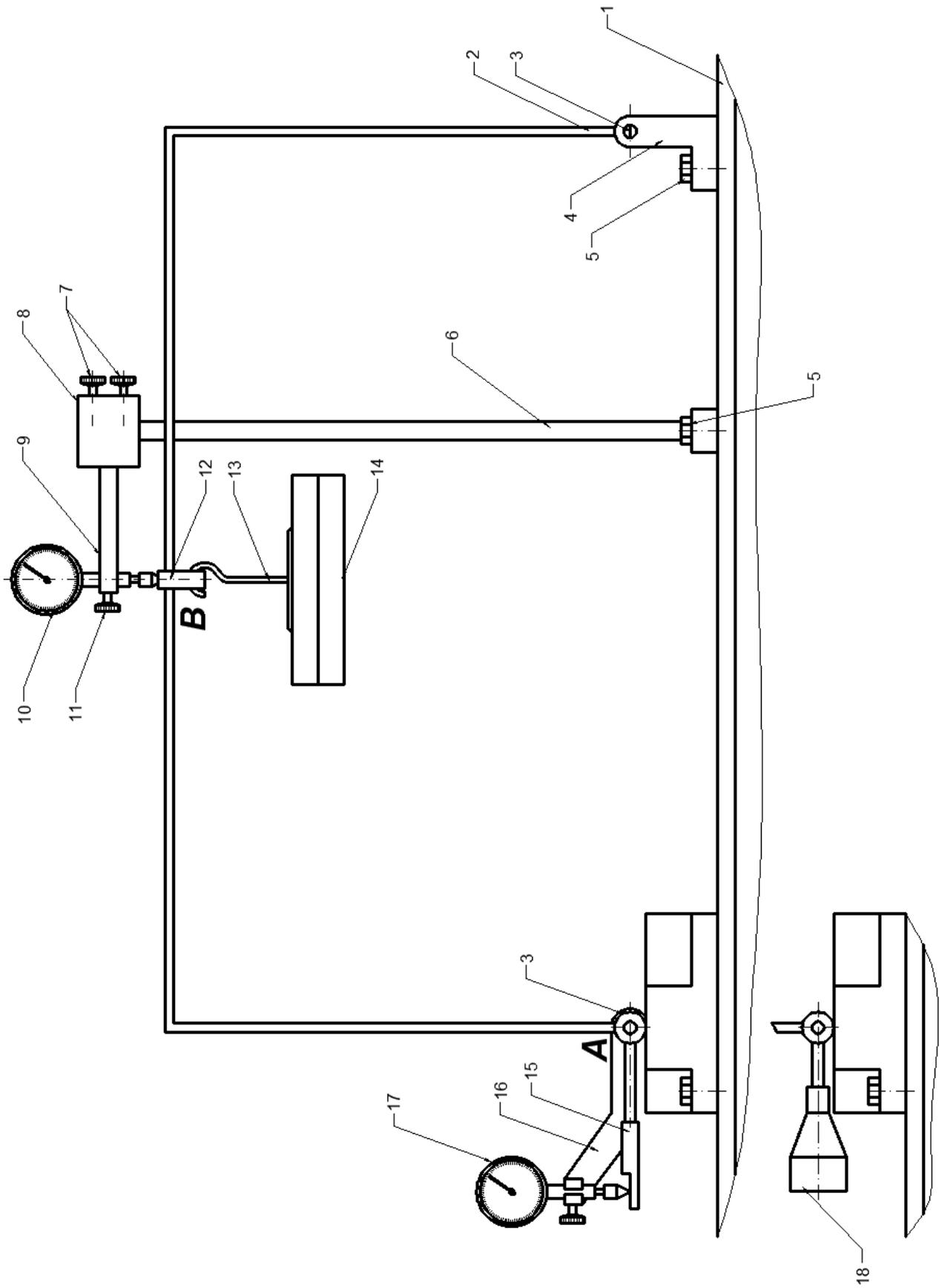


Рис. 7. Схема лабораторной установки

9. Определить угол поворота опоры A под действием силы F по формуле:

$$\theta_{21} = \frac{\Delta \Pi_B k}{H}.$$

где $\Delta \Pi_B$ – разность показаний индикатора Π ;

H – длина рычага от точки A рамы до точки опоры ножки индикатора.

10. Проверить справедливость равенства работ по формуле

$$F \delta_{BA} = M \theta_{AB}.$$

Чертеж объекта исследования и схема нагружения

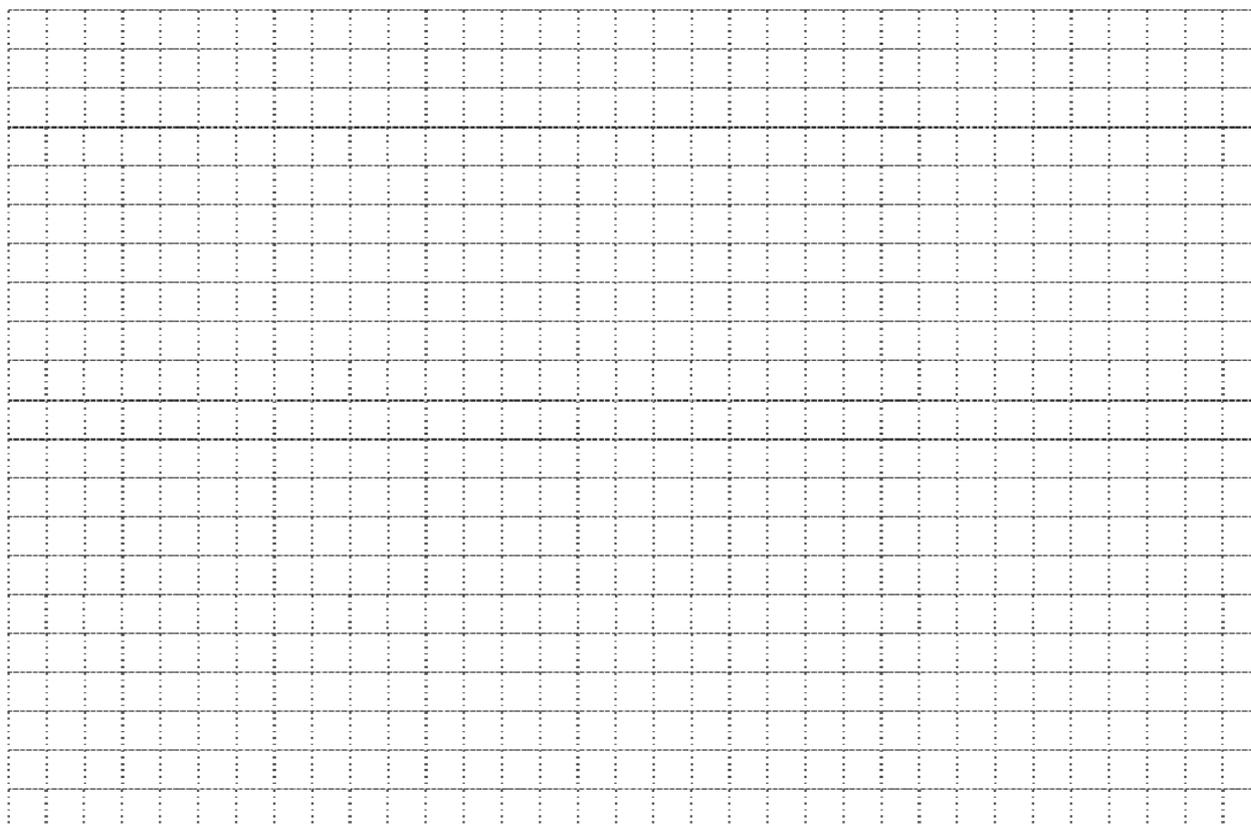


Таблица 1

Исходные данные

Параметры	Численные значения
Длина рычага до точки опоры ножки индикатора H , [мм]	
Цена деления шкалы стрелочного индикатора k , [мм]	0,01

Таблица 2

Экспериментальные данные.

Нагрузка, [Н]	Показания угломера		Показания стрелочного индикатора		Изгибающий момент M , [Нм]
	P_A	ΔP_A	P_B	ΔP_B	
$F_0 = 0$					$M_0 = 0$
$F_1 = 20$					$M_1 = 20$

Дата проведения: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Зачтено: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Лабораторная работа № 2

«ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКОЙ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ»

Цель работы: экспериментальное определение перемещения указанного сечения и реакции опоры в статически неопределимой раме и сравнение полученных результатов с теоретическими.

Краткие теоретические сведения

Рама – это стержневая система, элементы которой в основном работают на изгиб и кручение.

Статически неопределимой называется система, в которой неизвестных реакций опор больше, чем количество независимых уравнений статики, которые можно составить для данной системы. Разность между числом неизвестных и числом независимых уравнений статики называется степенью (или числом) статической неопределимости.

Расчет статически неопределимых стержневых систем можно вести с помощью метода сил, который предполагает последовательное выполнение следующих этапов расчета:

1) Выбор основной системы.

Основная система получается путем снятия с рассчитываемой системы всей заданной внешней нагрузки и отбрасывания дополнительных связей (реакций опор). При этом основная система должна быть кинематически неизменяемой и статически определимой.

2) составление эквивалентной системы.

Для этого основная система нагружается заданной внешней нагрузкой, а в сечениях, где были отброшены лишние связи, прикладываются неизвестные силовые факторы. В сечении, где после отбрасывания дополнительной связи стало возможным линейное перемещение, прикладывается сила по направлению этого перемещения, а в сечении, где стало возможным угловое смещение – прикладывают момент.

3) Составление канонических уравнений вида

$$\delta_{(X_1, X_2, \dots, F)} = 0,$$

которые выражают равенство нулю перемещений (линейных или угловых) от действия всех силовых факторов в сечении, где была отброшена дополнительная связь. Количество канонических уравнений должно соответствовать степени статической неопределимости. В частности, для дважды статически неопределимой рамы можно написать следующую систему канонических уравнений:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{21}X_2 + \delta_{1F} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{2F} = 0. \end{cases}$$

4) Для определения канонических коэффициентов δ_{ij} графическим способом необходимо построить эпюры изгибающих моментов от единичных силовых факторов (для этого приложить к основной системе неизвестный силовой фактор, например, силу X_1 , и принять его равным единице) и от заданной нагрузки, а затем построенные эпюры перемножить графически.

5) Из решения системы канонических уравнений определяются неизвестные силовые факторы X_1, X_2, \dots, X_n .

6) Приложив к основной системе заданную нагрузку и уже известные силовые факторы X_n , строятся окончательные эпюры внутренних силовых факторов.

7) Для определения нормальных напряжений следует воспользоваться формулой:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x},$$

где M_x – изгибающий момент в сечении, где определяется напряжение;

W_x – момент сопротивления поперечного сечения.

9) Коэффициенты канонических уравнений можно определить с помощью интеграла Мора

$$\delta_{ij} = \frac{1}{EJ_x} \int M'_x M_x dx,$$

где M'_x, M_x – аналитические зависимости изгибающего момента от соответствующего силового фактора.

При практических расчетах канонические коэффициенты удобнее определять графо-аналитическим способом, заключающийся в перемножении эпюр M'_x и M_x по способу Верещагина.

Для данной лабораторной работы расчетная схема показана на рис. 8.

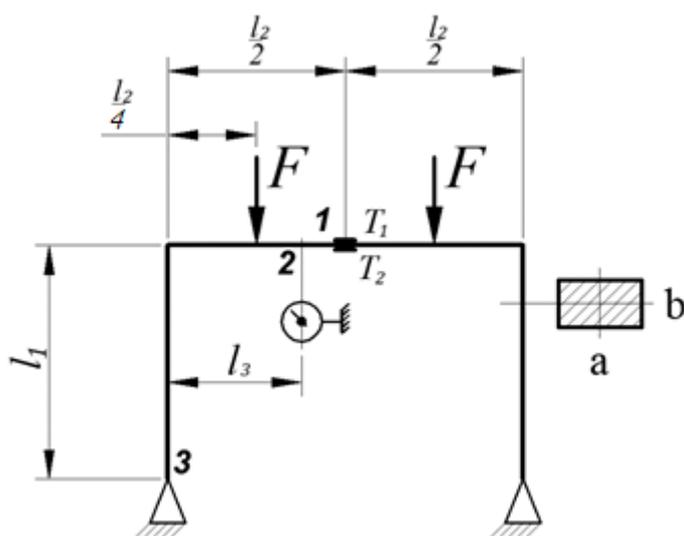


Рис. 8. Расчетная схема рамы

Описание лабораторной установки и оборудования

Лабораторная установка (рис. 9) состоит из плоской рамы П-образного контура квадратного поперечного сечения **2** в сборе с подшипниковыми узлами **3**, один из которых крепится с помощью кронштейна **4** и болтового соединения **5** к столу **1**, а другой опирается на элемент **6**, предварительно прикрепленный к столу. На горизонтальную часть рамы в заданных по условию местах подвешиваются грузы **7** (каждая гиря весом по 10Н) с помощью подвеса **8** и серьги **9**. Для определения перемещения сечения рамы на стол устанавливается индикаторная стойка **10** и крепится болтовым соединением **5**. На стойку надевается бобышка **11** и фиксируется на нужной высоте винтами **12**. В отверстие бобышки вставляется стержень **13**, а в отверстие стержня – индикатор стрелочного типа **14**, при этом ножка индикаторной головки опирается на раму. Для измерения горизонтальной составляющей реакции в опоре последовательно устанавливаются кронштейн **15**, винт **16**, датчик измерения усилия **17** (максимальная величина воспринимаемого датчиком усилия равна 0,05кН) и ось **18**, которая привинчивается к узлу **3**. Для контролирования перемещения узла **2** горизонтально установлен индикатор **14**. Для измерения относительной деформации посередине горизонтального участка рамы сверху и снизу наклеены тензорезисторы **19**, сигнал с которых считывается с помощью измерителя деформаций ИТЦ-01.

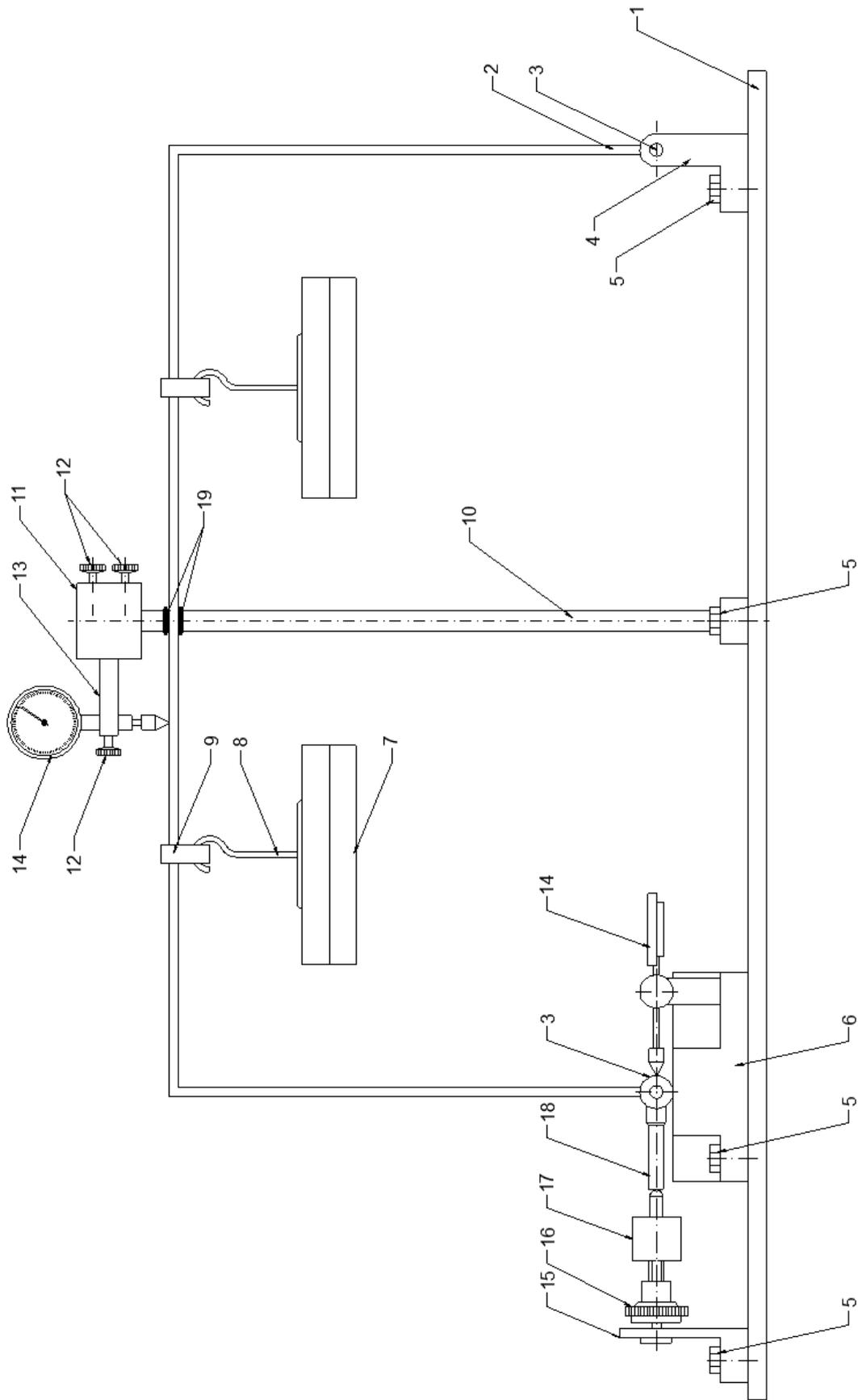


Рис. 9. Внешний вид лабораторной установки

Порядок выполнения работы

В лабораторной работе требуется определить нормальные напряжения в сечении *1*, перемещение сечения *2* и величину горизонтальной составляющей реакции в левой опоре *3* (рис. 9). Исходные данные записываются в таблицу 3.

Ход выполнения работы:

1. Собрать статически неопределимую раму.
2. При отсутствующей нагрузке с помощью измерителя деформаций снять и занести в таблицу 4 показания тензорезистров, наклеенных в сечении *1*, показания стрелочного индикатора, закрепленного в сечении *2*, и показания блока измерителя силы в сечении *3*.
3. С помощью грузов нагрузить раму двумя силами по 20Н, снять показания с приборов, указанных в предыдущем пункте.
4. Вычислить горизонтальную составляющую реакции опоры

$$X = B_1 - B_0.$$

5. Вычислить экспериментальное значение относительной деформации и напряжений в сечении *1* по формулам:

$$\varepsilon_i = \Delta\Pi_i \cdot K_1,$$

$$\sigma_i = \varepsilon_i \cdot E.$$

6. Вычислить экспериментальное значение перемещения сечения *2* по формуле:

$$y = \Delta\Pi_y \cdot K_2.$$

7. Вычислить теоретические значения напряжений, перемещений и горизонтальной составляющей реакции опоры.
8. Теоретические и экспериментальные значения занести в таблицу 5.
9. Сравнить полученные значения и определить расхождение по формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\max - \min}{\max} \right| \cdot 100\%.$$

Чертеж объекта исследования и схема нагружения

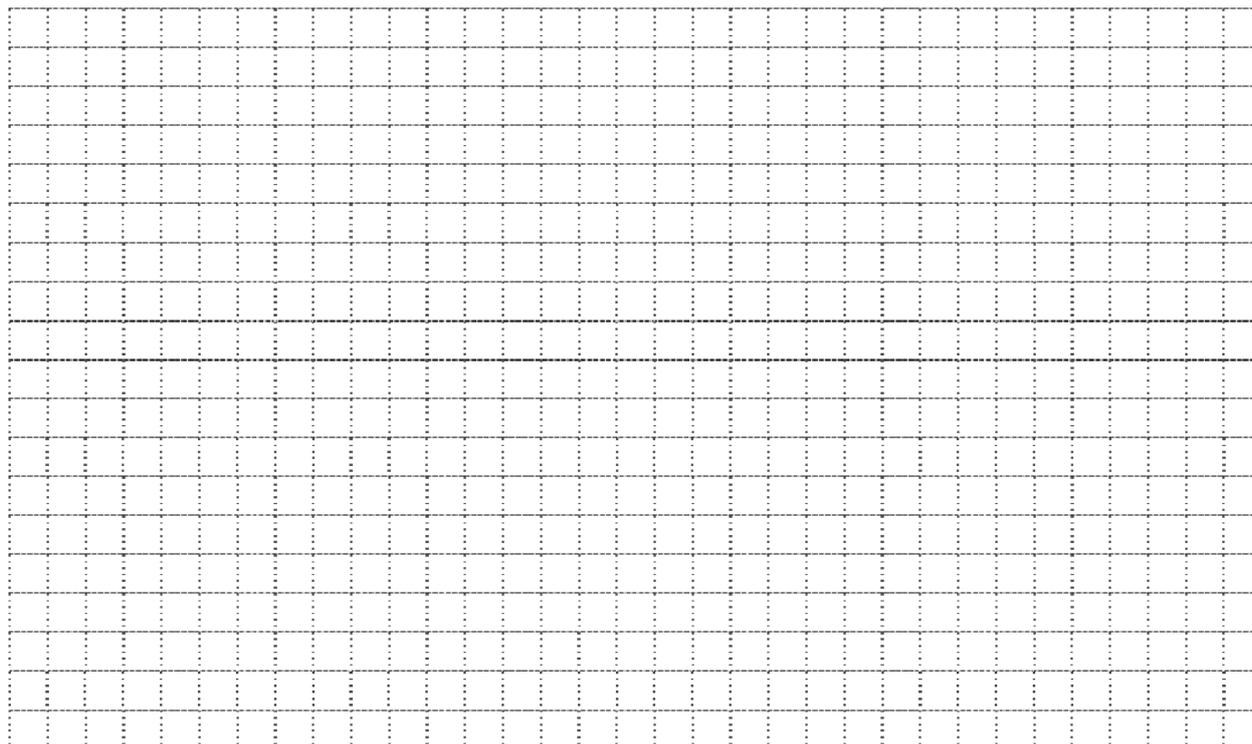


Таблица 3

Исходные данные

Параметры	Численные значения
Ширина поперечного сечения стержней a , [мм]	
Высота поперечного сечения стержней b , [мм]	
Длина вертикальных стержней рамы l_1 , [мм]	
Длина горизонтального стержня рамы l_2 , [мм]	
Модуль упругости материала E , [МПа]	
Коэффициент единицы дискретности измерителя деформаций K_1	
Цена деления шкалы стрелочного индикатора K_2 , [мм]	

Таблица 4

Экспериментальные данные

Нагрузка, [Н]	Показания тензодатчиков и разности отсчетов				Показания стрелочного индикатора		Показания блока измерителя деформаций, [Н]	
	Π_1	$\Delta \Pi_1$	Π_2	$\Delta \Pi_2$	Π_v	$\Delta \Pi_v$	Б	$\Delta Б$
$F_0 = 0$								
$F_1 = 20$								

Результаты эксперимента

Величина	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Расхождение Δ , %
X, [Н]			
σ_1 , [МПа]			
σ_2 , [МПа]			
y, [мм]			

Дата проведения: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Зачтено: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Лабораторная работа № 3

«ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БРУСА БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ»

Цель работы: экспериментальное определение закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении бруса большой кривизны при плоском изгибе, сравнение экспериментальных значений нормальных напряжений с теоретическими значениями.

Краткие теоретические сведения

Брусом называют тело, размеры поперечного сечения которого малы по сравнению с длиной. Кривой брус – это брус, у которого линия, проходящая через центры тяжести поперечных сечений, представляет собой кривую линию, а поперечные сечения перпендикулярны этой линии. Различают брус малой и большой кривизны. Если отношение высоты сечения h к радиусу кривизны оси бруса ρ_0 меньше 0,2, то говорят о брусике малой кривизны, а если отношение h/ρ_0 больше 0,2, то говорят о брусике большой кривизны.

Напряжения в брусках малой кривизны с достаточной для практики точностью можно определять по формулам, полученным для прямых брусков. Аналогично по формулам расчета прямых брусков можно определять касательные напряжения в брусках большой кривизны. Распределение же нормальных напряжений в поперечных сечениях брусков большой кривизны существенно отличается от распределения в прямых брусках, а потому эти напряжения в брусках большой кривизны определяются по специальным формулам.

В плоском криволинейном стержне так же, как в плоской раме, состоящей из прямолинейных стержней, возникает три внутренних силовых фактора: нормальная N и поперечная Q силы, изгибающий момент M . Алгоритм определения внутренних силовых факторов в криволинейном стержне тот же, что и в раме. В бруске большой кривизны нормальные напряжения при изгибе распределяются нелинейно по высоте поперечного сечения и определяются по формуле:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{N}{A} + \frac{M y}{A e (r_n - y)},$$

где A – площадь поперечного сечения стержня;

y – расстояние от нейтральной линии до исследуемого волокна (рис. 10);

$e = r_0 - r_n$ – эксцентриситет;

r_0 – радиус кривизны слоя, в котором расположены центры тяжести сечения бруса;

r_n – радиус кривизны нейтрального слоя поперечного сечения бруса;

R_1 – радиус кривизны внутреннего слоя бруса;

R_2 – радиус кривизны внешнего слоя бруса.

Для бруса прямоугольного поперечного сечения r_n определяется формулой:

$$r_n = \frac{h}{\lg R_1 / R_2}.$$

Таким образом, напряжения меняются по высоте поперечного сечения нелинейно. Эпюра напряжений представляет собой гиперболу, одна из асимптот которой совпадает с осью кривизны (рис. 10).

В общем случае в стержне помимо нормальных напряжений возникают и касательные, но значения этих напряжений невелики и в практических расчетах на прочность не учитываются.

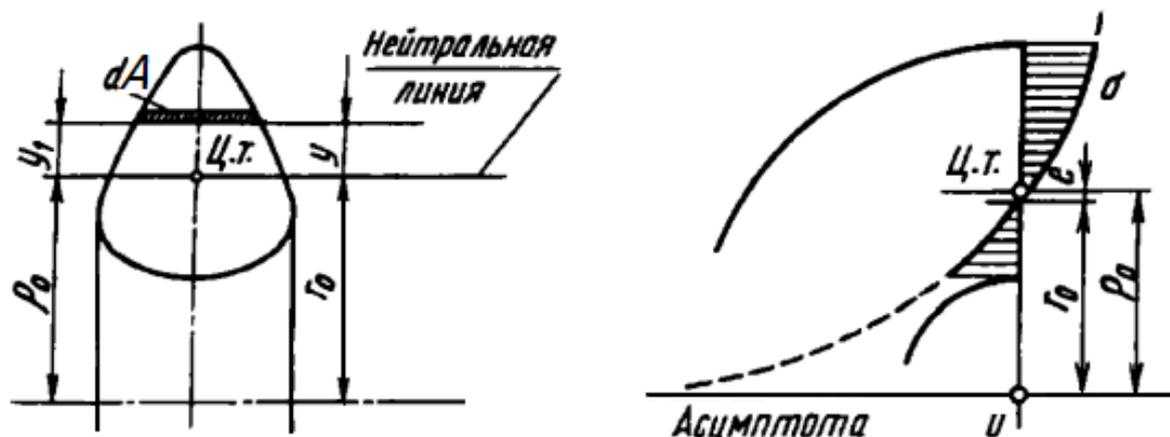


Рис. 10. Распределение напряжений в брус большой кривизны

Описание лабораторной установки и оборудования

Лабораторная установка (рис. 11) состоит двух опорных стоек **4** и **10**, предварительно закрепленных на столе **1** болтовыми соединениями **2**, к которым с помощью стержней **6**, шарнирной оси **5** и вилки **7** крепится исследуемый брус большой кривизны **11** с наклеенными на нем семью тензорезисторами **12**. Нагружение образца производится вращением штурвала **3**. Для измерения прикладываемой растягивающей силы используется датчик усилия **8**, который одним концом крепится к опоре **10** через шарнирную ось **9**, а другой конец ввинчивается в вилку **7**. Контролируется растягивающая сила по показаниям блока измерителя силы (на рисунке не показан).

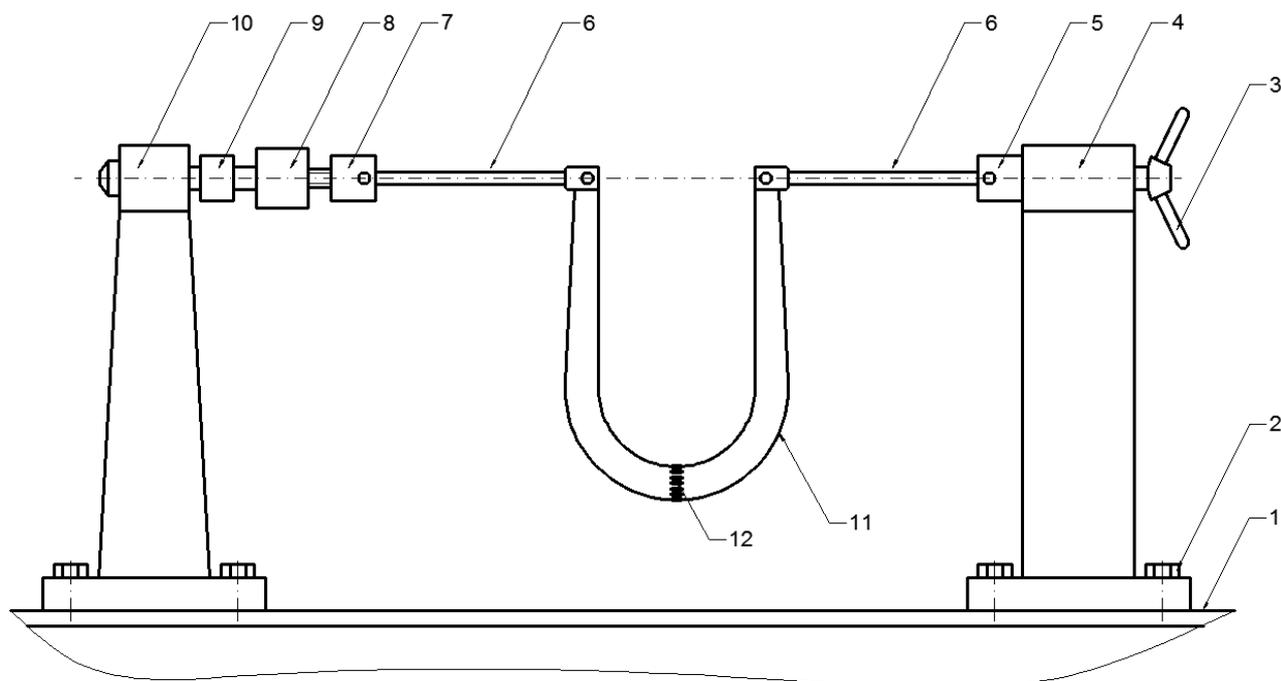
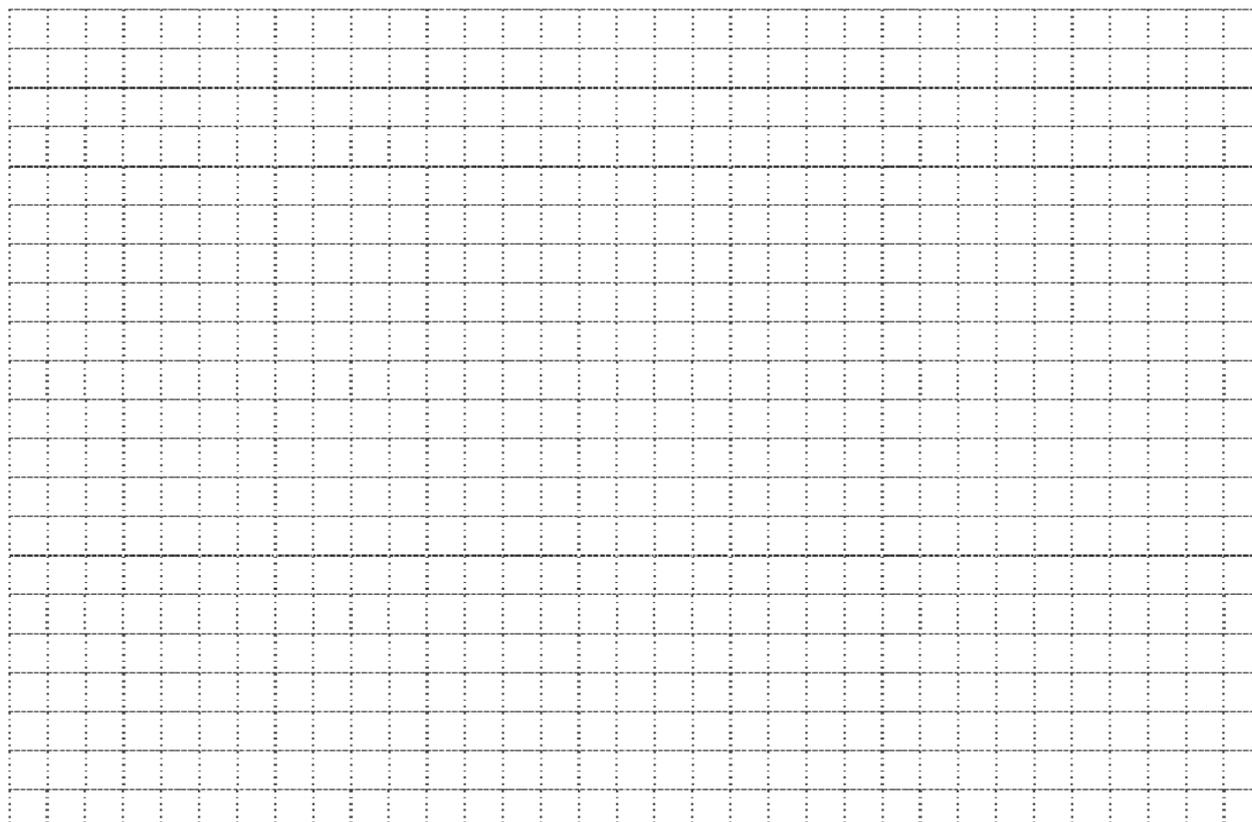


Рис. 11. Внешний вид лабораторной установки

Порядок выполнения работы

В лабораторной работе требуется определить нормальные напряжения в точках наклейки тензорезисторов *12* теоретическим и экспериментальным методом. Исходные данные записываются в таблицу 6.

Чертеж объекта исследования и схема нагружения



Ход выполнения работы:

1. Собрать лабораторную установку, для чего закрепить опоры *4* и *10* (рис. 11) на столе *1* с помощью болтового соединения *2*, исследуемый брус *11* крепится к опорам с помощью стержней *6*, шарнирной оси *5* и вилки *7*. Датчик усилия *8* подключается к измерителю усилий, тензорезисторы *12* с помощью разъема на брус подключаются к измерителю деформаций ИТЦ-01.

2. Вращая рукоятку *3*, создать предварительное нагружение силой 0,5 кН для устранения зазоров в шарнирах. Снять показания для всех тензорезисторов и записать в таблицу 7.

3. Исследуемый образец последовательно нагружается силами 1,5 кН; 2,5 кН; 3,5 кН; значение силы контролируется по табло блока измерителя силы. При каждом значении нагрузки показания тензорезисторов записываются в таблицу 7.

4. Подсчитываются разность показаний и средняя разность показаний для i -го тензорезистора для ступени нагрузки 1 кН по формулам:

$$\Delta T_n^i = T_n - T_{n-1},$$
$$\Delta T_{cp}^i = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 \Delta T_n^i.$$

5. Определяется относительная деформация и приращение напряжений во всех точках для ступени нагрузки $\Delta F = 1$ кН формулам:

$$\varepsilon_i = K \cdot \Delta T_{cp}^i,$$
$$\sigma_i^{эксн} = \varepsilon_i \cdot E.$$

Значения ε_i и $\sigma_i^{эксн}$ записать в таблицу 8.

6. Вычислить теоретические значения напряжений во всех точках при нагрузке 1 кН и записать значения в таблицу 8.

7. Построить эпюру распределения теоретических и экспериментальных напряжений по сечению бруса большой кривизны.

8. Определить величину расхождения между теоретическими и экспериментальными данными по формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\max - \min}{\max} \right| \cdot 100\%.$$

9. Сделать вывод об особенностях напряженного состояния в брус большой кривизны. Оценить соответствие теоретических и опытных результатов.

Таблица 6

Исходные данные

Параметры	Численные значения
Размеры сечения $b \times h$, [мм]	
Радиусы кривизны, [мм]:	
R_1	
R_2	
R_1	
Модуль упругость первого рода материала бруса E , [МПа]	
Коэффициент единицы дискретности измерителя деформаций K	
Цена деления индикатора k , [мм]	

Таблица 7

Экспериментальные данные

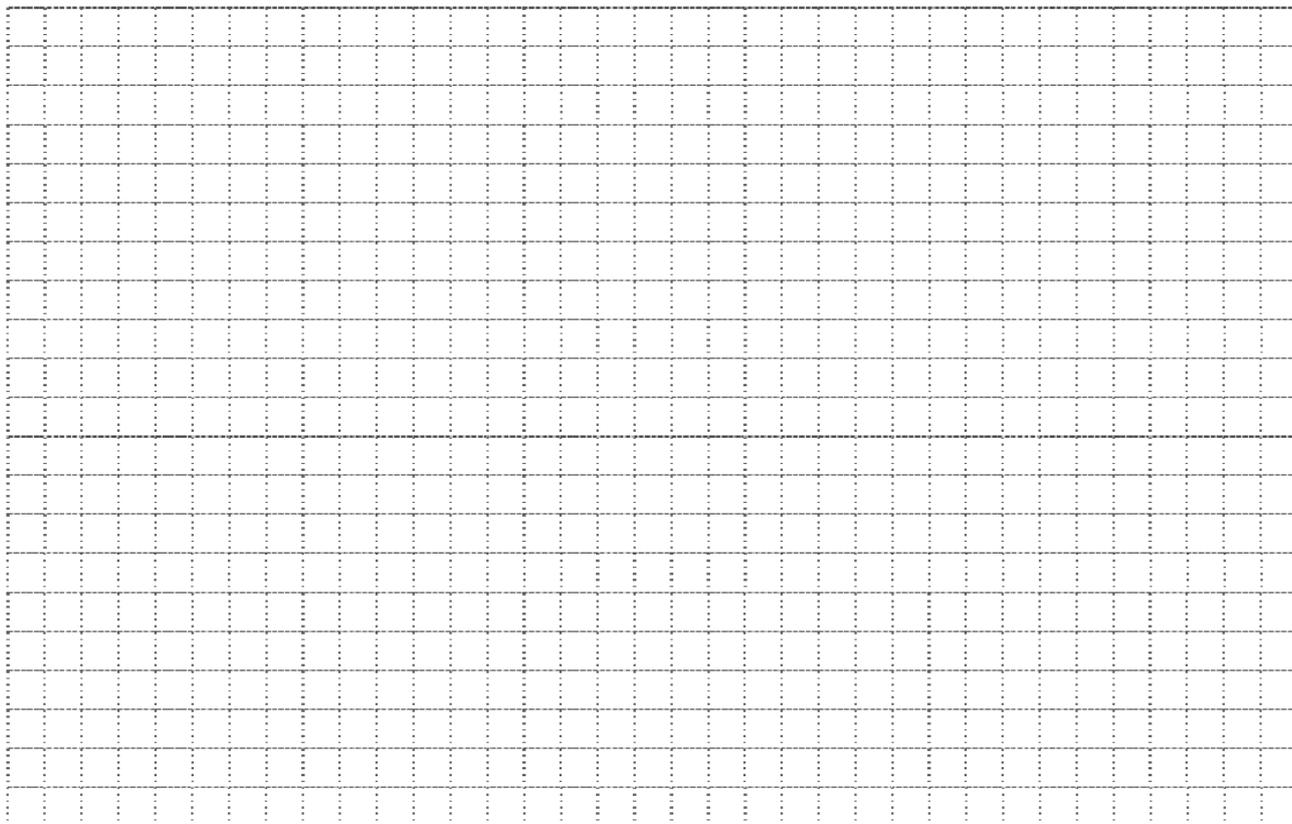
№ тензодатчика	1	2	3	4	5	6	7
ρ_i , [мм]	40	50	60	70	80	90	100
$F_0 =$ кН							
F_1 кН							
$F_2 =$ кН							
$F_3 =$ кН							

Таблица 8

Результаты эксперимента

№ тензодатчика	1	2	3	4	5	6	7
ε_i							
$\sigma_i^{эксп}$, [МПа]							
$\sigma_i^{теор}$, [МПа]							
Расхождение Δ , %							

Эпюра распределения нормальных напряжений в поперечном сечении бруса большой кривизны



Дата проведения: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Зачтено: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Лабораторная работа № 4

«ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БРУСА ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ»

Цель работы: сравнение теоретических и экспериментальных значений нормальных напряжений в сечении бруса при внецентренном растяжении. Проверка закона распределения нормальных напряжений.

Краткие теоретические сведения

Внецентренным растяжением называется вид нагружения, при котором растягивающая нагрузка не лежит на продольной оси бруса, а находится от нее на некотором расстоянии, называемом эксцентриситетом.

При данном виде нагружения в поперечном сечении бруса будут возникать нормальная сила N_z и изгибающий момент M_x . Нормальная сила будет вызывать нормальные напряжения, равномерно распределенные по поперечному сечению. Изгибающий момент будет вызывать нормальные напряжения, распределенные по линейному закону, в центре поперечного сечения они равны нулю, и достигают экстремальных значений на крайних волокнах. Суммарные нормальные напряжения будут определяться зависимостью:

$$\sigma = \frac{N_z}{A} + \frac{M_x}{I_x} y \quad (1)$$

где N_z – нормальная сила;

A – площадь поперечного сечения бруса;

I_x – осевой момент инерции;

y – расстояние от продольной оси до волокна, в которой определяется напряжение;

M_x – изгибающий момент ($M_x = Fe$);

e – эксцентриситет.

Из формулы (1) следует, что нормальные напряжения по высоте поперечного сечения бруса при внецентренном растяжении распределяются по линейному закону.

Можно ввести понятие ядра сечения, как геометрического места точек в окрестности центра тяжести поперечного сечения, при приложении растягивающих сил в котором в сечении возникают напряжения одного знака.

Существует разница при внецентренном растяжении бруса, имеющего большую и малую длину. При растяжении бруса имеющего большую длину следует учитывать прогиб сечения бруса, так как он будет сопоставим с величиной эксцентриситета.

Порядок проведения расчета

1. Исходные данные записываются в таблицу 10.
2. Результаты эксперимента записываются в таблицу 11.
3. Определяются разности показаний тензорезисторов и показаний стрелочного индикатора и нагрузки:

$$\Delta T_i = T_i^{F_{i+1}} - T_i^{F_i} \quad \Delta \Pi_i = \Pi_i^{F_{i+1}} - \Pi_i^{F_i} \quad \Delta F = F_2 - F_1 = F_3 - F_2 = \dots$$

4. Определяются средние разности показаний тензорезисторов и показаний стрелочного индикатора:

$$\Delta T_{icp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta T_{ik} \quad \Delta \Pi_{icp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta \Pi_{ik}$$

5. Вычисляются значения деформаций:

$$\varepsilon_i = k_1 \Delta T_{icp}$$

6. Вычисляется экспериментальное значение прогиба сечения для длинного стержня:

$$v_c^{эксн} = k_2 \Delta \Pi_{icp}$$

7. Вычисляются экспериментальные значения нормальных напряжений и полученные значения записываются в таблицу 12.

$$\sigma_i^{эксн} = \varepsilon_i E$$

8. Строится эпюра распределения экспериментальных нормальных напряжений по высоте поперечного сечения бруса.

9. Вычисляется теоретическое значение прогиба сечения для длинного стержня

$$v_c^{meop} = \frac{\Delta F e l^2}{8 E I_x} \quad I_x = \frac{b h^3}{12}$$

10. Вычисляются теоретические значения нормальных напряжений:

– короткий стержень

$$\sigma_i^{meop} = \frac{\Delta F}{A} \pm \frac{6 F e}{b h^2} \quad A = b h ;$$

– длинный стержень

$$\sigma_i^{meop} = \frac{\Delta F}{A} \pm \frac{6 F (e - v_c^{meop})}{b h^2} \quad A = b h .$$

Полученные значения записываются в таблицу 12.

11. Строится эпюра распределения теоретических нормальных напряжений по высоте поперечного сечения бруса.

12. Вычисляется погрешность вычислений

$$\Delta = \left| \frac{\max - \min}{\max} \right| \cdot 100\% .$$

Таблица 10

Исходные данные

ВЕЛИЧИНА	ЗНАЧЕНИЕ
Размер поперечного сечения короткого стержня $b \times h$, [м]	
Размер поперечного сечения длинного стержня $b \times h$, [м]	
Длина длинного стержня l , [м]	
Модуль Юнга материала стержней E , [МПа]	
Эксцентриситет e , [м]	
Цена единицы дискретности измерителя деформаций κ_1	
Цена деления шкалы стрелочного индикатора κ_2 , [мм]	

Схема нагружения длинного стержня с установленным стрелочным индикатором

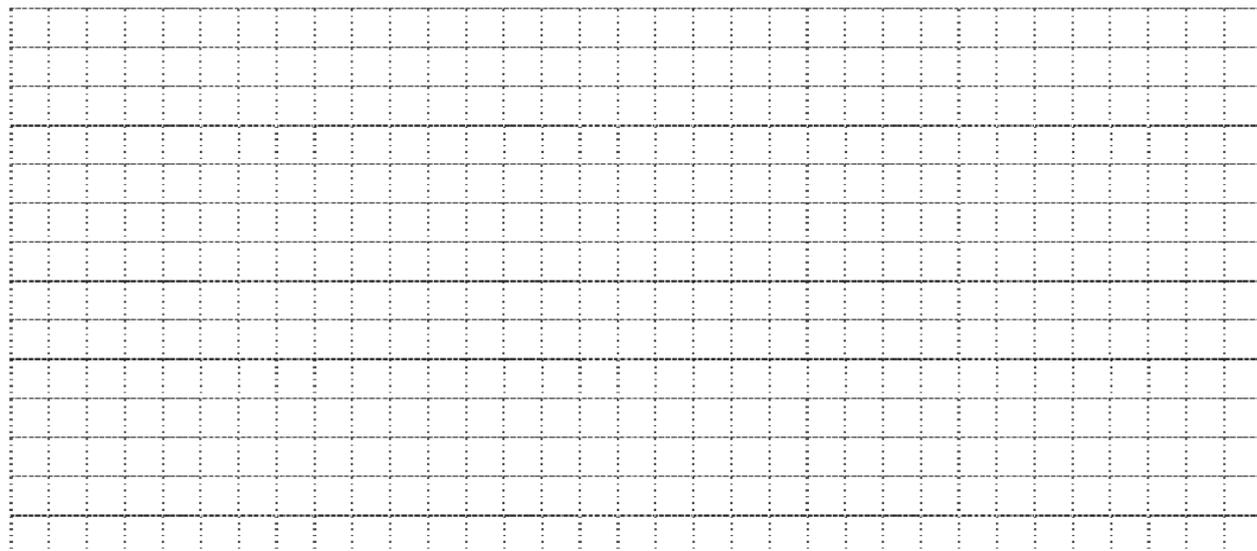
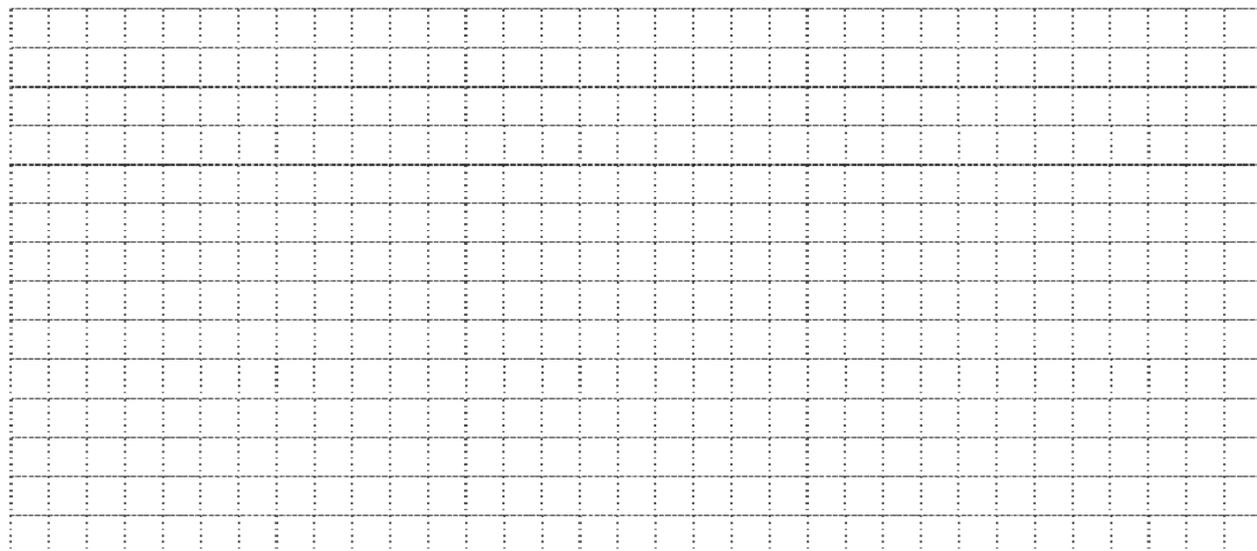
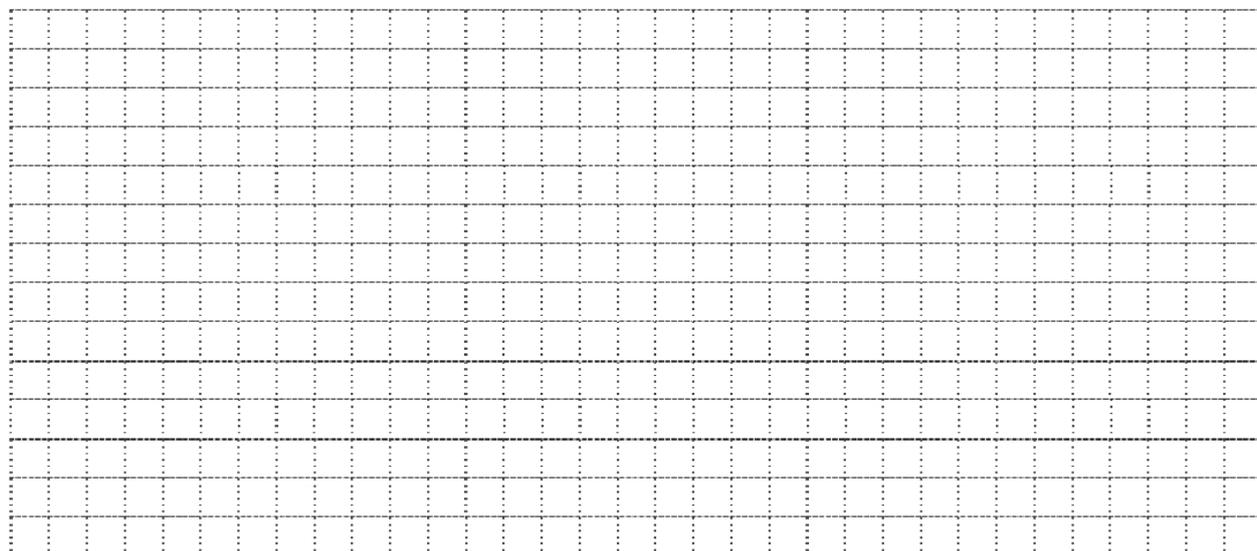


Схема нагружения короткого стержня



Эпюры распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения



Экспериментальные значения

Нагрузка $F [kH]$	Короткий стержень				Длинный стержень					
	T_1	ΔT_1	T_2	ΔT_2	T_1	ΔT_1	T_2	ΔT_2	Π	$\Delta \Pi$
$F_1 = 0,5$										
$F_2 = 1,0$										
$F_3 = 1,5$										
$F_4 = 2,0$										
$F_5 = 2,5$										
Средняя разность отчета $\Delta T_{\text{ср}}$										

Результаты эксперимента

Объект исследования	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Погрешность $\Delta, \%$
Длинный стержень	$\sigma_{max} =$	$\sigma_{max} =$	
	$\sigma_{min} =$	$\sigma_{min} =$	
	$\nu_c^{теор} =$	$\nu_c^{эксп} =$	
Короткий стержень	$\sigma_{max} =$	$\sigma_{max} =$	
	$\sigma_{min} =$	$\sigma_{min} =$	

Дата проведения: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Зачтено: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Лабораторная работа № 5

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В БАЛКЕ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ»

Цель работы: определение перемещений и напряжений в балке при косом изгибе и сравнение их с теоретическими значениями.

Краткие теоретические сведения

Косым называется изгиб, при котором плоскость действия внешних силовых факторов, действующих на балку, не проходит ни через одну из главных плоскостей инерции сечения.

Косой изгиб стержня сводится к двум прямым изгибам в главных плоскостях. Напряжения определяются алгебраическим суммированием напряжений при прямых изгибах, перемещения точек оси стержня находятся путем геометрического суммирования составляющих перемещений по главным осям сечения.

Для консольной балки, нагруженной внешней силой F (рис. 12), изгибающие моменты в сечении, расположенном на расстоянии l_1 от свободного конца балки, будут равны:

$$M_x = F_y l_1, \quad M_y = F_x l_1,$$

где F_x и F_y – составляющие внешней силы F .

Нормальное напряжение в точке, имеющей координаты x и y , определяется суммой напряжений, обусловленных составляющими суммарного момента:

$$\sigma = \pm \frac{M_x}{J_x} y \pm \frac{M_y}{J_y} x,$$

или

$$\sigma = Fl_1 \left(\pm \frac{\sin \alpha}{J_x} y \pm \frac{\cos \alpha}{J_y} x \right),$$

где J_x и J_y – осевые моменты инерции поперечного сечения;

α – угол между плоскостью действия суммарного изгибающего момента и горизонтальной плоскостью.

Уравнение нейтральной линии выражается зависимостью:

$$y = -x \frac{J_x}{J_y} \operatorname{ctg} \alpha .$$

Для стержня прямоугольного поперечного сечения нормальные напряжения в угловых точках поперечного сечения определяются по формуле:

$$\sigma = \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y} ,$$

где W_x и W_y – моменты сопротивления прямоугольного поперечного сечения.

Проекции полного прогиба свободного конца стержня на оси Ox и Oy поперечного сечения определяются по формулам:

$$\delta_{\text{гор}} = \frac{F_x l^3}{3EJ_y} ,$$

$$\delta_{\text{вер}} = \frac{F_y l^3}{3EJ_x} .$$

Полный прогиб свободного конца стержня равен

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{гор}}^2 + \delta_{\text{вер}}^2} .$$

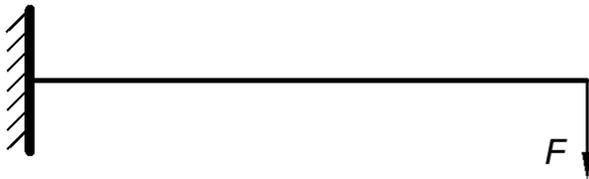


Рис. 12

Описание лабораторной установки и оборудования

Лабораторная установка (рис. 13) включает следующие основные элементы: опорную стойку **2**, которая закрепляется на столе **1**; исследуемый объект - балка прямоугольного поперечного сечения **6**; индикаторы стрелочного типа **14** и **16**. Балка **6** с наклеенными на ней тензорезисторами **5** фиксируется в стойке **2** центральным болтом **4**, после чего с помощью рукоятки **3** поворачивается на заданный угол и закрепляется в таком положении фиксатором **7**. Индикаторная

стойка **9** крепится к столу болтовым соединением, затем на стойку надевается бобышка **8**, в отверстие которой вставляется стержень **10**, а в отверстие стержня – кронштейн **15** с закрепленными на ней двумя индикаторами стрелочного типа **14** и **16**. Ножки индикаторов должны опираться в корпус серьги **11**, закрепленной на конце балки, в перпендикулярных областях. Для приложения внешней силы к серьге подвешивается подвес **12** с грузами **13**.

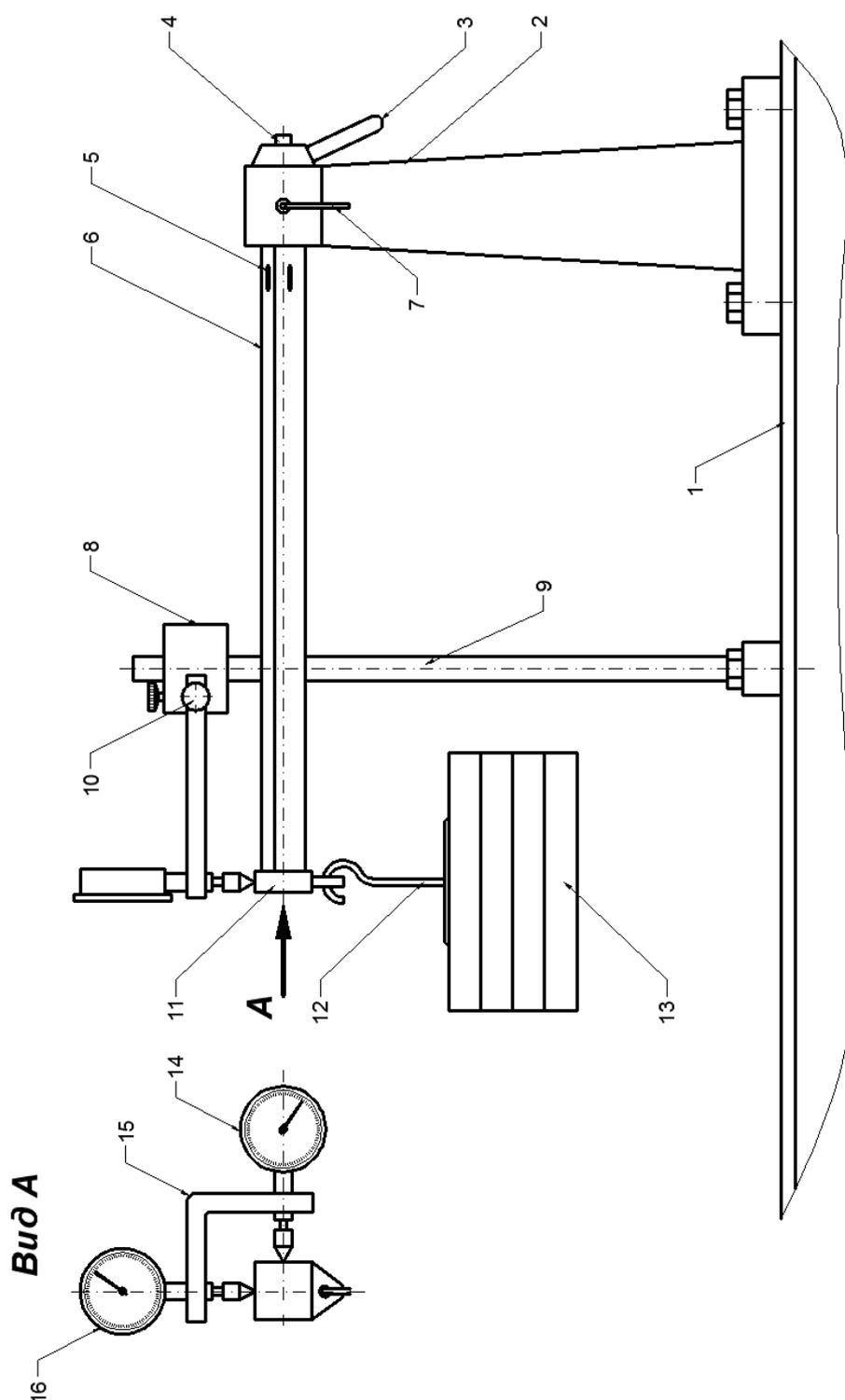
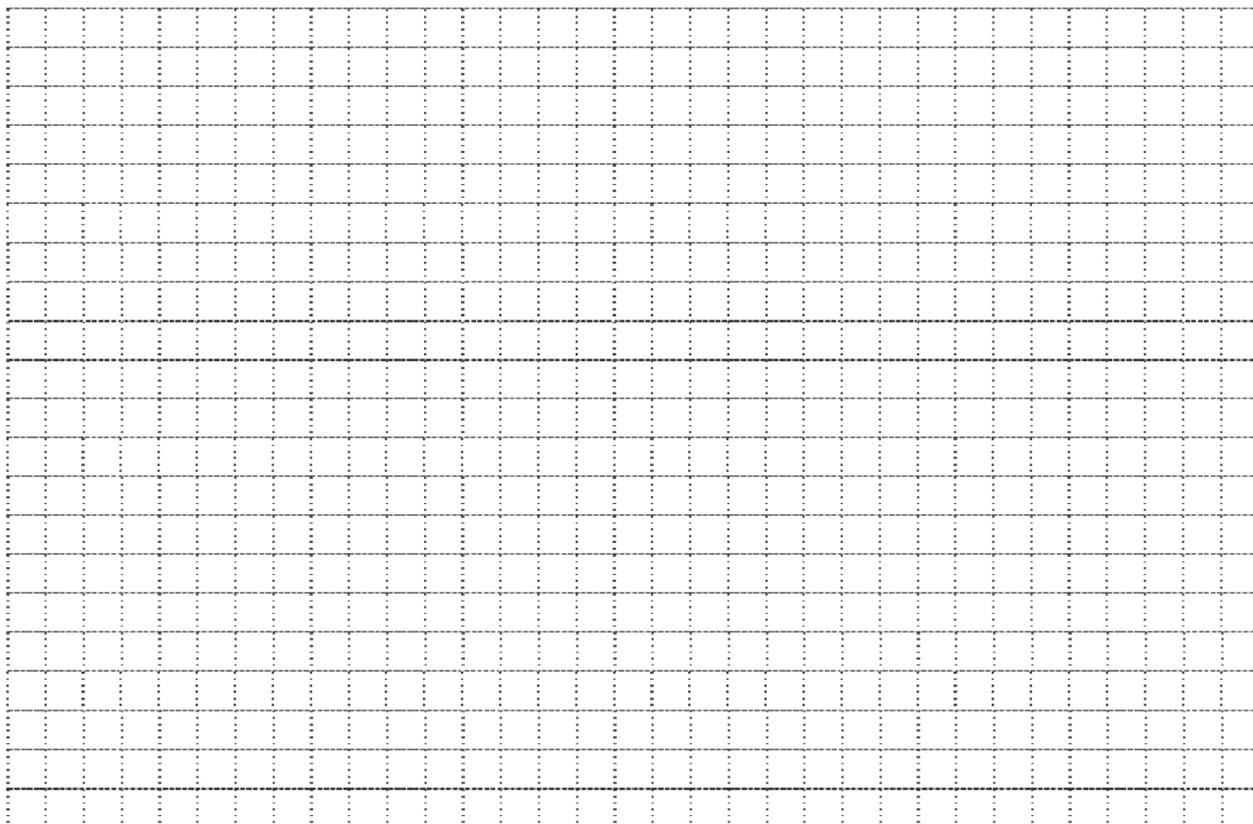


Рис. 13. Лабораторная установка

Схема нагружения балки с установленными стрелочными индикаторами



Порядок выполнения работы

1. Исходные данные записываются в таблицу 13.
2. Собирается лабораторная установка (рис. 13) с заданным углом наклона главной оси стержня (0° , 15° , 30° или 45°).
3. В таблицу 14 записываются показания четырех тензорезисторов и двух стрелочных индикаторов часового типа.
4. Балка поочередно нагружается силой $10H$, $20H$, $30H$ и $40H$. Для каждого значения нагрузки снимаются показания тензорезисторов и стрелочных индикаторов часового типа, значения записываются в таблицу 10.
5. Определяются разности показаний для каждого тензорезистора и стрелочных индикаторов часового типа для ступени нагрузки $\Delta F = 10H$, а затем определяются средние разности показаний, значения записываются в таблицу 14.
6. Составляющие прогиба свободного конца балки равны:

$$\delta_{гор} = k \cdot \Delta\Pi_{гор}^{cp},$$

$$\delta_{вер} = k \cdot \Delta\Pi_{вер}^{cp}.$$

7. Значение прогиба определяется по формуле:

$$\delta^{эксп} = \sqrt{\delta_{гор}^2 + \delta_{вер}^2}.$$

Полученные значения записываются в таблицу 15.

8. Вычисляются значения деформаций балки от силы $10H$ для каждого тензорезистора:

$$\varepsilon_i = K \cdot \Delta T_i^{cp}.$$

9. Определяются нормальные напряжения:

$$\sigma_i^{эксп} = E \cdot \varepsilon_i.$$

Полученные значения записываются в таблицу 15.

10. Вычисляется теоретическое значения прогиба и напряжений, значения записываются в таблицу 15.

11. Определяется величина расхождения между теоретическими и экспериментальными данными по формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\max - \min}{\max} \right| \cdot 100\%.$$

12. В заключении делается вывод о соответствии экспериментальных данных с теоретическими.

Таблица 13

Исходные данные

Параметры	Численные значения
Длина балки l , [мм]	
Ширина сечения b , [мм]:	
Высота сечения h , [мм]	
Расстояние от свободного конца консоли до места наклейки тензорезисторов l_1 , [мм]	
Угол наклона главной оси стержня, [град]	
Модуль упругости первого рода материала стержня E , [МПа]	
Коэффициент единицы дискретности измерителя деформаций K	
Цена деления индикатора k , [мм]	

Таблица 14

Экспериментальные данные.

Нагрузка, [Н]	Показания тензодатчиков								Показания стрелочных индикаторов			
	T ₁	Δ T ₁	T ₂	Δ T ₂	T ₃	Δ T ₃	T ₄	Δ T ₄	Π _{гор}	Δ Π _{гор}	Π _{вер}	Δ Π _{вер}
F ₀ = 0												
F ₁ = 10												
F ₀ = 20												
F ₁ = 30												
F ₀ = 40												
Средняя разность показаний												

Таблица 15

Результаты эксперимента

Величина	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Расхождение Δ, %
σ ₁ , [МПа]			
σ ₂ , [МПа]			
σ ₃ , [МПа]			
σ ₄ , [МПа]			
Прогиб, [мм]			

Дата проведения: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Зачтено: « ____ » « _____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Лабораторная работа № 6

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ДЛЯ ГИБКОГО ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТОГО СТЕРЖНЯ»

Цель работы: исследование явления потери устойчивости гибкого центрально сжатого стального стержня в упругой стадии; экспериментальное определение значений критических нагрузок гибких центрально сжатых стержней при различных способах закрепления и сравнение их с теоретическими значениями.

Краткие теоретические сведения

При нагружении прямолинейного стального стержня, закрепленного по концам, продольной центрально приложенной сжимающей нагрузкой, стержень вначале сохраняет свою первоначальную форму, а затем при определенной нагрузке внезапно выпучивается (искривляется). Нагрузка, при которой наряду с первоначальной прямолинейной равновесной формой стержня становится возможна новая искривленная равновесная форма, бесконечно близкая к прямолинейной, называется критической. При незначительном увеличении нагрузки больше критической происходят значительные отклонения от прямолинейного равновесного положения стержня.

Теоретическое значение критической силы для стержня, теряющего устойчивость при упругих деформациях, определяется по формуле Эйлера:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}.$$

где E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга);

J_{\min} – минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня (в данной работе прямоугольное поперечное сечения исследуемого стержня,

для которого $J_{\min} = \frac{bh^3}{12}$, где h – большая, b – меньшая сторона сечения);

μ – коэффициент приведения длины, зависящий от способа закрепления и нагружения стержня;

l – длина стержня.

Формула Эйлера применима, когда

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{A} \leq \sigma_{тц}$$

или гибкость стержня больше предельной гибкости:

$$\lambda \geq \lambda_{кр},$$

где $\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$;

$$\lambda_{кр} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{тц}}};$$

$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}$ – минимальный радиус инерции сечения стержня;

A – площадь поперечного сечения стержня;

$\sigma_{тц}$ – предел пропорциональности материала.

Описание лабораторной установки и оборудования

Лабораторная установка (рис. 14) включает следующие основные элементы: опорные стойки **2** и **18**; вилка **4**; датчик измерения усилия **5**; исследуемый объект – плоский стержень прямоугольного поперечного сечения **8**, на одном конце которого имеется подшипниковый узел с ползуном **15**, а на другом – подшипниковый узел **6**; индикатор стрелочного типа **14**. Перед началом работы к столу **1** крепится опорная стойка **2** с винтом **3**, в стойку вставляется вилка **4**, а в паз вилки вставляется датчик **5**. Стойка **18** устанавливается на стол, в её паз вставляется подшипниковый узел с ползуном **15** и фиксируется центральным болтом **16** рукоятки **17**. Придвигая опору **18** к опоре **2**, подшипниковый узел **6** вставляется в паз вилки **4**, после чего опора **18** фиксируется на столе **1** болтовым соединением. Для измерения поперечного перемещения стержня **8** на столе закрепляется индикаторная стойка **10** с бобышкой **11**, которая фиксируется на нужной высоте винтами **9**. В отверстие бобышки вставляется стержень **12**, а в отверстие стержня кронштейн **13** с закрепленной на ней индикатором стрелочного типа **14**, подвижная ножка которого должна упираться в среднее сечение стержня **8**. С помощью винтов **7** можно реализовать различные виды закрепления балки.

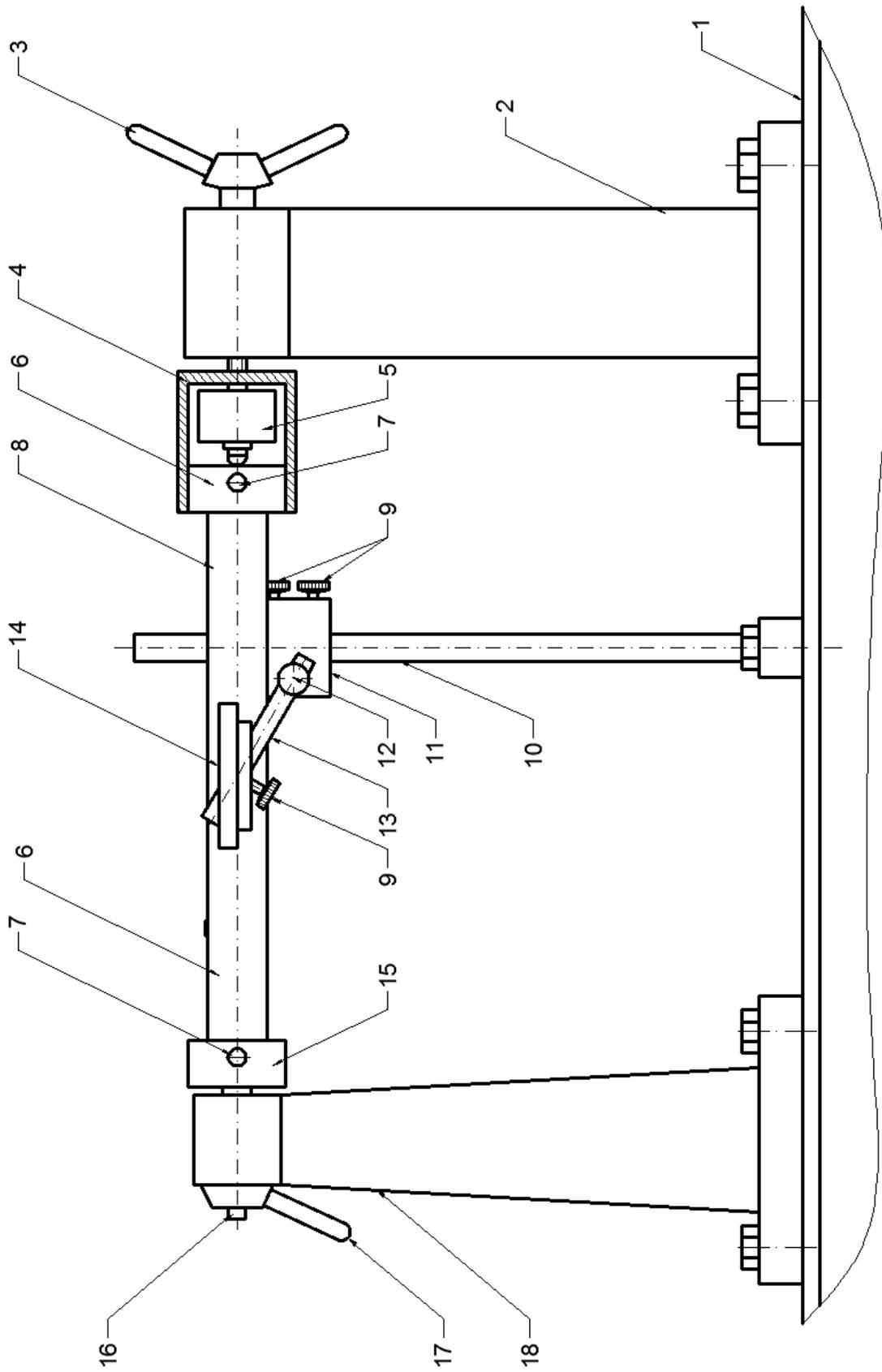


Рис. 14. Лабораторная установка для испытаний на устойчивость

Порядок выполнения работы

1. Исходные данные записываются в таблицу 16.
2. Собирается лабораторная установка.
3. Вращением винта **3** (рис. 14) стержень **8** нагружается сжимающей силой, значение которой контролируется по показаниям блока измерителя силы.
4. Для каждого значения нагрузки фиксируются показания индикатора стрелочного типа **14** и записываются в таблицу 17. Интервал изменения прикладываемой сжимающей силы выбирается преподавателем.
5. Определяется величина прогиба по формуле:

$$v = k \cdot \Pi_{\phi}.$$

где k – цена деления стрелочного индикатора;

Π_{ϕ} – показания индикатора стрелочного типа.

6. В системе координат «нагрузка – величина прогиба» с помощью экспериментальных данных наносятся точки, через которые проводится плавная кривая.

7. На построенном графике определяется значение силы, при котором прогиб стремительно возрастает практически без приращения нагрузки. Определенное экспериментально значение критической силой $F_{кр}^{эксп}$ для исследуемого стержня записывается в таблицу 18.

8. Вычисляется теоретическое значение критической силы по формуле Эйлера:

$$F_{кр}^{теор} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}.$$

Вычисленное значение записывается в таблицу 18.

9. Определяется величина расхождения между теоретическими и экспериментальными данными по формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\max - \min}{\max} \right| \cdot 100\%.$$

9. В заключении делается вывод о возможности применения формулы Эйлера для практических расчетов.

Таблица 16

Исходные данные

Параметры	Численные значения
Длина стержня l , [мм]	
Ширина сечения b , [мм]:	
Высота сечения h , [мм]	
Модуль упругость первого рода материала стержня E , [МПа]	
Коэффициент приведения длины μ	
Цена деления индикатора k , [мм]	

Таблица 17

Экспериментальные значения

№	Нагрузка, [Н]	Показания индикатора Π_ϕ
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Расчетная схема исследуемого стержня

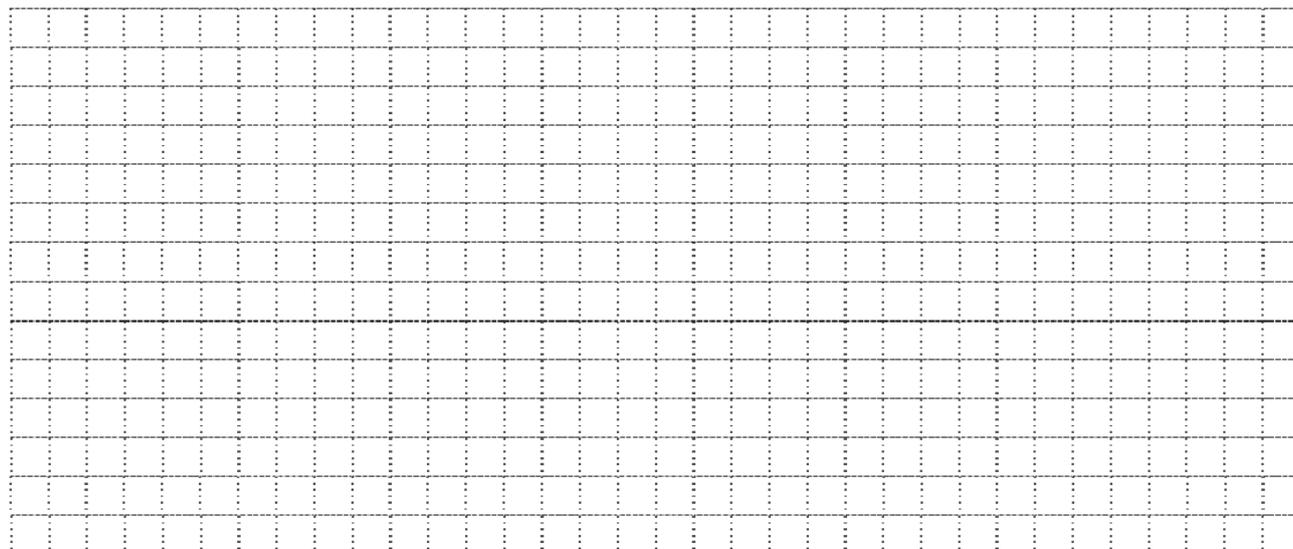


График зависимости «нагрузка – величина прогиба»

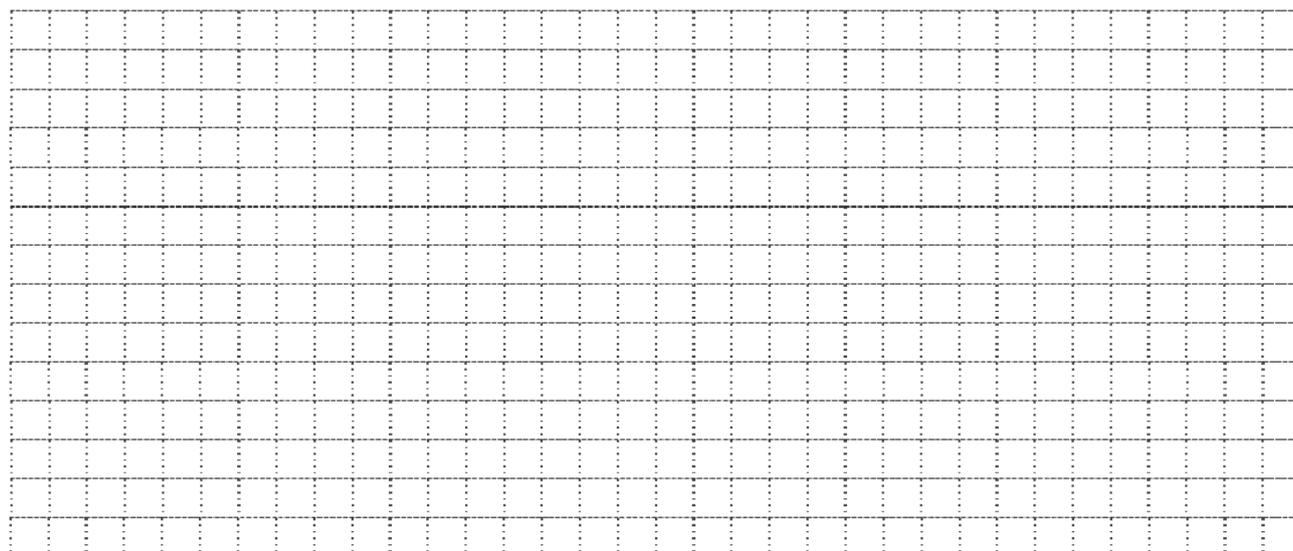


Таблица 18

Результаты эксперимента

Критическая сила	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Расхождение Δ , %
$F_{кр}$			

Дата проведения: « ____ » « ____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Зачтено: « ____ » « ____ » 20 ____ г.

преподаватель _____ / _____ /

Приложение № 1

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Вопросы для всех лабораторных работ:

1. Что являлось целью лабораторной работы?
2. Что являлось объектом исследования?
3. Какой вид деформации испытывал объект исследования?
4. Какое оборудование и измерительные приборы применялись в работе, принцип действия и что с их помощью измерялось?
5. Рассказать порядок выполнения эксперимента.
6. Какие величины определялись в работе экспериментально и как это производилось?
7. Назвать единицы измерения величин, определяемых в работе?
8. Как проводилось сравнение теоретических значений и экспериментально полученных величин?

Вопросы для лабораторной работы № 1 «Опытная проверка теоремы о взаимности работ»:

1. Как определяется возможная работа внешних сил?
2. Как формулируется теорема о взаимности перемещений?
3. Какая нагрузка называется статической?
4. Как определяется работа внешних сил?
5. Сформулируйте теорему о взаимности возможных работ внешних силовых факторов.

Вопросы для лабораторной работы № 2 «Исследование напряженного и деформированного состояния в плоской статически неопределимой раме»:

1. Что называют статически определимыми и статически неопределимыми системами?
2. Как определяется степень статической неопределимости?
3. Какие условия равновесия обычно записывают для определения опорных реакций?
4. Что понимается под выражением «каноническое уравнение» метода сил?
5. В каком порядке производится расчёт статически неопределимых систем?

6. Перемножением каких эпюр определяют коэффициенты и свободные члены системы канонических уравнений?
7. Как производится статическая проверка правильности раскрытия статической неопределимости системы?
8. Объясните суть метода сил?
9. Какие эпюры строятся для статически неопределимых рам?
10. Объясните правила перемножения эпюр по способу Верещагина.

Вопросы для лабораторной работы № 3 «Исследование напряженного состояния бруса большой кривизны при плоском поперечном изгибе»:

1. Что такое поперечный изгиб? Какие внутренние силовые факторы возникают при поперечном изгибе?
2. Какие элементы деталей машин и конструкций можно отнести к понятию «кривой брус»?
3. Какая формула используется при расчете кривого бруса по нормальным напряжениям?
4. Что происходит с положением нейтрального слоя при нагружении кривого бруса?
5. Как определяется положение нейтрального слоя?
6. По каким напряжениям ведется расчет кривых брусьев?
7. Какие эпюры необходимо строить при расчете кривых брусьев?
8. Какое правило знаков для внутренних силовых факторов в кривом брусее?
9. Какие точки поперечного сечения кривого бруса оказываются наиболее напряженными?
10. Построение эпюр внутренних силовых факторов в кривом брусее (показать на примере лабораторной работы).

Вопросы для лабораторной работы № 4 «Исследование напряженного состояния бруса при внецентренном растяжении»:

1. Что такое растяжение (сжатие)?
2. Какой вид сложного сопротивления называется внецентренным растяжением (или сжатием)?
3. К каким равнодействующим приводятся внутренние силы при внецентренном растяжении (или сжатии)?
4. Какие виды напряжений испытывает сжимаемый стержень при внецентренном приложении сжимаемой или растягиваемой нагрузки?

5. По каким формулам определяются нормальные напряжения в поперечных сечениях стержня при внецентренном растяжении и сжатии? Какой вид имеет эпюра этих напряжений?
6. Получите формулу нормальных напряжений при внецентренном действии продольной силы?
7. Проходит ли нейтральная ось при внецентренном растяжении через центр тяжести сечения? Обоснуйте.
8. Чему равно нормальное напряжение в центре тяжести сечения при внецентренном растяжении?
9. Какие отличия при внецентренном растяжении бруса, имеющего большую и малую длину?
10. Что такое ядро сечения?

Вопросы для лабораторной работы № 5 «Определение напряжений и перемещений в балке при косом изгибе»:

1. Что такое изгиб? Когда он возникает?
2. Какой изгиб называется косым?
3. Сочетанием каких видов изгиба является косой изгиб?
4. Проходит ли нейтральная ось при косом изгибе через центр тяжести сечения?
5. Какие точки сечения будут опасными при косом изгибе?
6. Как определяют перемещения при косом изгибе?
7. К каким равнодействующим приводятся внутренние силы при косом изгибе?
8. Как записывают условия прочности при косом изгибе для балки из пластичного материала?
9. По каким формулам определяются нормальные напряжения в поперечных сечениях балки при косом изгибе?
10. Порядок определения внутренних силовых факторов при косом изгибе?

Вопросы для лабораторной работы № 6 «Определение критической силы для сжатого стержня»:

1. Что понимается под устойчивостью?
2. Что понимается под устойчивым и неустойчивым равновесием?
3. Какая сила называется критической?
4. Объясните формулу Эйлера и предел ее применимости.

5. Почему в формулу Эйлера вводится минимальный момент инерции?
6. Сформулируйте условие применимости формулы Эйлера.
7. Напишите формулу Эйлера для расчета критической силы и назовите входящие величины и их единицы измерения?
8. В чем заключается условие устойчивости сжатого стержня?
9. От каких параметров стержня зависит предельная гибкость?
10. Что такое гибкость стержня?

Приложение № 2

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: Учебник для Вузов. – 3-е издание, исправленное. – М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.
2. Балабин И.В., Богданов В.В. Лабораторные работы по курсу «Сопротивление материалов» на базе универсального учебного комплекса «СМ-1»: Учебное пособие. – М.: Университет машиностроения, 2010. – 132 с.
3. Балабин И.В., Богданов В.В. Методические указания к проведению лабораторных работ по курсу «Сопротивление материалов» для студентов всех специальностей дневного отделения (в 2-х ч.). Ч. 2. – М.: МГТУ «МАМИ», 2010. – 30 с.
4. Старовойтов Э.И. Сопротивление материалов: Учебник для Вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 384 с.
5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для Вузов. – 15-е издание, исправленное. – М.: МГТУ им. Э.Н. Баумана, 2010. – 592 с.

Для записей

Для записей

Для записей

Для записей

Для записей

Для записей

Для записей