МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ. ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве практикума для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика

САМАРА
Издательство Самарского университета
2023

УДК 629.7.02.015.4(075)+624.04 (075)
ББК О52-016я7
С797

Составитель: В.А. Мехеда

Рецензенты: д-р физ.-мат. Наук, проф. В. П. Р а д ч е н к о,
канд. техн. наук, доц. В. К. Ш а д р и н

Стержневые системы. Тонкостенные конструкции. Оболочки вращения: практикум / составитель В.А. Мехеда. – Самара: Издательство Самарского университета. – 2023. – 76 с. : ил. 92, табл. 6, библиогр. 14 назв.

ISBN 978-5-7883-1903-2

Дано описание многоканальной тензометрической системы ММТС-64.01 и представлена методика проведения измерений. Приводится подробное описание восьми лабораторных установок, представляющих собой модели стержневых систем, тонкостенных конструкций и оболочек вращения. Анализируется обоснованность выбора расчётных схем. Приводятся формулы для выполнения теоретических расчётов напряжённо-деформированного состояния конструкций. Подробно излагается порядок проведения экспериментов и обработки их результатов в среде электронных таблиц EXCEL. Представлены контрольные вопросы, охватывающие основные моменты проведения эксперимента, технические характеристики оборудования, особенности выполнения теоретических расчётов и обработки результатов эксперимента.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям, профилям и дисциплинам:

- 15.03.03 Прикладная механика. Основы прочности машиностроительных конструкций. Дисциплина «Методы испытаний изделий ракетно-космической техники».
- 15.04.03 Прикладная механика Теория и приложения расчётов на прочность в машиностроении. Дисциплина «Экспериментальная механика».

УДК 629.7.02.015.4(075)+624.04 (075)
ББК О52-016я7

ISBN 978-5-7883- 1903-2
© Самарский университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 5
   1.1. Нагружающие устройства 5
   1.2. Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01 6
   1.3. Основные технические характеристики 6
   1.4. Состав изделия 7
   1.5. Сборка измерительной системы 7
   1.6. Подготовка и формирование файла исходных данных 9
   1.7. Формирование файла логических адресов 12
   1.8. Методика проведения измерений 13
   1.9. Преобразование текстового файла с расширением *.txt в файл электронных таблиц с расширением *.xlsx 16

2. ОБРАБОТКА ПОКАЗАНИЙ ТЕНЗОДАТЧИКОВ 17
   2.1. Обработка показаний датчиков силы 17
   2.2. Обработка показаний одиночных тензорезисторов 18
   2.3. Случай чистого сдвига 18
   2.4. Двухэлементная прямоугольная тензорозетка 18
   2.5. Трёхэлементная прямоугольная тензорозетка 19
   2.6. Дельта-розетка 20

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 21

4. Лабораторная работа №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 22
   4.1. Описание экспериментальной установки 23
   4.2. Теоретические расчёты 23
   4.3. Экспериментальное исследование 25
   4.4. . Статистическая оценка результатов измерения 25
   4.5. Порядок выполнения теоретических расчётов и обработки результатов измерений 28
   4.6. Контрольные вопросы 28

5. Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ФЕРМА К ПЛОСКИМ СВАРНЫМ СТЕРЖНЕВЫМ СИСТЕМАМ 29
   5.1. Описание объекта исследования 29
   5.2. Теоретические положения 30
   5.3. Расчётная схема рама 30
   5.4. Расчётная схема «ферма» 30
   5.5. Экспериментальное определение напряжений и усилий в стержнях 31
   5.6. Порядок выполнения теоретических расчётов и обработки результатов измерений 32
   5.7. Контрольные вопросы 33

6. Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ШПАНГОУТА 35
   6.1. Объект исследования 35
   6.2. Теоретические положения 35
   6.3. Экспериментальное определение деформаций и напряжений 38
   6.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов 39
   6.5. Контрольные вопросы 40

7. Лабораторная работа №4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГОВОГО ШПАНГОУТА 41
   7.1. Описание объекта исследования 41
   7.2. Теоретические расчёты 41

7.3. Экспериментальное определение деформаций и напряжений ... 43
7.4. Порядок выполнения теоретических расчётов и обработки результатов измерений ... 44
7.5. Контрольные вопросы ... 44

8. Лабораторная работа №5. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЯСНОГО КЕССОНА ... 46
8.1. Описание объекта исследования ... 46
8.2. Теоретические положения ... 47
8.3. Экспериментальное определение деформаций и напряжений ... 49
8.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов ... 50
8.5. Контрольные вопросы ... 52

9. Лабораторная работа №6. СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ОБОЛОЧКИ ... 53
9.1. Описание объекта исследования ... 53
9.2. Теоретические положения ... 53
9.3. Экспериментальное измерение деформаций и расчёт напряжений ... 55
9.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов ... 57
9.5. Контрольные вопросы ... 57

10. Лабораторная работа №7. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО БАКА СО СФЕРИЧЕСКИМИ ДНИЩАМИ ... 59
10.1. Объект исследования ... 59
10.2. Теоретические положения ... 60
10.3. Расчёт напряжений в баке по безмоментной теории ... 60
10.4. Расчёт напряжений в баке по моментной теории ... 61
10.5. Экспериментальное определение деформаций и напряжений ... 61
10.6. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов ... 63
10.7. Исследование линейности показаний тензорезисторов от давления ... 66
10.8. Контрольные вопросы ... 66

11. Лабораторная работа №8. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРОВОГО БАКА ... 68
11.1. Объект исследования ... 68
11.2. Теоретические положения ... 69
11.3. Экспериментальное определение деформаций и напряжений ... 69
11.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов ... 70
11.5. Контрольные вопросы ... 71

Список литературы ... 73

1. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1.1. Нагружающие устройства

Нагружение лабораторных установок производится либо гидравлическим нагружающим устройством (рис. 1), либо устройством, содержащим червячный редуктор (рис. 2).

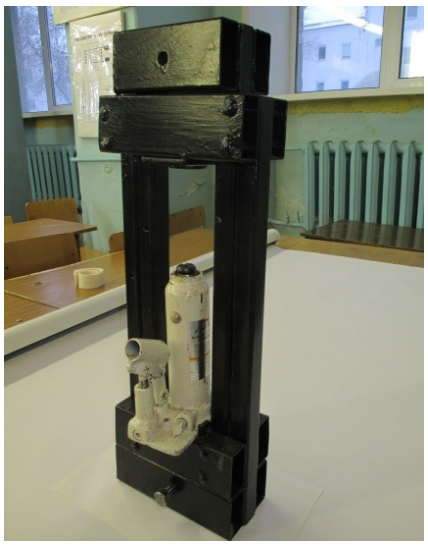


Рис. 1 – Гидравлическое нагружающее устройство

Рис. 2 – Нагружающее устройство с червячным редуктором

Уровень нагрузки визуально контролируется по показаниям пружинного динамометра (рис. 3). Кроме того, в силовую цепочку нагружения лабораторных установок включается тензодинамометр (рис. 4), который является более точным измерителем усилия. Приведённая погрешность пружинного динамометра 2%, а тензодинамометра – менее 0,03%.

Рис. 3 – Пружинный динамометр

Рис. 4 – Тензодинамометр

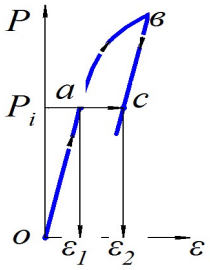


Рис. 5 – Влияние гистерезиса

Установленный уровень нагрузки с течением времени немного снижается из-за больших контактных напряжений в шарнирных соединениях типа «отверстие-болт» силовой цепочки нагружения. Тензодинамометр позволяет фиксировать нагрузку в момент проведения измерений.

Обычно теоретические расчёты предполагают, что материал исследуемой конструкции строго подчиняется закону Гука. Это условие лучше выполняется, если до выполнения измерений провести так называемую предварительную «тренировку» конструкции, т.е. нагружение её до нагрузки, превышающей максимальную, с последующим разгружением.

Если, нагружая конструкцию до уровня P_i (точка *a* на рис. 5), нагрузку случайно превысили (точка *в*), то опустившись в точку *c*, тоже соответствующую по динамометру заданной

нагрузке P_i, получим деформацию ε_2, вместо ε_1. Сказались гистерезисные явления как конструкционные (трение в заклёпках, болтовых соединениях, трение между склёпанными листами и др.), так и внутри конструкционных материалов. Чтобы снизить влияние гистерезиса на результаты измерений, необходимо конструкцию после перегрузки разгрузить и заново реализовать нагружение до точки *a*.

1.2. Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01

Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01 (далее ИС) разработана в СИБНИА (г. Новосибирск), сертифицирована и используется при проведении прочностных испытаний авиационных конструкций. Система многофункциональная и достаточно сложная. В настоящем пособии подробно рассмотрены те режимы и опции системы, которые используются студентами при проведении лабораторных работ прочностного цикла. С другими возможностями ИС ММТС-64.01 можно ознакомиться в руководстве по эксплуатации [14], которое рассчитано на персонал, прошедший специальную подготовку по техническому использованию и обслуживанию ИС.

ИС обеспечивает сбор, обработку и регистрацию измерительной информации средствами вычислительной техники.

1.3. Основные технические характеристики

Источниками измерительной информации ИС являются тензорезисторы с номинальным сопротивлением от 50 до 200 Ом, а также термопары и термопреобразователи.

Таблица 1 – Таблица кодов, определяющих чувствительность измерительной системы

Тип измерительной схемы	Код измерительной программы	Диапазон изменения сопротивления тензорезистора или выходного напряжения моста
«Четверть моста»	40	3 Ом
	36	6 Ом
	34	12 Ом
	33	24 Ом
«Полумост»	24	3 Ом
	20	6 Ом
	18	12 Ом
	17	24 Ом
«Мост»	8	-30…+30 мВ
	4	-60…+60 мВ
	2	-120…+120 мВ
	1	-240…+240 мВ

ИС работает под управление компьютера в операционной системе Windows.

Число каналов в одном измерительном модуле ..... 64.

Время преобразования информативного параметра датчика в код результата измерения ..... не более 1 микросекунды.

ИС обеспечивает измерение по схемам включения датчиков «четверть моста», «полумост» и полный «мост».

Чувствительность ИС к изменению сопротивления тензорезистора или к изменению напряжения на выходе моста (см. табл. 1) регулируется ступенчато заданием кода измерительной программы.

Измерительная система не имеет ограничений по порядку подключения разнотипных датчиков.

Время прогрева, мин. ..... 30.

Длина линий связи от ИС до датчика ..... не более 20 м.

Длина линий связи от ИС до компьютера ..... не более 100 м.

Общее сопротивление каждого провода, подключающего тензорезисторы,
не должно превышать .....8 Ом.
Приведённая погрешность измерительного канала (ИК).....менее 1%.
Внешний вид измерительной системы ММТС-64.01 показан на рис. 6.

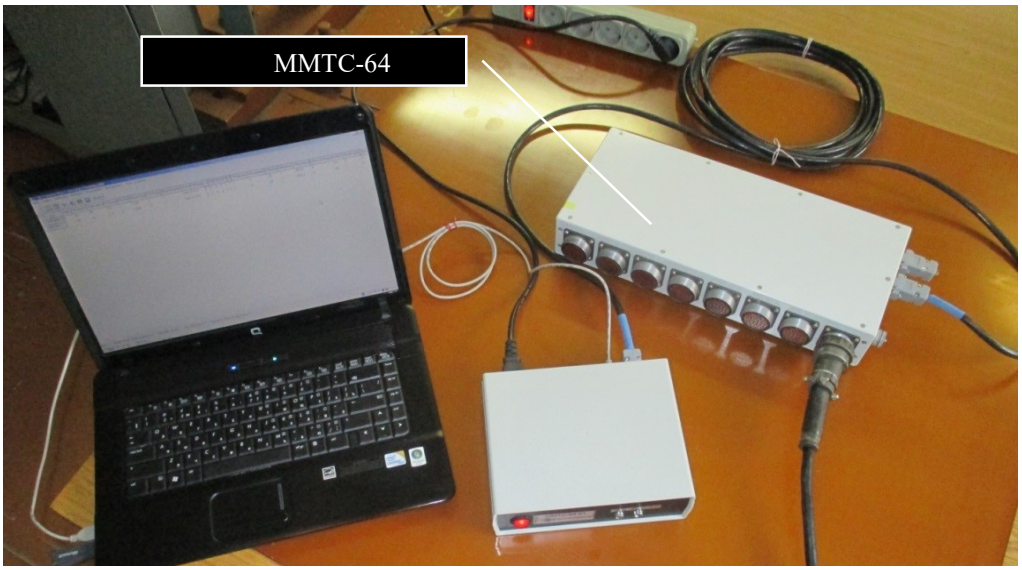


Рис. 6 – Внешний вид микропроцессорной многоканальной тензометрической системы ММТС-64.01 с одним модулем

1.4. Состав изделия

В состав измерительной системы входят:
ноутбук;
модули тензометрической системы ММТС-64.01 (до шести единиц);
хост-контроллер;
концевой терминатор.

1.5. Сборка измерительной системы

Подключение тензодатчиков лабораторной установки к модулям ММТС-64.01 осуществляется электрическими кабелями с 32-контактными разъёмами на концах (рис. 6 и 7).

Кабели взаимозаменяемые и могут присоединяться любым концом к разъёмам лабораторной установки или тензостанции. Одним кабелем к модулю подсоединяются восемь датчиков (тензорезисторов, датчиков силы или термопар).

Первый из последовательно соединённых модулей подключается к хост-контроллеру и ноутбуку (см. рис. 8) и ему присваивается логический номер «0». Если число модулей больше одного, второй и все оставшиеся подключаются последовательно с использованием второго 9-контактного разъёма (рис. 9). Остальным присваиваются логические номера 1, 2 и т. д.

В модуль, замыкающий последовательную цепочку, вставляется терминатор (рис. 8 и 11).

Модуль (рис. 12, 13, 14) должен быть надёжно заземлён (рис. 9). Электрический кабель с 9-контактными разъёмами на концах, соединяющий модуль с хост-контроллером, показан на рис. 10.

Хост-контроллер (рис. 15) включает в себя источник питания, приёмник и передатчик интерфейса RS-485 и устройство сопряжения с компьютером. Он предназначен для подключения к нему до шести 64-канальных модулей ММТС-64.01 и служит для сбора и передачи данных с модулей в компьютер. Хост-контроллер к ноутбуку подключается USB-кабелем (рис. 16).

Рис. 7 – Электрические кабели, соединяющие тензорезисторы лабораторной установки с измерительным модулем ММТС-64.01

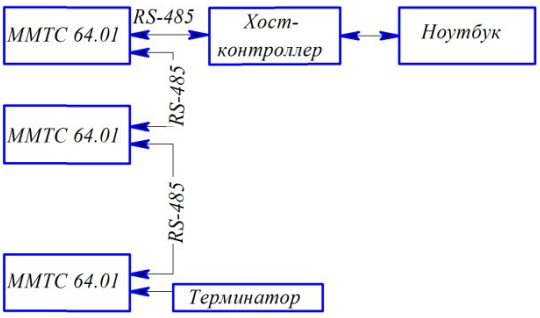


Рис. 8 – Схема подключения модулей ММТС-64.01 к ноутбуку

Рис. 9 – Модуль ММТС-64.01. Вид слева

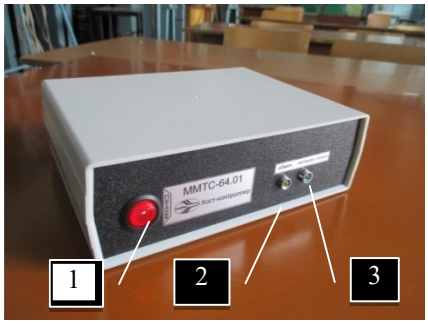
Рис. 10 – Кабель, соединяющий модуль ИС с хост-контроллером

Рис. 11 – Терминатор

Рис. 12 – Лицевая сторона модуля

Рис. 13 – Задняя сторона модуля

Рис. 14 – Вид на модуль с правой стороны



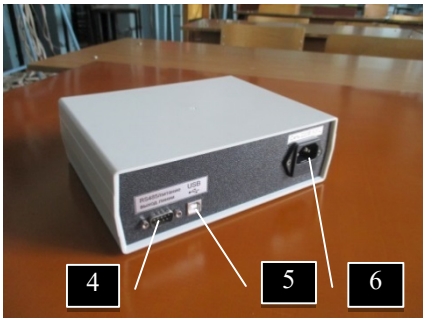


Рис. 15 – Внешний вид хост-контроллера со стороны передней панели (слева) и задней панели (справа):
1 – сетевой выключатель; 2 – индикатор состояния обмена информации по линии RS-485; 3 –индикатор линии питания, подключающей модули ММТС-64.01; 4 – разъём для подключения кабеля, соединяющего модули ММТС-64.01; 5 – USB-разъём для подключения к компьютеру; 6 – сетевой разъём для подключения питания 220 В

Рис. 16 – USB-кабель, соединяющий хост-контроллер с ноутбуком

1.6. Подготовка и формирование файла исходных данных

Исходные данные формируются в виде двух файлов:

- Файла исходных данных.
- Файла логических адресов.

Двойным щелчком по иконке (рис. 17) рабочей программы ММТС 64-01 открывается её основное окно (рис. 18). Открываем меню **Файл** (рис. 19).

Рис. 17 – Ярлык рабочей программы ММТС 64-01 на рабочем столе компьютера

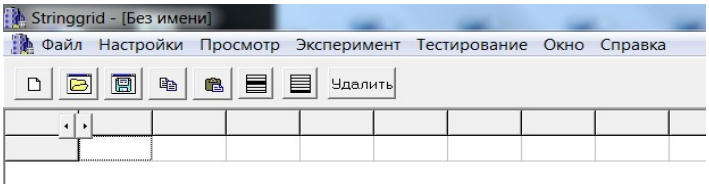


Рис. 18 – Основное окно рабочей программы ММТС 64-01

Щёлкаем мышкой по строке **Создать файл исходных данных** (см. рис. 19). Появляется окно с таблицей формирования исходных данных (рис. 20).

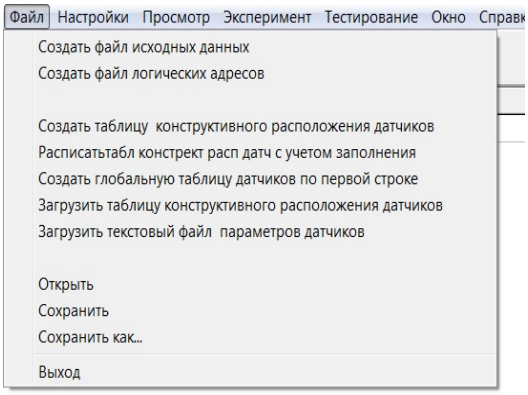


Рис. 19 – Окно меню Файл

Каждому каналу измерения и, соответственно, каждому датчику (тензорезистору, датчику давления или температуры) в этой таблице соответствует одна строка.

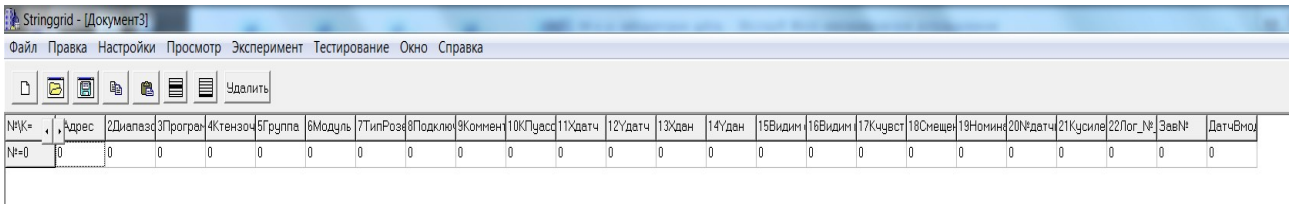


Рис. 20 – Начальный вид таблицы исходных данных

Входим в меню **Правка** и вставляем дополнительно ещё одну строку:

Правка **>** Вставить строку.

Оставляем курсор на этой строке и увеличиваем число строк таблицы в соответствии с количеством опрашиваемых датчиков:

Правка **>** Вставить N строк.

Здесь N – включает число опрашиваемых датчиков. Меню **Правка** допускает добавить строку или удалить, если ошиблись.

В исходной таблице из N строк все ячейки, кроме первого столбца, пустые. На рис. 21 приведена таблица, в которой уже введены исходные данные. Поскольку таблица большая, названия столбцов на экране монитора приводятся в сокращённом виде. Чтобы прочитать полное название столбца, следует щёлкнуть по его названию правой кнопкой мыши и задержать нажатие.

1 - [C:\Program Files\SibNIA\SibNIA\ЧЕТЫРЕХПОЯСНЫЙ КЕССОН.dbf]

Файл Правка Настройки Просмотр Эксперимент Тестирование Окно Справка

Удалить

№\К=	1Адр	2Ди	3Пр	4Ктен	5Гру	6Модуль	7Ти	8П	9Комм	10КП	11Х	12Y	13Х	14Y	15	16	17Кчув	18Сме	19Но	20№д	21Кус	22	№за	Дат	Рез
1 M=0(0-63)A=0	0	0	8	0	0	0	0	1	мост	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0	0	232	0	0
2 M=0 A=1	1	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	2	2570,	0	232	1	0
3 M=0 A=2	2	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	3	2570,	0	232	2	0
4 M=0 A=3	3	150	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	4	2570,	0	232	3	0
5 M=0 A=4	4	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	5	2570,	0	232	4	0
6 M=0 A=5	5	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	6	2570,	0	232	5	0
7 M=0 A=6	6	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	7	2570,	0	232	6	0
8 M=0 A=7	7	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	8	2570,	0	232	7	0
9 M=0)A=8	8	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	9	2570,	0	232	8	0
10 M=0)A=9	9	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	10	2570,	0	232	9	0
11 M=0)A=10	10	150	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	11	2570,	0	232	10	0
12 M=0)A=11	11	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	12	2570,	0	232	11	0
13 M=0)A=12	12	151	40	2,18	0	205000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	13	2570,	0	232	12	0
14 M=0)A=13	13	151	40	2,18	0	70000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	14	2570,	0	232	13	0
15 M=0)A=14	14	150	40	2,18	0	70000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	15	2570,	0	232	14	0
16 M=0)A=15	15	151	40	2,18	0	70000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	16	2570,	0	232	15	0
17 M=0 A=16	16	150	40	2,18	0	70000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	17	2570,	0	232	16	0
18 M=0 A=17	17	151	40	2,18	0	70000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	18	2570,	0	232	17	0
19 M=0 A=18	18	150	40	2,18	0	70000	0	1	0	0,30	0	0	0	0	0	0	1	0	120	19	2570,	0	232	18	0

9A=8 | D=151 | P=40 | Одиночный | K=2,18 | M=205000 | R=120 | Кус=2570,1 | №=9 | 0 | Строк 57 Подкл 56 Мод 1

Рис. 21 – Пример таблицы исходных данных на экране дисплея

Сначала рассмотрим введение исходных данных в нулевую строку таблицы. Как правило, она отводится под показания тензодинамометра, и её содержание отличается от содержания следующих строк.

Тензорезисторы тензодинамометра образуют полный мост. В этом случае в нулевую строку файла исходных данных достаточно ввести следующую информацию:

- **в третий столбец –** цифру *8*, задавая тем самым максимальную чувствительность измерительной системы к показаниям тензодинамометра;
- **в восьмой столбец** – *1* – информация, что канал подключён к измерительной системе;
- **в девятый столбец** – слово «мост», признак полного моста;
- **в семнадцатый столбец** – передаточный коэффициент $A = tg\alpha$ (см. рис. 22), позволяющий показания измерительного канала в кодах переводить в значения усилия в Ньютонах.

В остальных ячейках строки можно оставить нули.

После нулевой строки формируем первую строку.

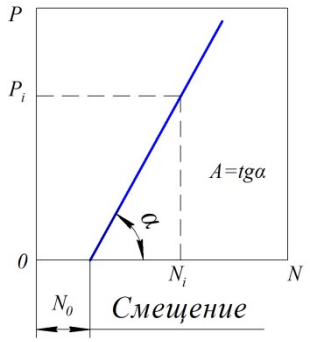


Рис. 22 – Тарировочный график тензодинамометра

Обычно на исследуемую конструкцию наклеиваются тензорезисторы, взятые из одной партии. Вследствие этого, информация после первой строки в последующих строках, в основном, повторяется.

Алгоритм ввода информации в такие строки следующий: формируется информация в одной строке, а затем эта строка копируется на весь массив. Далее в этом массиве вводятся отличия строк, касающиеся изменения от строки к строке номеров каналов, номеров тензорезисторов и т. д.

- **Первый столбец.** Вводим «1», так как нумерация измерительных каналов, к которым подключены тензорезисторы по схеме «четверть моста» начинается с единицы.

•**Второй столбец.** Сюда вводится условное число x, учитывающее номинальное сопротивление одиночного тензорезистора. Оно вычисляется по формуле

$$x = \frac{R_н \cdot 255}{R_{\max}} . \qquad (1)$$

Здесь x – искомое значение условного числа;

$R_н$ – номинальное значение сопротивления одиночного тензорезистора в Омах;

$R_{\max} = 200\ Ом$ – максимально возможное сопротивление применяемого тензорезистора.

Значения x используются для диагностики измерительных каналов до проведения эксперимента. Выявляются измерительные каналы с обрывом цепи, коротким замыканием, либо случаи, когда сопротивление тензорезистора выходит за пределы допустимого значения. До эксперимента либо устраняется дефект, либо измерительный канал отключается.

•**Третий столбец.** Вводится условное число (код), определяющее коэффициент усиления измерительного канала и тип датчика. Коды приведены в табл. 2. Например: допустим, экспериментатор решил провести измерения показаний одиночных тензорезисторов с максимальным усилением «8». Одиночные тензорезисторы подключаются только по схеме «Четверть моста». На пересечении столбца «Четверть моста» и строки, содержащей код усиления «8» находим код программы «40». Это значение условного кода вводится в третий столбец таблицы исходных данных.

Таблица 2 – Коды, с помощью которых измерительной системе задаётся коэффициент усиления и тип измерительного моста

Условный код коэффициента усиления	Условный код типа моста			Код термопары	Коэффициент усиления ИС
	Мост	Полумост	Четверть моста		
1	1	17	33	49	321
2	2	18	34	50	642
4	4	20	36	52	1285
8	8	24	40	56	2570

•**Четвёртый столбец.** Коэффициент тензочувствительности тензорезистора. Он указывается в инструкции к лабораторной работе.

•**Пятый столбец.** Вводится целое число от 0 до 19, указывающее на принадлежность датчиков к определённой группе. Например, группу датчиков, расположенную на верхней панели конструкции можно обозначить одной цифрой, на нижней – другой и т.д.

•**Шестой столбец**. Модуль упругости материала, на который наклеен тензорезистор.

•**Седьмой столбец.** Можно указать тип датчика: одиночный – 0, первый датчик в тензорозетке – 1.

•**Восьмой столбец.** Признак подключения канала с данным адресом. «1» – канал подключен, «0» – канал не опрашивается. Неработающие каналы, дефектные надо отключать, так как они влияют на нормальную работу других каналов.

•**Девятый столбец**. Текстовый комментарий для удобства идентификации каналов. Например, «тензодатч. 1». Этот текст вместе с адресом (столбец 1) и номером датчика (рис. 21, столбец 20) будет высвечиваться во всех информационных сообщениях.

•**Десятый столбец.** Коэффициент Пуассона. Например, для стали – 0,33, дюраля – 0,3.

•**Одиннадцатый – шестнадцатый столбцы.** Опции этих столбцов в лабораторном практикуме не используется, поэтому в соответствующих позициях проставляются нули.

•**Семнадцатый – восемнадцатый столбцы**. Вводятся нули, так как опции этих столбцов относятся к датчику усилия, а не к отдельным тензорезисторам.

•**Девятнадцатый столбец**. Номинальное сопротивление тензорезистора в Омах.

•**Двадцатый столбец**. Номер датчика для идентификации. Высвечивается во всех диалогах выбора канала и информационных сообщениях. В лабораторном практикуме – это номер датчика из инструкции к лабораторной работе.

- **Двадцать первый столбец.** Вводится величина коэффициента усиления измерительного канала из табл. 2. В примере, приведённом на рис. 21, коду усиления системы «40», введённому в третий столбец, при схеме измерения «четверть моста» соответствует коэффициент усиления 2570.
- **Двадцать второй столбец.** Вводится логический номер модуля. Если используется один модуль, то вводится «0».
- **Двадцать третий столбец.** Вводится заводской номер подключённого измерительного модуля, который указан на шильдике.
- Двадцать четвёртый столбец – резервный.

Измерительная система ММТС-64.01 используется при массовом тензометрировании. При прочностных испытаниях самолётов количество наклеенных тензорезисторов может доходить до 15 тысяч и более. Чтобы не запутаться в таком объёме информации, в протоколах испытаний должна быть чётко отражена вся информация по каждому тензорезистору и в удобной форме. Вся информация, введённая в 23 ячейки строки по каждому тензорезистору, не используется при расчёте деформаций и напряжений в точке конструкции и на первый взгляд кажется излишней. Однако она используется при формировании протоколов результатов промышленных испытаний конструкций.

Копируем содержимое первой строки на остальные строки. Выделяем ячейки первой строки (кроме служебного затенённого первого столбца) и запоминаем в буфер. Выделяем все строки, кроме первой и нулевой, щёлкаем правой кнопкой мыши на выделенном поле и вставляем информацию сразу во все строки.

Вводим номера каналов в первый столбец. Номера каналов отсчитываются, начиная с нуля. Проверяем наличие нуля в первой ячейке столбца. Выделяем все ячейки первого столбца, входим в меню

Правка>Пронумеровать по порядку.

Аналогично поступаем с содержимым 20-го и 24-го столбцов. Запоминаем файл исходных данных (см. меню рис. 19).

Файл > Сохранить как > Четырёхпоясный кессон> Сохранить

На рис. 21 в качестве примера приведён фрагмент файла исходных данных для лабораторной работы «Исследование НДС четырёхпоясного кессона».

1.7. Формирование файла логических адресов

Раскрываем меню **Файл** (см. с. 9, рис. 17) и щёлкаем мышью по строке **Создать файл логических адресов**. Раскрывается окно (рис. 23) с таблицей, в первом столбце которой надо указать логические номера используемых модулей, во втором столбце – заводские номера модулей, в третьем – информацию о подключении модуля (1 – да; 0 – нет).

На рис. 23 в качестве примера приведён вариант, когда конфигурация измерительной системы включает один модуль (порядковый номер подключения «0») с заводским номером 232. Остальные столбцы при проведении лабораторных работ не используются.

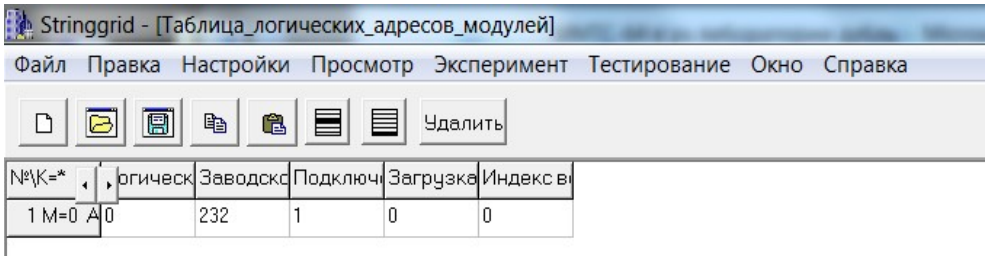


Рис. 23 – Информация в файле логических адресов

Закрываем окно **Таблица логических адресов модулей**, щёлкая по нижнему крестику в правом верхнем углу экрана монитора.

1.8. Методика проведения измерений

Двойным щелчком по иконке рабочего стола компьютера открываем основное окно рабочей программы измерительной системы ММТС 64-01.

Заходим в меню **Файл>Открыть.** Из выпадающего меню открываем файл с названием выполняемой лабораторной работы.

Раскрываем меню: **Эксперимент>Проведение эксперимента.**

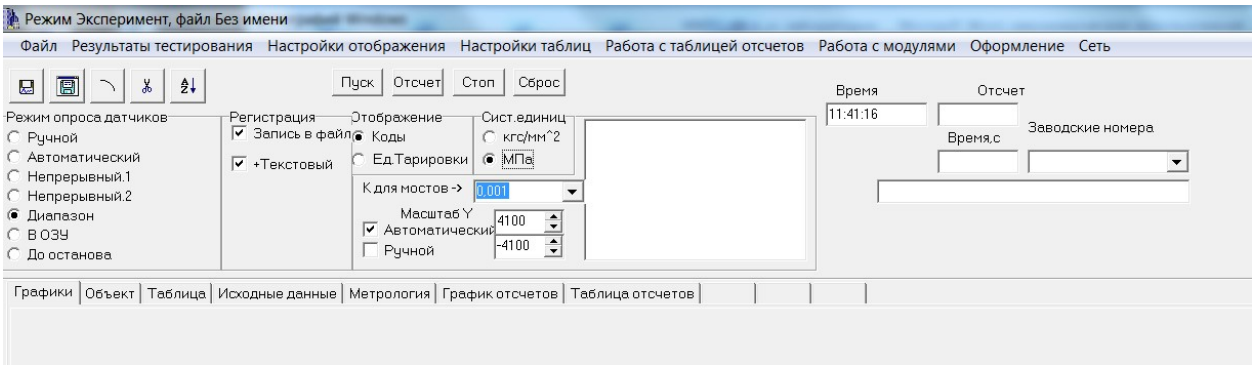
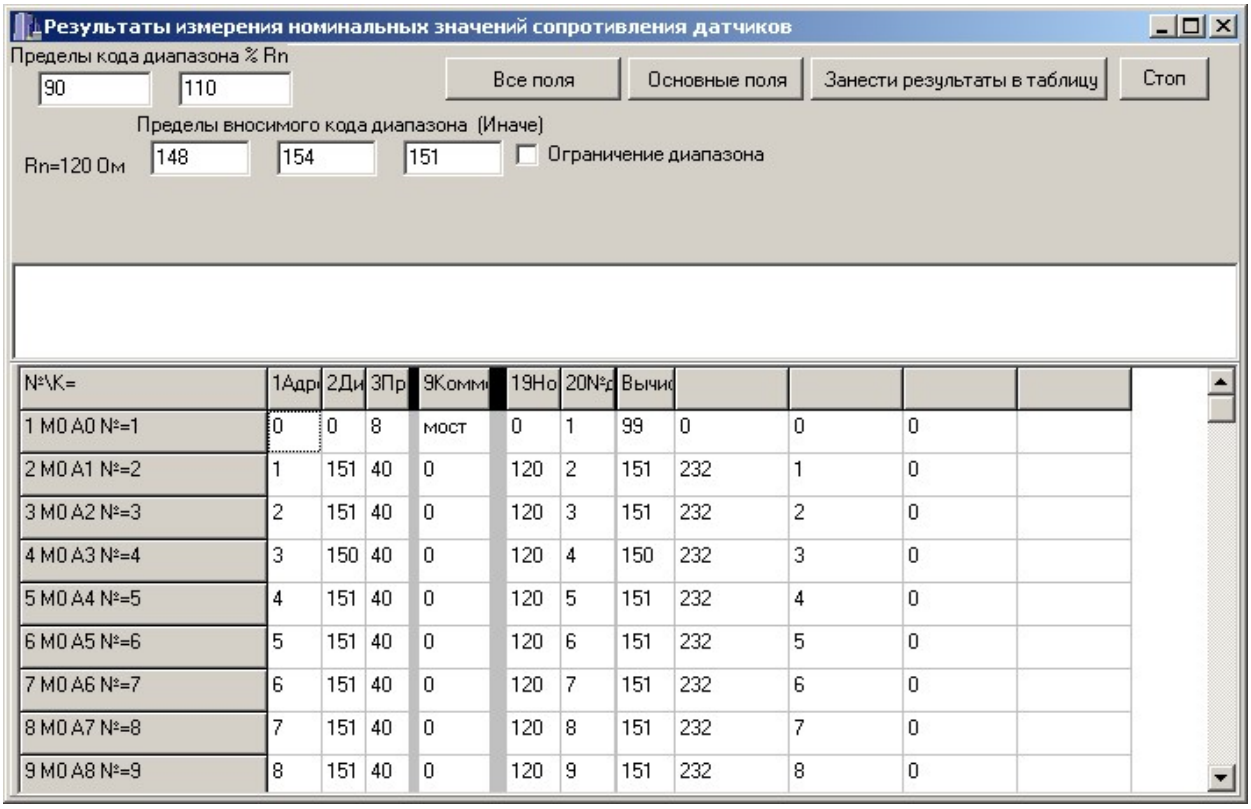


Рис. 24 – Окно режима Эксперимент>Диапазон

В окне **Режим Эксперимент** выставляем «галочки» и положения переключателей так, как показано на рис. 24. Запускаем программу в режиме «**Диапазон**» кнопкой **Пуск**.

Программа опрашивает все подключённые датчики (у которых в столбце восемь стоит цифра «1») 256 раз. Причём код *x* от одного измерения к другому программно изменяется от 1 до 255. На это уходит примерно 40 секунд. О ходе процесса можно наблюдать, нажав кнопку «**Графики**», которая расположена первой в строке посередине окна. Определяется диапазон значений *x*, при которых возможны измерения, и эта информация выдаётся в виде таблицы (рис. 25).



№\K=	1Адр	2Ди	3Пр	9Комм	19Но	20№д	Вычис			
1 M0 A0 №=1	0	0	8	мост	0	1	99	0	0	0
2 M0 A1 №=2	1	151	40	0	120	2	151	232	1	0
3 M0 A2 №=3	2	151	40	0	120	3	151	232	2	0
4 M0 A3 №=4	3	150	40	0	120	4	150	232	3	0
5 M0 A4 №=5	4	151	40	0	120	5	151	232	4	0
6 M0 A5 №=6	5	151	40	0	120	6	151	232	5	0
7 M0 A6 №=7	6	151	40	0	120	7	151	232	6	0
8 M0 A7 №=8	7	151	40	0	120	8	151	232	7	0
9 M0 A8 №=9	8	151	40	0	120	9	151	232	8	0

Рис. 25 – Таблица результатов измерения номинальных значений сопротивления датчиков, подключённых по схеме «четверть моста»

Необходимо сравнить оценочные значения x (столбец 2) и определённые программой (столбец, следующий за двадцатым). Если эти значения совпадают или расхождение не больше двух единиц, то нажатием кнопки **Занести результаты в таблицу** вычисленные значения x переносим в основную таблицу исходных данных (операция коррекции диапазона измерений).

Появляется дополнительное сообщение, которое показано на рис. 26. В сообщении программа предупреждает о подозрительных датчиках. Если измерительный канал неисправен или повреждён тензорезистор, то такой канал следует отключить введением «0» в столбец «8» основной таблицы исходных данных (рис. 21).

Как видно из рис. 26, в нашем случае программа обнаружила подозрительный нулевой канал. Этого и следовало ожидать, так как к нулевому каналу подключён не отдельный тензорезистор, а целый измерительный мост датчика усилий. Поэтому такое предупреждение не является основанием для отключения нулевого канала.

Закрываем окно **Коррекция диапазона** .

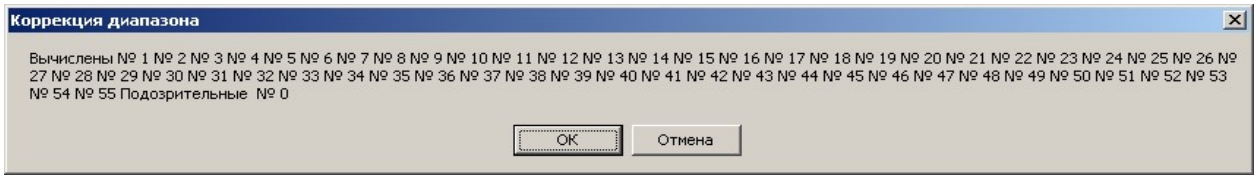


Рис. 26 Сообщение о корректируемых диапазонах

Переходим в режим опроса датчиков **Непрерывный 2** (рис. 27). Справа от названия этой опции появляется небольшое окошко, в котором можно задать количество повторных отсчётов (при заданном уровне нагрузки). Программа по умолчанию предлагает 11 отсчётов. С предлагаемым количеством отсчётов следует согласиться, так как этого количества повторных измерений достаточно, чтобы получить статистически надёжные результаты.

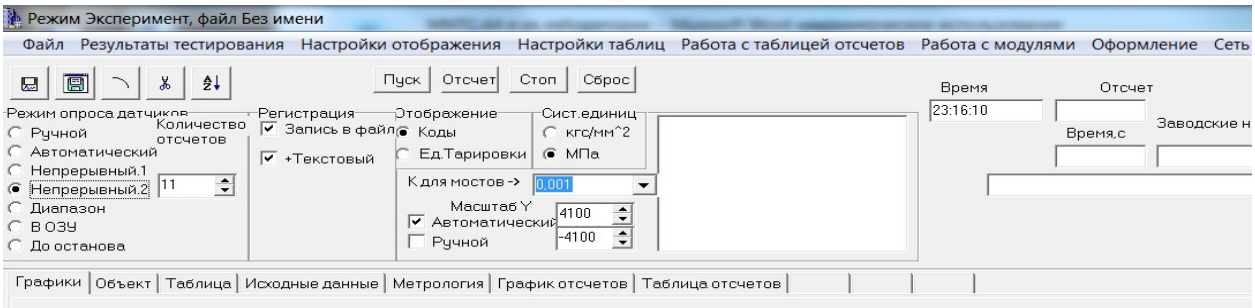


Рис. 27 – Окно режима Эксперимент>Непрерывный 2

Следует убедиться, что в разделе **Регистрация** включен флажок **+Текстовый**, а в разделе **Отображение – Коды**. С помощью флажка **+ Текстовый** данные непосредственно в ходе эксперимента можно сохранить в текстовом файле, пригодном для обработки с помощью электронных таблиц Microsoft Excel.

Чтобы увидеть результаты 11 отсчётов, следует нажать опцию **Метрология** (строка меню ближе к середине экрана).

Нагружаем испытываемую конструкцию по указанию преподавателя предварительной нагрузкой P_0 или предварительным давлением p_0.

Запускаем процесс измерений кнопкой **Пуск**. Программа по умолчанию предлагает присвоить имя файлу результатов измерений, содержащее в цифровом виде месяц, число, час и минуту начала эксперимента (рис. 28). Соглашаемся с предложением программы. Оно рационально, так как позволяет избежать повторения имён файлов и разобраться по расписанию занятий какая студенческая группа выполняла эксперимент. Менее чем через секунду после команды **Сохранить файл** появляются результаты 11 измерений и результаты их статистической обработки (рис. 29).

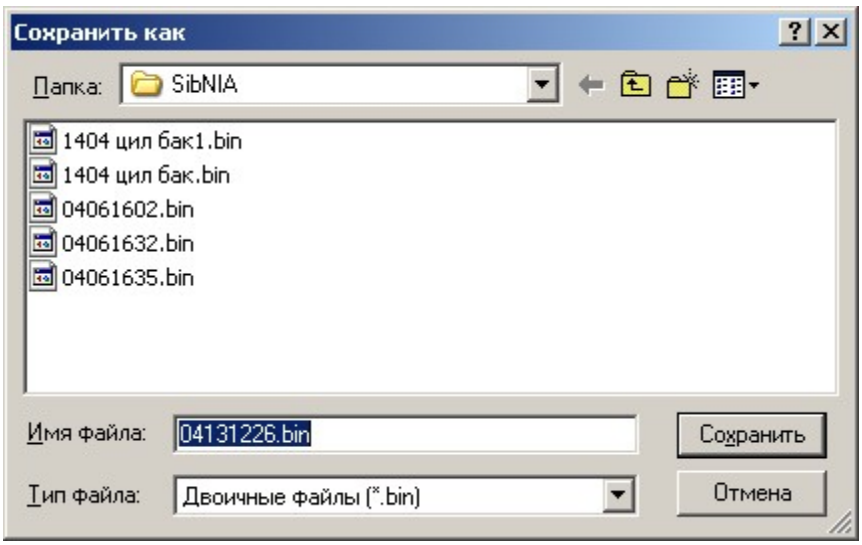


Рис. 28 – Сохранение результатов эксперимента (Имя файла содержит информацию: Эксперимент выполнен 13 апреля в 12 часов 26 минут)

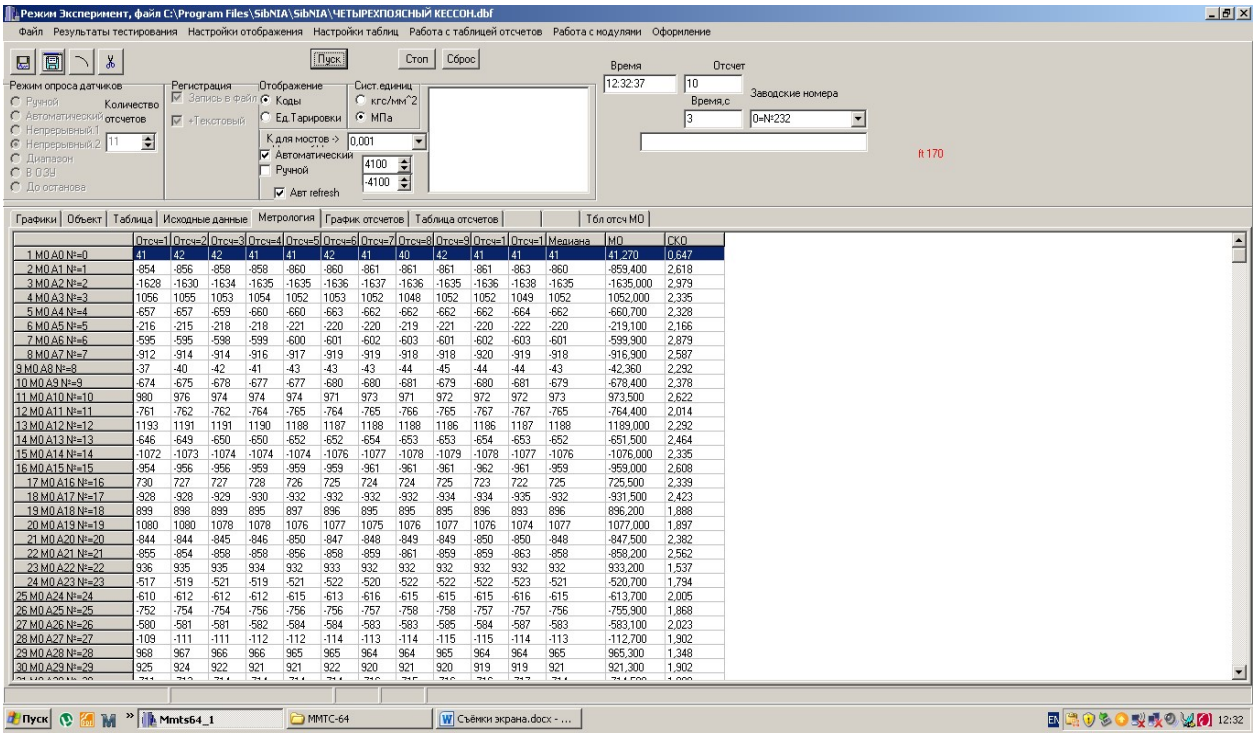


Рис. 29 – Таблица результатов измерений на начальном уровне нагрузки

По всем каналам по соотношению среднего значения и среднеквадратического оцениваем надёжность полученных данных. Показание отсчёта равное -4096 или +4096, говорит о том, что вышел из строя либо датчик, либо соединительный провод.

Переходим на следующий уровень нагрузки. Увеличиваем нагрузку до величины P_i. Нажимаем снова кнопку **Пуск.** Просматриваем полученные результаты и результаты статистической обработки.

Опрашиваем датчики при всех уровнях нагрузки, заданных преподавателем.

Закрываем все окна программы (кнопкой). Причём сохранять результаты измерений не надо. По умолчанию они сохраняются автоматически по адресу

Локальный диск (C:) >Program Files > SibNIA > SibNIA >

Измерения закончены. Разгружаем установку.

1.9. Преобразование текстового файла с расширением *.txt в файл электронных таблиц с расширением *.xlsx

Открываем EXCEL, щёлкая дважды мышью по его пиктограмме на рабочем столе компьютера. Загружаем файл результатов эксперимента с расширением *.txt:

Файл > Открыть > Локальный диск (C:) >Program Files > SibNIA > SibNIA >

В списке находим файл результатов эксперимента с расширением *.txt по дате и времени в названии.

Чтобы отсечь многочисленные файлы с другими расширениями, выбираем из списка открываемых файлов только файлы с расширением *.txt.

Открывается мастер преобразования текстов. Преобразование выполняется в три этапа:

- на первом шаге – дополнительно активировать опцию «с разделителями»,
- на втором шаге – оставить знак табуляции и добавить разделитель «пробел»,
- на третьем шаге – ничего не менять, нажать «готово».

Преобразованный файл показан на рис. 30.

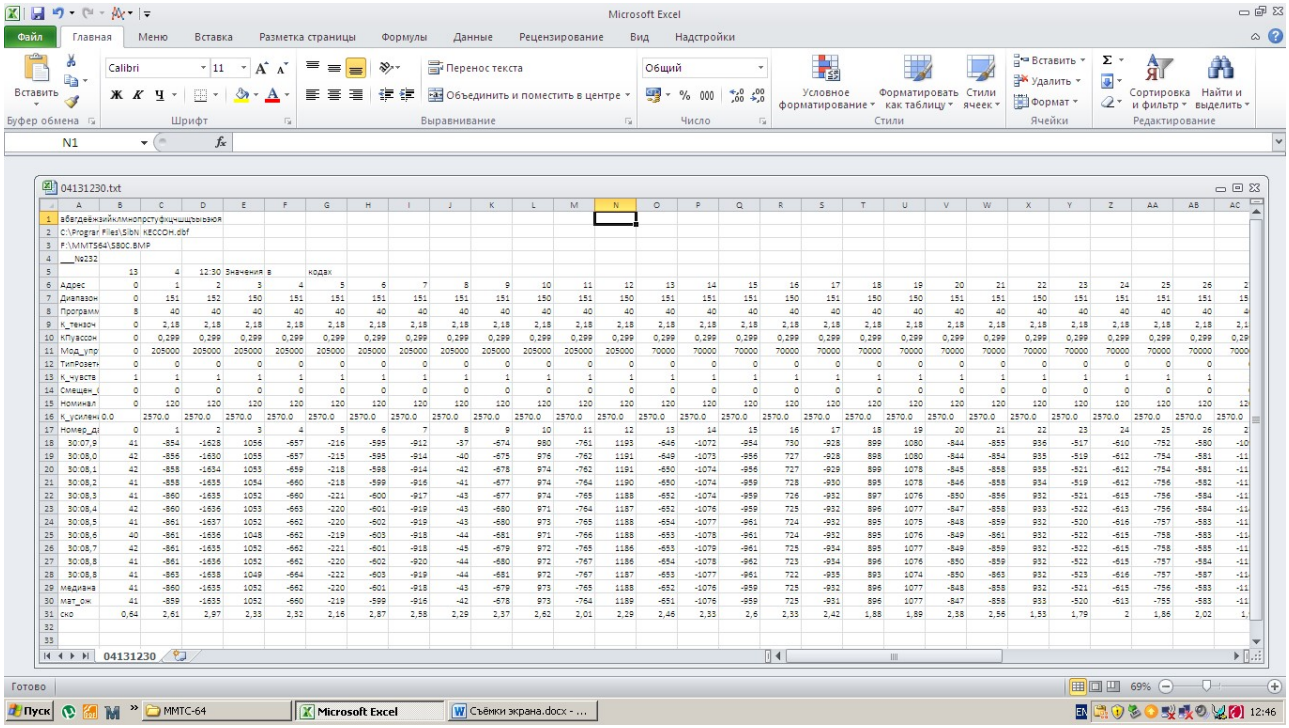


Рис. 30 – Результаты эксперимента в формате EXCEL

Рассмотрим его содержание.

В строке 4 указан номер блока ММТС-64.01.

В строке 5 – число, месяц и время проведения эксперимента.

С шестой строки до семнадцатой приводится информация из файла исходных данных.

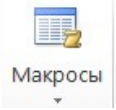
Поскольку мастер преобразования воспринял содержание 16 строки как текстовое (содержимое прижато к левой стороне ячейки), необходимо текст «2570.0» заменить на число 2570 во всей строке.

С восемнадцатой строки по двадцать восьмую приведены результаты одиннадцати повторных измерений при предварительной нагрузке на конструкцию. В первом столбце указано время измерения с точностью до десятой доли секунды.

С 29 по 31-ю строки приведены результаты статистической обработки одиннадцати повторных измерений (медиана, среднее и среднеквадратическое значения).

Результаты измерения на следующем уровне нагрузки располагаются ниже, начиная с 32-й строки. Полученный протокол приводится к форме, удобной для проведения теоретиче-

ских расчётов, обработки экспериментальных данных и сравнения теории с экспериментом. Для его формирования используются макросы, которые написаны для каждой лабораторной работы и запускаются следующим образом:

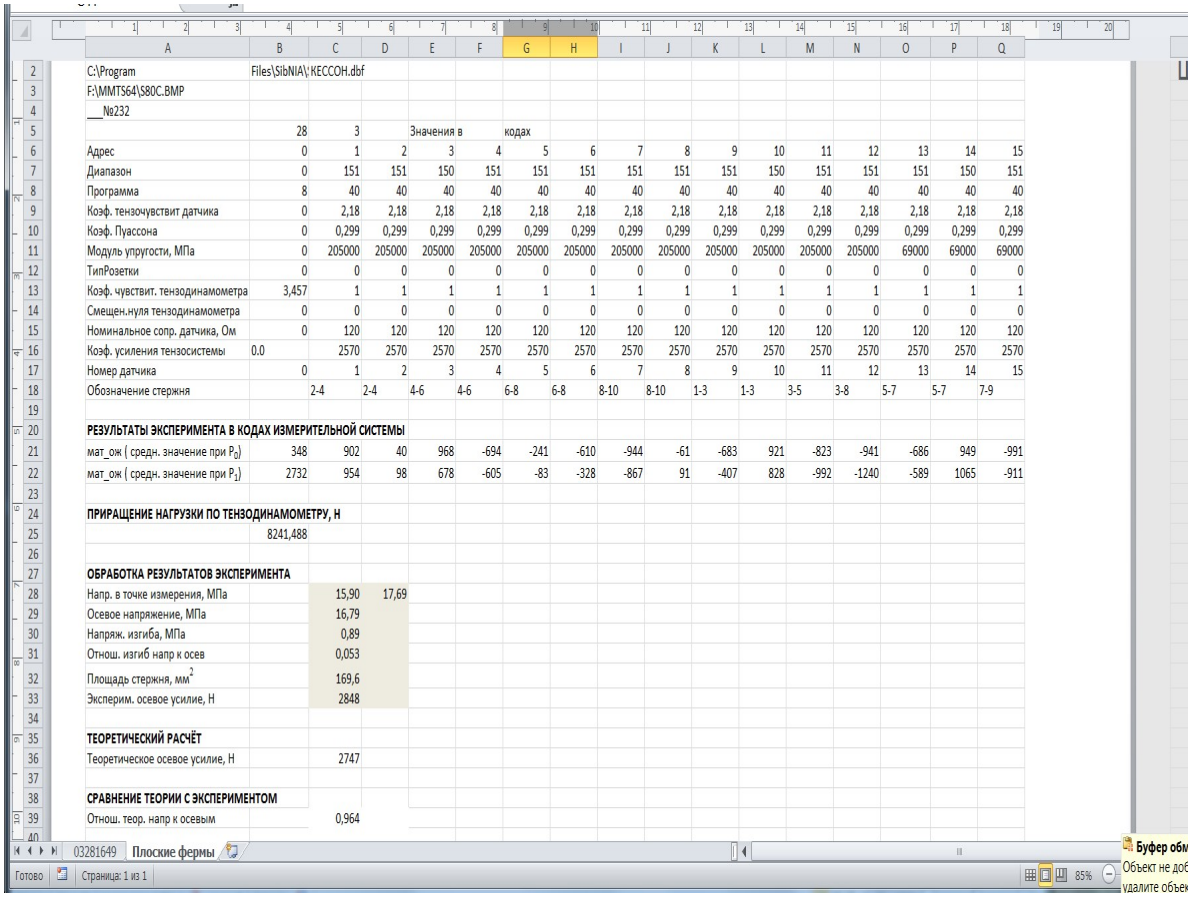
Главная>Вид> 

Макросы> «Название лабораторной работы»>Выполнить.

Пример электронного протокола эксперимента приведён на рис. 31.

Полезно закрепить на экране заголовки строк:

Вид>Закрепить области>Закрепить первый столбец.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2	C:\Program	Files\SibNIA\	KECCOH.dbf														
3	F:\MMTS64\S80C.BMP																
4	__№232																
5		28	3		Значения в		кодах										
6	Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	Диапазон	0	151	151	150	151	151	151	151	151	151	150	151	151	151	150	151
8	Программа	8	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
9	Коэф. тензочувствит датчика	0	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
10	Коэф. Пуассона	0	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299
11	Модуль упругости, МПа	0	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	69000	69000	69000
12	ТипРозетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Коэф. чувствит. тензодинамометра	3,457	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Смещен.нуля тензодинамометра	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Номинальное сопр. датчика, Ом	0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
16	Коэф. усиления тензосистемы	0.0	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570
17	Номер датчика	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
18	Обозначение стержня		2-4	2-4	4-6	4-6	6-8	6-8	8-10	8-10	1-3	1-3	3-5	3-8	5-7	5-7	7-9
19																	
20	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ																
21	мат_ож (средн. значение при P_0)	348	902	40	968	-694	-241	-610	-944	-61	-683	921	-823	-941	-686	949	-991
22	мат_ож (средн. значение при P_1)	2732	954	98	678	-605	-83	-328	-867	91	-407	828	-992	-1240	-589	1065	-911
23																	
24	ПРИРАЩЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ТЕНЗОДИНАМОМЕТРУ, Н																
25		8241,488															
26																	
27	ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА																
28	Напр. в точке измерения, МПа		15,90	17,69													
29	Осевое напряжение, МПа		16,79														
30	Напряж. изгиба, МПа		0,89														
31	Отнош. изгиб напр к осев		0,053														
32	Площадь стержня, мм^2		169,6														
33	Эксперим. осевое усилие, Н		2848														
34																	
35	ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ																
36	Теоретическое осевое усилие, Н		2747														
37																	
38	СРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ																
39	Отнош. теор. напр к осевым		0,964														
40																	

Рис. 31 – Электронный протокол эксперимента

2. ОБРАБОТКА ПОКАЗАНИЙ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

2.1. Обработка показаний датчиков силы

Данные, соответствующие датчику силы, содержатся в нулевом столбце таблицы на рис. 31 (столбец ***B*** в обозначениях *EXCEL)*.

Формула для расчёта усилия следующая:

$$P_i = C(N_i - N_0), \qquad (2)$$

где P_i – значение усилия на *i*-ом уровне нагрузки;

C – коэффициент чувствительности датчика силы;

N_i – показание в кодах тензосистемы на *i*-ом уровне нагрузки;

N_0 – показание в кодах тензосистемы на начальном уровне нагрузки.

2.2. Обработка показаний одиночных тензорезисторов

Деформация, вызванная приращением нагрузки $P_i - P_0$, подсчитывается по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{N_i - N_0}{k(KR + N_0)} \ , \tag{3}$$

а напряжения при одноосном наряжённом состоянии по закону Гука

$$\sigma_i = E\varepsilon_i \ . \tag{4}$$

Здесь N_i *и* N_0 – показания измерительной системы при конечном и начальном уровнях нагрузки соответственно;

k – коэффициент тензочувствительности тензорезистора;

K – коэффициент усиления измерительной системы;

R – номинальное значение сопротивления тензорезистора.

Значения всех величин, входящих в формулу (3), берутся из одного и того же столбца, относящегося к данному тензорезистору в протоколе эксперимента (рис. 31).

2.3. Случай чистого сдвига

Тензорезисторы не чувствительны к деформациям сдвига. Поэтому при чистом сдвиге (рис. 32) уровень касательных деформаций и напряжений определяют косвенным методом. Для этого достаточно одиночным тензорезистором измерить либо главную деформацию ε_1, либо главную деформацию ε_2. При чистом сдвиге $\varepsilon_1 = -\ \varepsilon_2$, $\tau = \sigma_1 = -\sigma_2$. Используя закон Гука, получим

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 - \mu\varepsilon_1) = \frac{E}{1+\mu}\varepsilon_1, \tag{5}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 - \mu\varepsilon_2) = \frac{E}{1+\mu}\varepsilon_2. \tag{6}$$

2.4. Двухэлементная прямоугольная тензорозетка

Для определения главных деформаций или напряжений и их направления используют тензорозетки.

Если направления главных напряжений заранее известны (например, направления меридиональных и окружных напряжений в оболочках вращения), то используются двухэлементные прямоугольные тензорозетки (рис. 33).

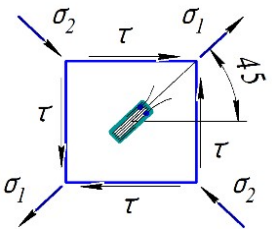


Рис. 32 – Схема чистого сдвига

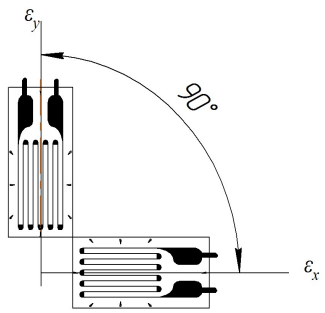


Рис. 33 – Двухэлементная прямоугольная тензорозетка

Тензорезисторы розетки наклеивают в направлении главных напряжений. Расчёт напряжений по показаниям тензорезисторов в продольном (деформация ε_x) и поперечном (деформация ε_y) направлениях производится в соответствии с законом Гука для плоского напряжённого состояния:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \qquad (7)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \ .$$

Здесь E – нормальный модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона.

2.5.Трёхэлементная прямоугольная тензорозетка

Если направления главных напряжений (деформаций) на поверхности конструкции известны хотя бы ориентировочно, то применяется прямоугольная розетка с тремя тензорезисторами (рис. 34). Крайние тензорезисторы розетки ориентируют по предполагаемым главным осям напряжения.

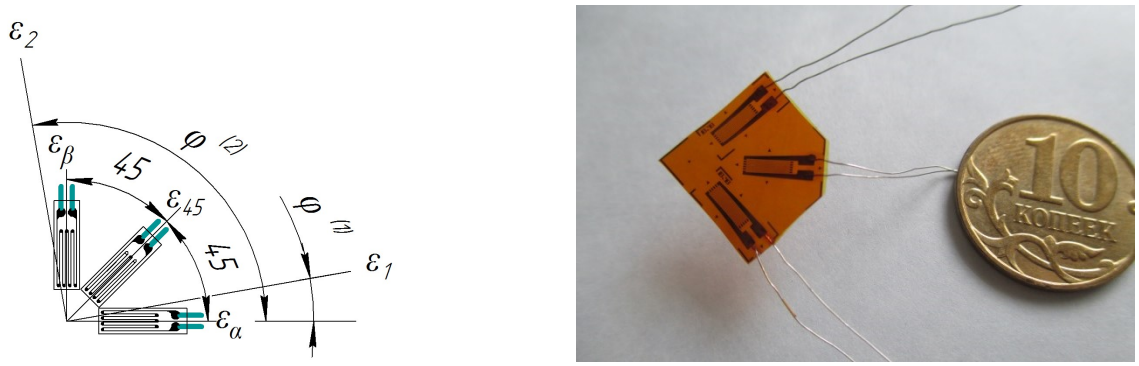


Рис. 34 – Трёхэлементная прямоугольная розетка

Обозначим деформации в направлении осей α , β и 45° через ε_α , ε_β и ε_{45} соответственно.

Тогда можно определить: деформацию сдвига в исследуемой точке

$$\gamma_{\alpha\beta} = 2\varepsilon_{45} - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\beta \ , \qquad (8)$$

направление главных деформаций ε_1 и ε_2

$$tg2\varphi = \frac{\varepsilon_{45}}{\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\beta}. \qquad (9)$$

Уравнению (9) удовлетворяют два угла $\varphi^{(1)}$ и $\varphi^{(2)} = \varphi^{(1)} + \pi/2$. Подсчитаем линейные деформации $\varepsilon^{(1)}$ и $\varepsilon^{(2)}$ по направлениям $\varphi^{(1)}$и $\varphi^{(2)}$

$$\varepsilon^{(1)} = \varepsilon_\alpha \cos^2\varphi^{(1)} + \varepsilon_\beta \sin^2\varphi^{(1)} + \varepsilon_{45}\sin\varphi^{(1)}\cos\varphi^{(1)},$$

$$\varepsilon^{(2)} = \varepsilon_\alpha \cos^2\varphi^{(2)} + \varepsilon_\beta \sin^2\varphi^{(2)} + \varepsilon_{45}\sin\varphi^{(2)}\cos\varphi^{(2)}. \qquad (10)$$

Принято наибольшую деформацию в точке обозначать ε_1 . В соответствии с этим:

если $\varepsilon^{(1)} > \varepsilon^{(2)}$, то $\varepsilon_1 = \varepsilon^{(1)}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon^{(2)}$ $\varphi_1 = \varphi^{(1)}$, $\varphi_2 = \varphi^{(2)}$,

если $\varepsilon^{(1)} < \varepsilon^{(2)}$, то $\varepsilon_1 = \varepsilon^{(2)}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon^{(1)}$ $\varphi_1 = \varphi^{(2)}$, $\varphi_2 = \varphi^{(1)}$. (11)

Переходим к вычислению напряжений:

- нормальные напряжения в направлении осей α и β для изотропного материала:

$$\sigma_\alpha = \frac{\mathrm{E}}{1-\mu^2}(\varepsilon_\alpha + \mu\varepsilon_\beta);$$

$$\sigma_\beta = \frac{\mathrm{E}}{1-\mu^2}(\varepsilon_\beta + \mu\varepsilon_\alpha); \qquad (12)$$

- главные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \tag{13}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)\ ; \tag{14}$$

- максимальное касательное напряжение в точке

$$\tau_{мах} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \tag{15}$$

- эквивалентное напряжение в точке

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_{2.}}. \tag{16}$$

2.6. Дельта-розетка

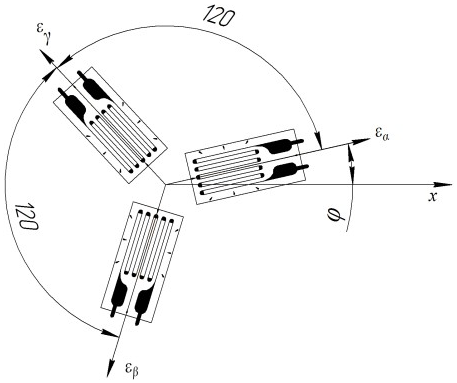


Рис. 35 – Дельта-розетка

Если направления главных напряжений неизвестны даже приблизительно, используют дельта розетку.

В дельта-розетке (рис. 35) датчики расположены под равными углами друг к другу и характеризуются следующими углами: *α=0º, β=60º, γ=120º.*

Обработка показаний дельта-розетки производится по такому же алгоритму, как и обработка показаний трехэлементной прямоугольной розетки [12].

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3} + \sqrt{(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3})^2 + (\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}})^2},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3} - \sqrt{(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3})^2 + (\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}})^2},$$

$$\varphi = arctg\frac{(\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma)/\sqrt{3}}{\varepsilon_\alpha - (\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma)/3}, \tag{17}$$

$$\sigma_1 = E\left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3(1-\mu)} + \frac{1}{1+\mu}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3})^2 + (\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}})^2}\right],$$

$$\sigma_2 = E\left[\frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3(1-\mu)} - \frac{1}{1+\mu}\sqrt{(\varepsilon_\alpha - \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3})^2 + (\frac{\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma}{\sqrt{3}})^2}\right].$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Приводимые ниже операции студенты выполняют под руководством преподавателя или инженера кафедры. Подробное описание операций приведено в разделе 2 настоящего пособия.

1) Запускается программа ИС ММТС 64.01 с рабочего стола компьютера

2) Открывается файл исходных данных лабораторной работы.

   Файл>Открыть>Название лабораторной работы

3) Диагностируется состояние измерительных каналов.

   Эксперимент>Проведение эксперимента>Режим опроса датчиков «Диапазон»>Пуск>Указывается место сохранения файла>Сохранить

4) Если оценочные значения *x*, вычисленные по формуле (1), совпадают или отличаются не более чем на 2 единицы со значениями, определёнными тестированием, то запускаем опцию **Занести результаты в таблицу**. В противном случае канал измерений следует отключить.

5) Устанавливаются опции измерительной системы как это показано на рис. 27 в окошках **«Количество отсчётов», «Регистрация» и «Отображение» и включается режим «Метрология»**

6) Производится нагружение лабораторной установки начальной нагрузкой и выполняется измерение.

   Режим опроса датчиков «Непрерывный 2»>Пуск>Указывается место сохранения файла>Сохранить

7) Надёжность результатов измерения проверяется по величине среднеквадратического отклонения по каждому каналу измерения. Оно не должно превышать трёх единиц.

8) Устанавливается новый уровень нагрузки и снимаются показания датчиков.

   Пуск

9) Опять проверяется надёжность полученных результатов измерения.

10) Выполняется выход из системы и сохраняется её конфигурация.

11) Загружается EXCEL и открывается файл результатов измерения с расширением *.txt.

    EXCEL>Файл>Находится файл с расширением *.txt>Открыть

12) Файл с расширением *.txt преобразуется в файл, пригодный для обработки в EXCEL с использованием мастера преобразования текстов (с. 16, пункт 1.9).

13) Формируется электронный протокол эксперимента. Возможны два варианта.

    Первый вариант. Используется макрос.

    Вид>Макросы>Выбирается из списка макрос выполняемой лабораторной работы>Выполнить

    Второй вариант. К лабораторным работам разработаны бланки эксперимента. Необходимо из протокола эксперимента перебросить в бланк эксперимента исходные данные и показания тензорезисторов при всех уровнях нагрузки. Исходные данные находятся в строках 5…17. Они перебрасываются блоком, в который не надо включать названия строк.

14) Дальнейшая обработка экспериментальных данных и теоретические расчёты проводятся в соответствии с указаниями в инструкции конкретной лабораторной работы.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Упругие постоянные материалов используются в расчётах конструкций на прочность, жёсткость, устойчивость, колебания, усталость. Они характеризуют способность материалов сопротивляться различным внешним нагрузкам. Значения упругих характеристик, равно как и всех известных физических постоянных, не могут быть постулированы или найдены на основе логических и математических рассуждений, а могут быть получены только экспериментальным путём при испытании образцов на растяжение (сжатие), изгиб или кручение.[1]

Различают материалы изотропные и анизотропные. Изотропия означает независимость свойств материала от направления воздействия нагрузки. Изотропные материалы характеризуются тремя упругими постоянными: модулем Юнга E, коэффициентом Пуассона μ и модулем сдвига G. При этом, как показывает теория, только две из них являются линейно независимыми. Анизотропные материалы могут иметь до 18 различных характеристик.

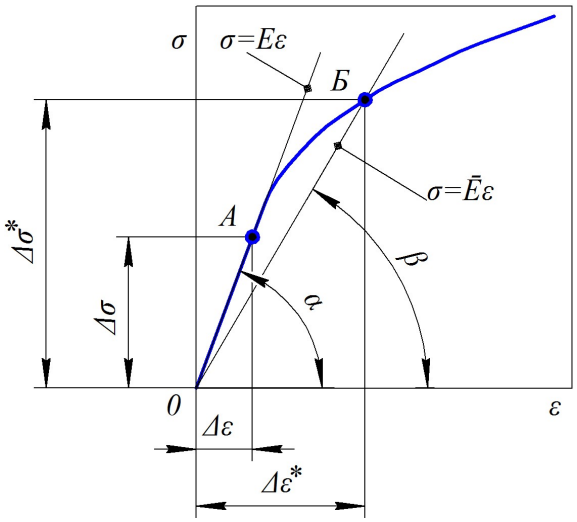


Рис. 36 – Схема определения модуля упругости

Монокристаллы и отдельные зёрна конструкционных материалов анизотропны. Однако благодаря их малым размерам и хаотическому расположению в пространстве материал приобретает статистически обоснованную изотропность и нуждается в экспериментальном определении, как минимум, двух упругих постоянных (например, модуля Юнга и коэффициента Пуассона).

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \qquad (18)$$

Упругие постоянные материалов имеют более стабильные значения по сравнению с механическими характеристиками. Например, для различных марок алюминиевых сплавов временное сопротивление разрыву может отличаться в несколько раз (от 250 до 650 МПа и выше), в то время как среднестатистические значения упругих постоянных для всех марок алюминиевых сплавов изменяются в узких пределах:

$$E = (6{,}9...7{,}2)\cdot 10^4\ МПа, \quad \mu = 0{,}29...0{,}33\ .$$

[1] Формирование закона Гука в его современном виде сделали французский математик Коши, который в 1822 г. ввёл в научную литературу понятия «напряжение» и «деформация», и французский учёный Навье, который в 1826 г. дал определение модуля упругости как отношение нагрузки, приходящейся на единицу площади поперечного сечения, к произведённому ею относительному удлинению.

Модуль упругости определяется на начальном участке диаграммы деформирования материала (рис. 36) и равен тангенсу угла наклона кривой деформирования к оси деформаций

$$E = tg\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}. \qquad (19)$$

Определяя модуль упругости нельзя к образцу прикладывать большие нагрузки, так как они могут вызвать появление пластических деформаций (точка Б на рис. 36). В этом случае из эксперимента будет найден секущий модуль $\overline{E} = tg\beta = \frac{\Delta\sigma^*}{\Delta\varepsilon^*}$, который меньше нормального модуля упругости.

4.1.Описание экспериментальной установки

Фотография лабораторной установки приведена на рис. 37. Составной образец, состоящий из последовательно соединённых семи образцов из разных авиационных материалов, подвешивается к раме на двух тросиках.

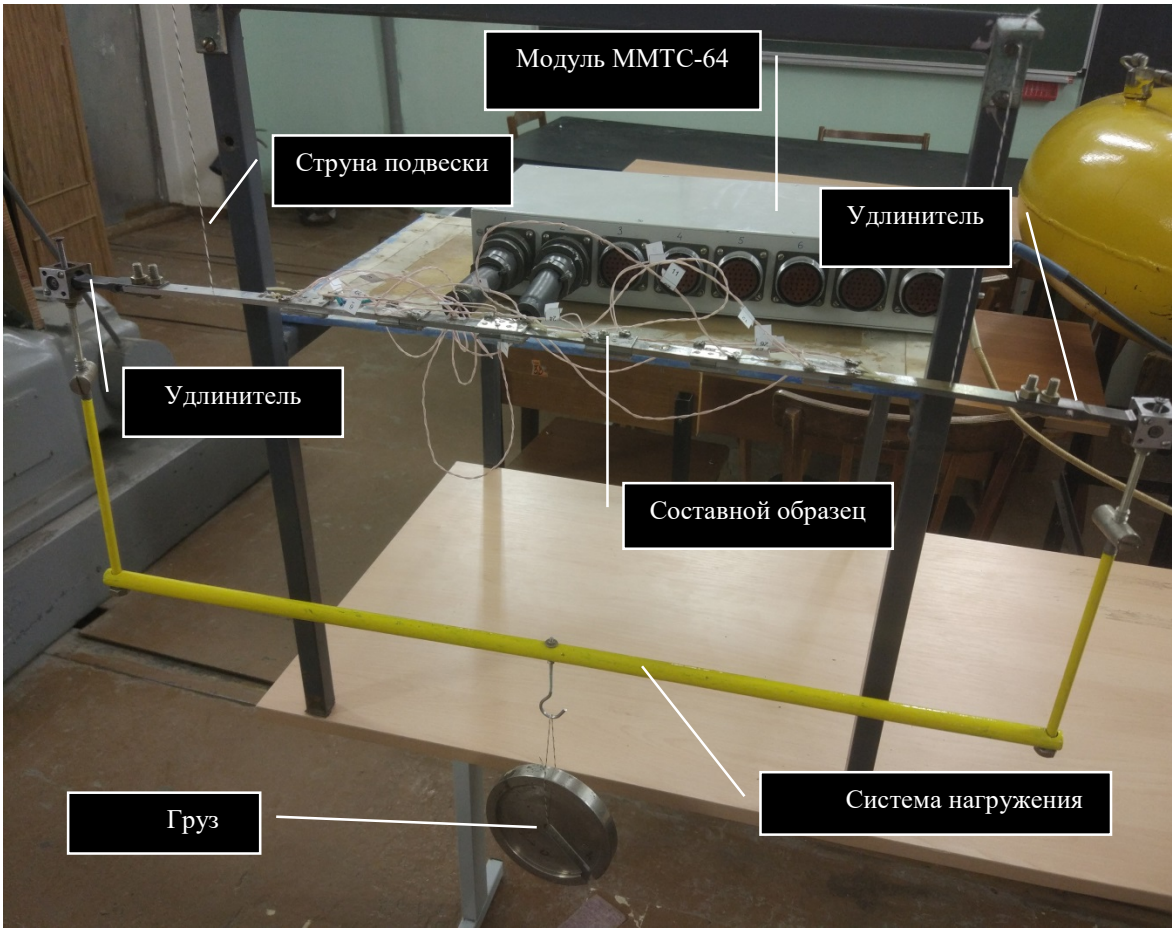


Рис. 37 – Фотография лабораторной установки

Слева и справа к составному образцу присоединены удлинители, к которым через систему нагружения прикладывается нагрузка, вызывающая чистый изгиб составного образца.

4.2. Теоретические расчёты

Нагрузка $0,5P$ на плече удлинителя $l = 114\,мм$ создаёт в составном образце (рис. 38) постоянный изгибающий момент $M = 0,5P \cdot l$.

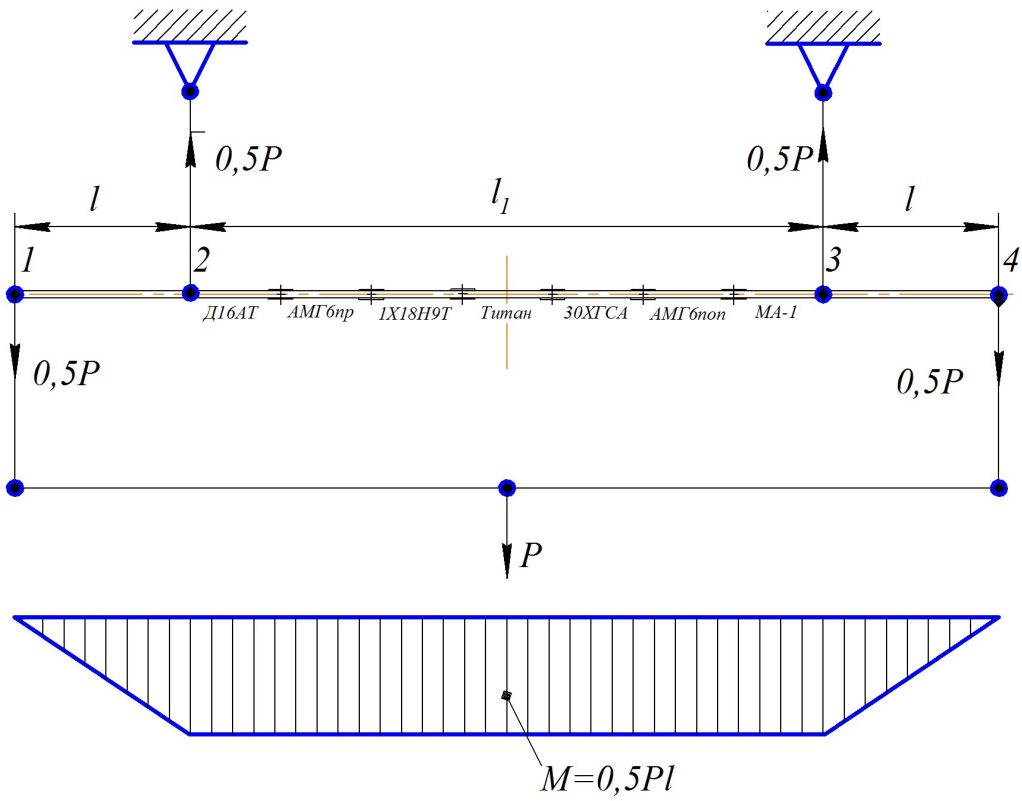


Рис. 38 – Принципиальная схема установки

Шарнирная система нагружения и подвески на струнах обеспечивают симметрию нагружения составного образца и свободу продольного смещения точек 1, 2, 3 и 4, так как при изгибе образца указанные точки сближаются и, если не обеспечить свободу их осевого смещения, то в образце возникнет осевая сила, что недопустимо.

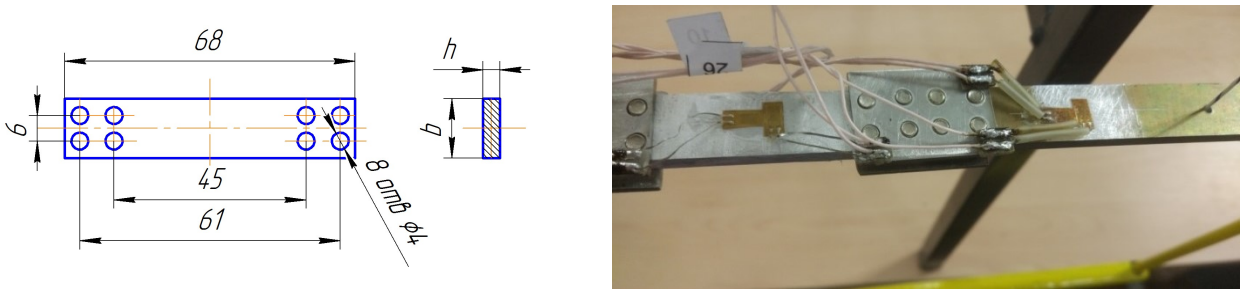


Рис. 39 – Чертёж отдельного образца и фрагмент составного образца с наклеенными тензорезисторами

На поверхности образцов (рис. 39) возникает напряжение изгиба и деформация:

$$\sigma = \frac{M}{W} = 3\frac{Pl}{bh^2}, \tag{20}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = 3\frac{Pl}{bh^2 E}. \tag{21}$$

Из последнего выражения получаем формулу для расчёта экспериментального модуля упругости

$$E = 3\frac{Pl}{bh^2 \varepsilon}. \tag{22}$$

Коэффициент Пуассона находится как отношение

$$\mu = \frac{-\varepsilon_{поп}}{\varepsilon}. \tag{23}$$

4.3. Экспериментальное исследование

Все образцы вырезаны из листовых материалов, кроме образца из стали 30ХГСА. Геометрические размеры поперечных сечений образцов приведены в табл. 3.

На каждый образец близко к их середине наклеены по два тензорезистора (см. рис. 39). Один – для измерения продольной деформации ε, другой – для измерения поперечной деформации ε_{non}.

Таблица 3 – Геометрия поперечных сечений образцов и номера тензорезисторов, наклеенных на них

Материал	Ширина *b*, мм	Толщина *h*, мм	Номер тензорезистора		Примечание
			В продольном направлении	В поперечном направлении	
Алюминиевый сплав Д16АТ	14,04	3,98	1	2	Из листа в состоянии поставки
Алюминиевый сплав АМГ6	13,89	4,03	3	4	Образец вырезан в направлении прокатки
Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т	13,93	4,02	5	6	Из листа в состоянии поставки
Титановый сплав	14,18	4,03	7	8	Из листа в состоянии поставки
Сталь 30ХГСА	14,21	3,96	9	10	Закалённое состояние, шлифовка
Алюминиевый сплав АМГ6	14,1	4,28	11	12	Образец вырезан в поперечном направлении относительно прокатки
Магниевый сплав МА2	14,02	3,88	13	14	Из листа в состоянии поставки

На стальные образцы наклеены фольговые тензорезисторы фирмы ZEMIC типа BE120-4CA(11) с коэффициентом тензочувствительности $\kappa = 2{,}18$, на остальные образцы – отечественные тензорезисторы 2ФКПА-3-100 ГА с коэффициентом тензочувствительности $\kappa = 2{,}20$.

Колодочки для припайки выводных проводников отнесены подальше от тензорезисторов, чтобы вносимая ими дополнительная жёсткость сечения не сказывалась на результатах эксперимента. В качестве регистрирующего устройства используется 64-канальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС 64.01. Порядок выполнения измерений описан в разделе /3/. В данной лабораторной работе необходимо установить максимальное количество повторных измерений (*n=32*), допускаемое измерительной системой, с целью увеличения статистической надёжности получаемых результатов. Электронный бланк эксперимента представлен на рис. 40.

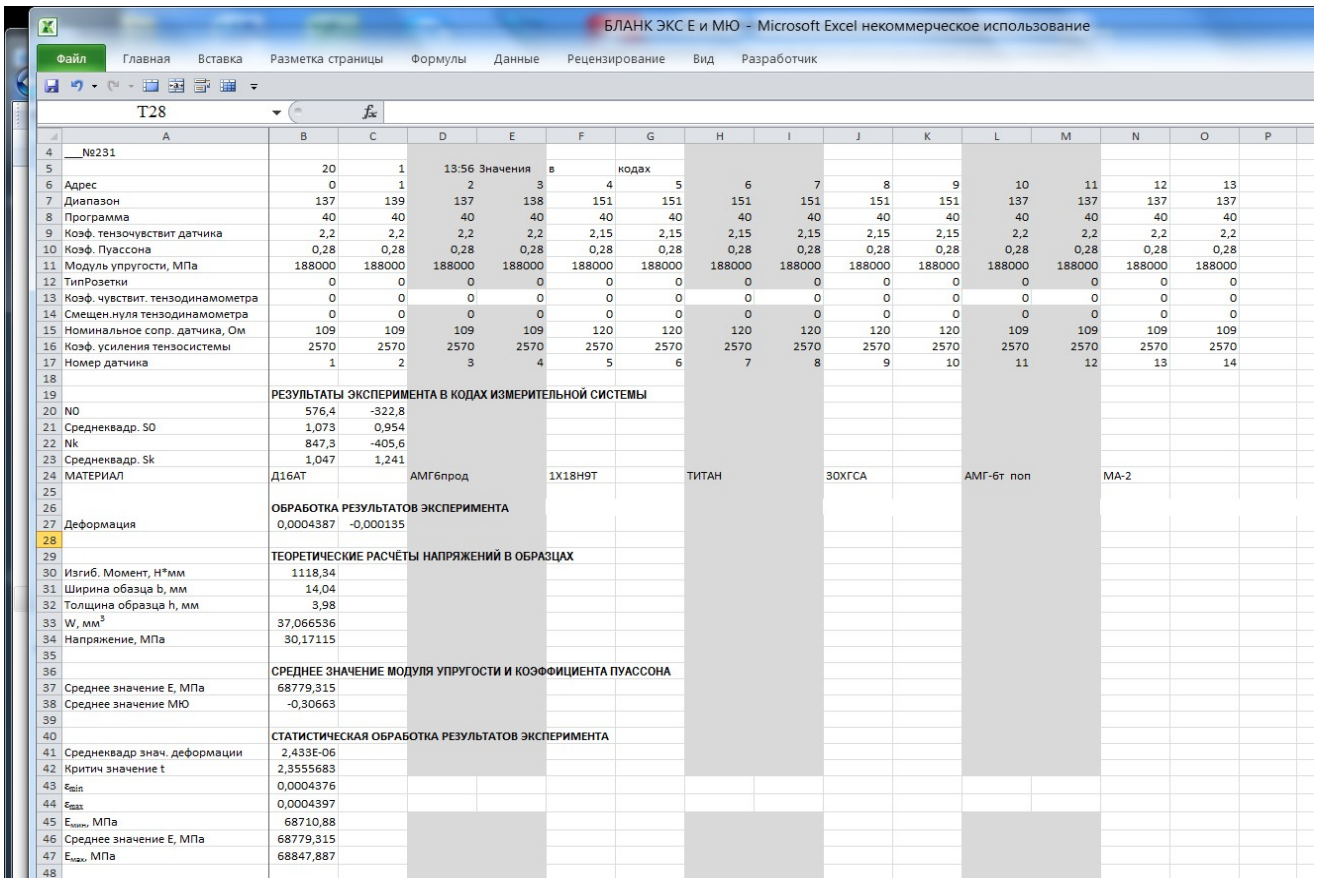
4.4. Статистическая оценка результатов измерения

Измерительная система ММТС-64.01 в автоматическом режиме по результатам повторных измерений при постоянной нагрузке подсчитывает среднее значение показаний тензорезисторов $\overline{N}$ и среднеквадратическое S по формулам

$$\overline{N} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} N_i\,, \tag{24}$$

$$S = \frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n} (N_i - \overline{N})^2\,. \tag{25}$$

Здесь n = 32 – заданное преподавателем максимальное число повторных измерений, допускаемое измерительной системой.



БЛАНК ЭКС Е и МЮ - Microsoft Excel некоммерческое использование

Файл Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Разработчик

T28

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
4	___№231															
5		20	1	13:56	Значения	в	кодах									
6	Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
7	Диапазон	137	139	137	138	151	151	151	151	151	151	137	137	137	137	
8	Программа	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
9	Коэф. тензочувствит датчика	2,2	2,2	2,2	2,2	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,2	2,2	2,2	2,2	
10	Коэф. Пуассона	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	
11	Модуль упругости, МПа	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	188000	
12	ТипРозетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	Коэф. чувствит. тензодинамометра	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	Смещен.нуля тензодинамометра	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	Номинальное сопр. датчика, Ом	109	109	109	109	120	120	120	120	120	120	109	109	109	109	
16	Коэф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	
17	Номер датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
18																
19		РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ														
20	N0	576,4	-322,8													
21	Среднеквадр. S0	1,073	0,954													
22	Nk	847,3	-405,6													
23	Среднеквадр. Sk	1,047	1,241													
24	МАТЕРИАЛ	Д16АТ		АМГ6прод		1Х18Н9Т		ТИТАН		30ХГСА		АМГ-6т пол		МА-2		
25																
26		ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА														
27	Деформация	0,0004387	-0,000135													
28																
29		ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ														
30	Изгиб. Момент, Н*мм	1118,34														
31	Ширина обазца b, мм	14,04														
32	Толщина образца h, мм	3,98														
33	W, мм^3	37,066536														
34	Напряжение, МПа	30,17115														
35																
36		СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА														
37	Среднее значение E, МПа	68779,315														
38	Среднее значение МЮ	-0,30663														
39																
40		СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА														
41	Среднеквадр знач. деформации	2,433E-06														
42	Критич значение t	2,3555683														
43	ε_{min}	0,0004376														
44	ε_{max}	0,0004397														
45	$E_{мин}$, МПа	68710,88														
46	Среднее значение E, МПа	68779,315														
47	$E_{мах}$, МПа	68847,887														
48																

Рис. 40 – Электронный бланк эксперимента

Несмотря на операцию осреднения величины $\bar{N}$ и S остаются случайными величинами, только имеют меньший разброс, чем исходные величины N_i.

Преобразуем формулу (3) вычисления средней деформации к виду

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{N}_k}{\kappa(KR_0 + \bar{N}_0)} - \frac{\bar{N}_0}{\kappa(KR_0 + \bar{N}_0)} = C(\bar{N}_k - \bar{N}_0), \tag{26}$$

где

$$C = \frac{1}{\kappa(KR_0 + \bar{N}_0)}. \tag{27}$$

Из этой формулы видно, что случайная величина $\bar{\varepsilon}$ есть результат вычитания двух случайных экспериментальных величин $\bar{N}_k$ и $\bar{N}_0$. Такой вывод можно сделать, если пренебречь случайной величиной $\bar{N}_0$ в знаменателе выражения (27) ввиду её малости. Действительно, в экспериментах обычно $\bar{N}_0 \le 1000$, а произведение $KR_0 = 2570 \cdot 120 = 308400$.

Согласно правилам математической статистики [1, 2] дисперсия разности случайных величин равна сумме дисперсий этих величин

$$D_\varepsilon = C(D_{N_k} + D_{N_0}). \tag{28}$$

Переходя к среднеквадратическим значениям, получим

$$S_\varepsilon = C\sqrt{(S_{N_0})^2 + (S_{N_k})^2}. \tag{29}$$

Экспериментальные значения S_{N_0} *и* S_{N_k} находятся в строках (21) и (23) электронного протокола эксперимента (рис. 40).

Перейдём к центрированной нормированной случайной величине

$$t = \frac{\varepsilon - a}{S_\varepsilon}. \tag{30}$$

Здесь a – истинное значение измеряемой деформации (её математическое ожидание). Это постоянная, но неизвестная величина.

Теоретически доказано, что случайная величина t подчиняется t – распределению Стьюдента, которое имеет симметричный вид и его форма зависит от числа степеней свободы ν (рис. 41). Число степеней свободы равно числу независимых измерений за вычетом числа используемых связей. В нашем случае число независимых измерений $n = 32$. Уравнение (24) накладывает на исходный экспериментальный материал одну связь[2]. Следовательно $\nu = n - 1 = 31$.

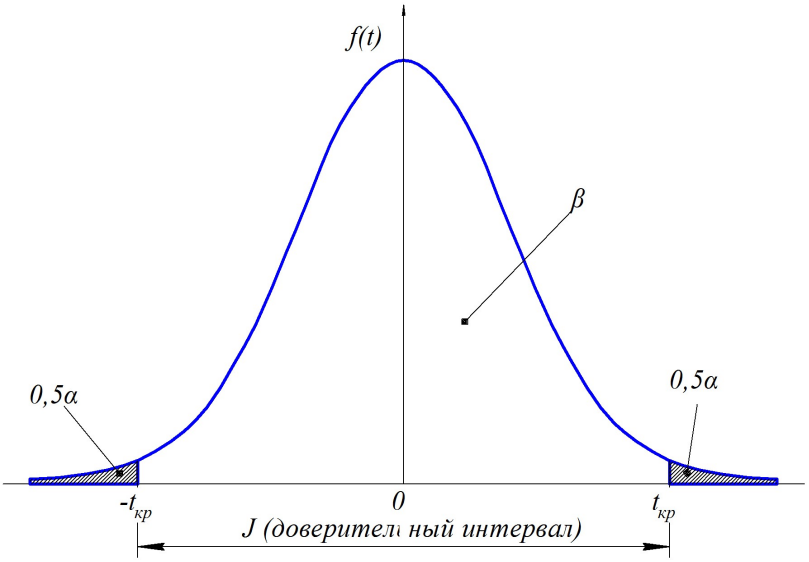


Рис. 41 – Кривая плотности t-распределения Стьюдента

Согласно математической статистике вероятность точечной оценки (одним числом) результата эксперимента равна нулю. На практике вместо точечной оценки производят интервальную оценку результата, при этом задаются так называемой доверительной вероятностью β . Чаще всего её принимают равной 0,90; 0,95 или 0,99. Если, например, $\beta = 0,95$, то это означает, что наша интервальная оценка в 95 случаях из 100 подтвердится, а в пяти случаях мы ошибёмся. Из рис. 41 видно, что доверительной вероятности β соответствует интервал от $-t_{кр}$ до $+t_{кр}$, который называют доверительным интервалом.

Критическое значение $t_{кр}$ определяется либо по таблицам, либо с использованием EXCEL:

Формулы > Другие функции> Статистические > Стьюдент.обр.2х.

В появившемся окне задаётся вероятность $\alpha = \dfrac{1-\beta}{2}$, которая называется значимостью, и число степеней свободы ν . В случае $\beta = 0,95$ получаем $t(\alpha,\nu) = t(0,025;\ 31)$.

Используя выражения (31, 32, 33 и 34) находится размер доверительного интервала сначала для деформации, а затем – для модуля упругости.

$$\bar{\varepsilon} - t_{кр}(\alpha,\nu)\frac{S_\varepsilon}{\sqrt{n}} \le a \le \bar{\varepsilon} + t_{кр}(\alpha,\nu)\frac{S_\varepsilon}{\sqrt{n}}\ ., \qquad (31)$$

Тогда левая и правая границы доверительного интервала для деформации будут:

$$\bar{\varepsilon}_{\min} = \bar{\varepsilon} - t_{кр}(\alpha,\nu)\frac{S_\varepsilon}{\sqrt{n}}\ , \qquad (32)$$

---

[2] Центрированные случайные величины связаны между собой соотношением $\sum_{i=1}^{n}(N_i - \bar{N}) = 0$, уменьшающим число независимых N_i на единицу.

$$\bar{\varepsilon}_{max} = \bar{\varepsilon} + t_{кр}(\alpha, \nu)\frac{S_{\varepsilon}}{\sqrt{n}}. \qquad (33)$$

По закону Гука получим границы доверительного интервала для значения модуля упругости

$$E_{\min} = \frac{\sigma}{\bar{\varepsilon}_{\max}}, \qquad E_{\max} = \frac{\sigma}{\bar{\varepsilon}_{\min}}. \qquad (34)$$

4.5. Порядок выполнения теоретических расчётов и обработки результатов измерений

1. По формуле (3) в строке 27 электронного бланка эксперимента подсчитываются деформации.

2. Вычисляется изгибающий момент в образцах (строка 30).

3. Из таблицы (3) заносятся в протокол геометрические размеры поперечных сечений образцов и подсчитываются моменты сопротивления изгибу.

4. Вычисляется нормальное напряжение в образцах по формуле (20).

5. Определяется среднее значение модуля упругости по формуле (22).

6. Вычисляется значение коэффициента Пуассона для всех материалов (формула (23)).

7. Среднеквадратические значения измерения N_0 и N_k в кодах измерительной системы расположены в строках 21 и 23 протокола. Поскольку деформация, согласно формуле (3), подсчитывается как разность двух показаний, её среднеквадратическое значение вычисляется по формуле (29) и помещается в строку 41.

8. Определяется критическое значение $t_{кр}$ в зависимости от выбранной значимости и числа степеней свободы.

9. По формулам (32 и 33) вычисляются верхняя и нижняя границы доверительного интервала для измеренной деформации (в строках 43 и 44).

10. В строке 45 вычисляется левая граница доверительного интервала модуля упругости, а в строке 47 – правая (по формулам (34)).

11. Для удобства сравнения в строку 46 помещается *среднее* значение модуля упругости из строки 37.

12. Анализируются результаты и делаются выводы.

4.6. Контрольные вопросы

1. Как влияет направление прокатки на модуль упругости и коэффициент Пуассона в сплаве АМГ-6?
2. Как влияет количество повторных измерений на точность определения модуля упругости?
3. Какова чувствительность микропроцессорной измерительной системы к деформациям?
4. В каких типах расчётов используется значение модуля упругости?
5. Если нагрузка вызвала в образце появление пластических деформаций и деформаций ползучести, то какой модуль упругости мы определим в эксперименте?
6. Как определяется дисперсия деформации по результатам эксперимента?
7. Почему поликристаллические конструкционные материалы можно считать изотропными?
8. Как изменяется доверительный интервал, если увеличивать доверительную вероятность?
9. Согласуются ли полученные значения модуля и коэффициента Пуассона с известными из литературы данными?
10. Как изменяется дисперсия деформации, если увеличивать количество повторных измерений?
11. Чему равна дисперсия разности случайных величин?
12. Что такое четырёхточечный изгиб балки?
13. Какова связь между упругими постоянными изотропных материалов?

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ФЕРМА К ПЛОСКИМ СВАРНЫМ СТЕРЖНЕВЫМ СИСТЕМАМ

5.1. Описание объекта исследования

5.1.1. Экспериментальная установка[3] состоит из двух раздельных плоских сварных стержневых систем (рис. 42), которые изготовлены из стальных труб различного диаметра (рис. 43):

- $D \times d$=21×3 *мм* (стержневая система № 1),
- $D \times d$=42×3 *мм* (стержневая система № 2).

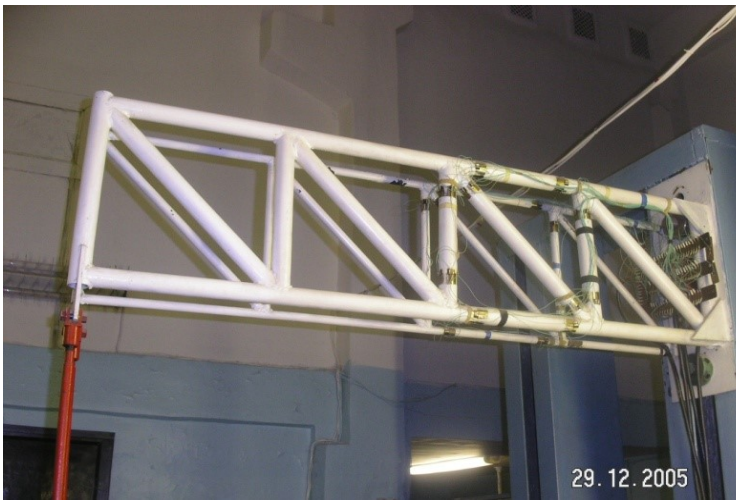


Рис. 42 – Общий вид плоских сварных систем

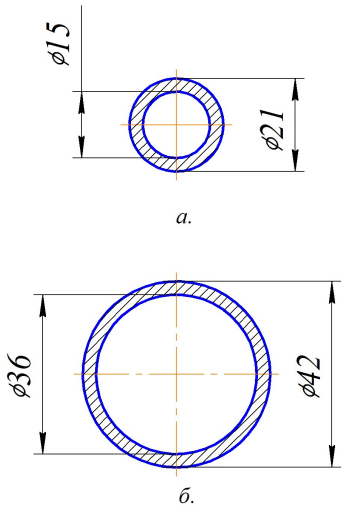


Рис. 43 – Поперечные сечения стержней

Площади[4] поперечных сечений труб F и моменты сопротивления изгибу W соответственно равны:

F_1=169,6 *мм*^{2}, W_1=654,4 *мм*^{3};

F_2= 367,6 *мм*^{2}, W_2=3328 *мм*^{3}.

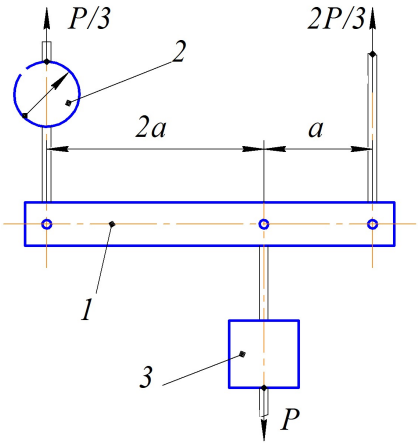


Рис. 44 – Схема нагружения:
1 – Поперечная балка. 2 – Пружинный динамометр. 3 – Тензометрический датчик силы

[3] Экспериментальная установка разработана доц. Логуновым В.Я.

[4] Согласно ГОСТ 8732-78 предельное отклонение размера труб по толщине составляет ± 12,5%.

Нормальный модуль упругости материала труб $E = 2{,}05 \cdot 10^5$ *МПа*.

Стержневые системы прикреплены к опоре консольно и одновременно нагружаются гидравлическим устройством через поперечную балку 1 (см. рис. 44). В результате стержневая система №2 нагружается силой в два раза большей, чем стержневая система №1. Общая нагрузка *P* измеряется тензометрическим датчиком силы.

При проведении эксперимента уровень нагрузки задаётся и контролируется визуально по показаниям пружинного стрелочного динамометра ДПУ 0,5-2 (рис. 44), измеряющего только треть силы *P*. Предельная минимальная нагрузка и предельная максимальная нагрузки на шкале динамометра отмечены красными полосками.

5.2. Теоретические положения

Для теоретического расчёта усилий и напряжений в стержнях исследуемых систем можно использовать либо расчётную схему **рама** (рис. 45), либо расчётную схему **ферма** (рис. 46) [4, 5, 9].

5.3. Расчётная схема рама

Полагая сварные узлы абсолютно жёсткими, получим расчётную схему в виде плоской многократно статически неопределимой **рамы**, которая близка к реальной конструкции, но весьма сложна для расчёта.

Число лишних связей *Л* системы (рис. 45) можно определить по формуле

$$Л = 3К - Ш + C_{оп} - 3 .$$

Здесь *К* – число замкнутых контуров, *Ш* – число простых шарниров, $C_{оп}$ – число опорных связей.

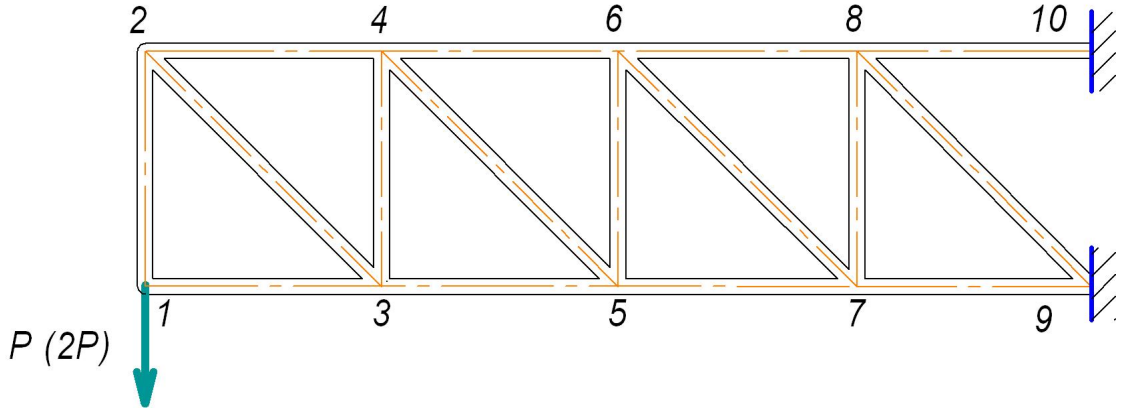


Рис. 45 – Расчётная схема **рама**

В нашем случае $К = 7$, $Ш = 0$, $C_{оп} = 6$ и, следовательно, рама является 24 раза статически неопределимой системой.

Если раскрытие статической неопределимости производить методом сил, то при этом необходимо решать систему из 24 линейных алгебраических уравнений.

5.4. Расчётная схема «ферма»

Теперь рассмотрим другую более простую расчётную схему. Воспользуемся следующими обстоятельствами:

- стержни исследуемых конструкций прямолинейны;
- их оси пересекаются в одной точке;
- внешняя нагрузка прикладывается в узлах;
- длина каждого стержня намного превышает его диаметр.

Такие стержни работают главным образом на растяжение–сжатие и их изгибом можно пренебречь. Тогда, считая соединения стержней в узлах шарнирными, получим простую расчётную схему (рис. 46), которая называется **фермой.** Осевые усилия в стержнях фермы N легко определяются методом вырезания узлов [9].

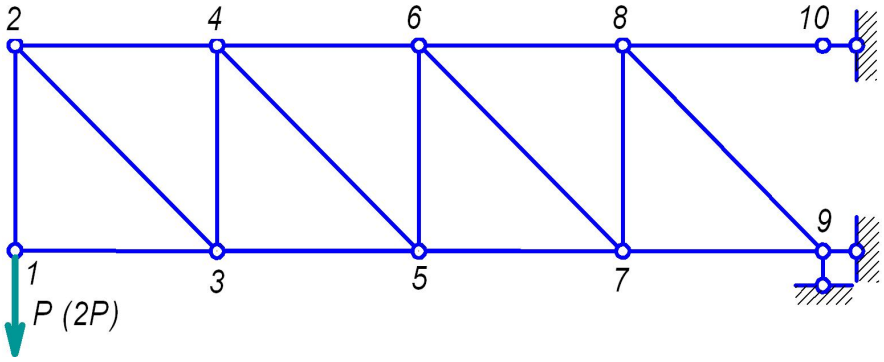


Рис. 46 – Расчётная схема **ферма**

5.5. Экспериментальное определение напряжений и усилий в стержнях

Цель экспериментального исследования: подтвердить применимость расчётной схемы ферма к расчёту стержневых систем.

Основное предположение расчётной схемы ферма заключается в том, что длинные стержни работают, в основном, на растяжение или сжатие, а изгибные (вторичные) напряжения в них отсутствуют. На самом деле изгибные напряжения в стержнях присутствуют и чем они меньше, тем больше оснований применять расчётную схему ферма.

Обозначим осевые напряжения в стержне от осевой силы через σ_N , а от изгибающего момента – σ_M .

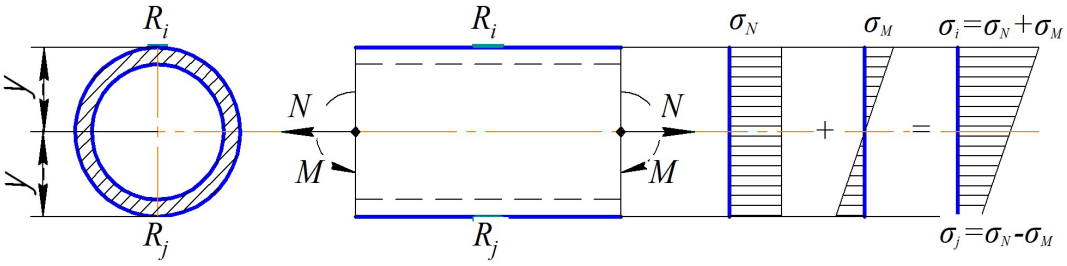


Рис. 47 – Напряжения в стержне от растяжения и изгиба

Для раздельного определения осевых и изгибных напряжений в сечении стержня диаметрально противоположно наклеиваются два тензорезистора (рис. 47). В диаметрально противоположных точках поперечного сечения напряжения будут

$$\sigma_i = \sigma_N + \sigma_M, \tag{35}$$

$$\sigma_j = \sigma_N - \sigma_M. \tag{36}$$

Сложение выражений (35) и (36) даёт осевое напряжение в стержне

$$\sigma_N = (\sigma_i + \sigma_j)/2, \tag{37}$$

а вычитание – напряжение от изгиба стержня

$$\sigma_M = (\sigma_i - \sigma_j)/2. \tag{38}$$

Отметим, что выражения (37) и (38) справедливы, если тензорезисторы наклеены на равном расстоянии от оси изгиба.

Для измерения деформаций стержней в лабораторной установке используются фольговые тензорезисторы марки BF120-5AA(11) N6-X, имеющие измерительную базу 5 мм, номинальное сопротивление $R_0 = 120$ *Ом* и коэффициент тензочувствительности K=2,18.

Из рис. 48 видно, что нумерация узлов (цифры в кружках) для обеих стержневых систем принята одинаковой, а нумерация тензорезисторов – сквозной. Все тензорезисторы располагаются в плоскости стержневых систем.

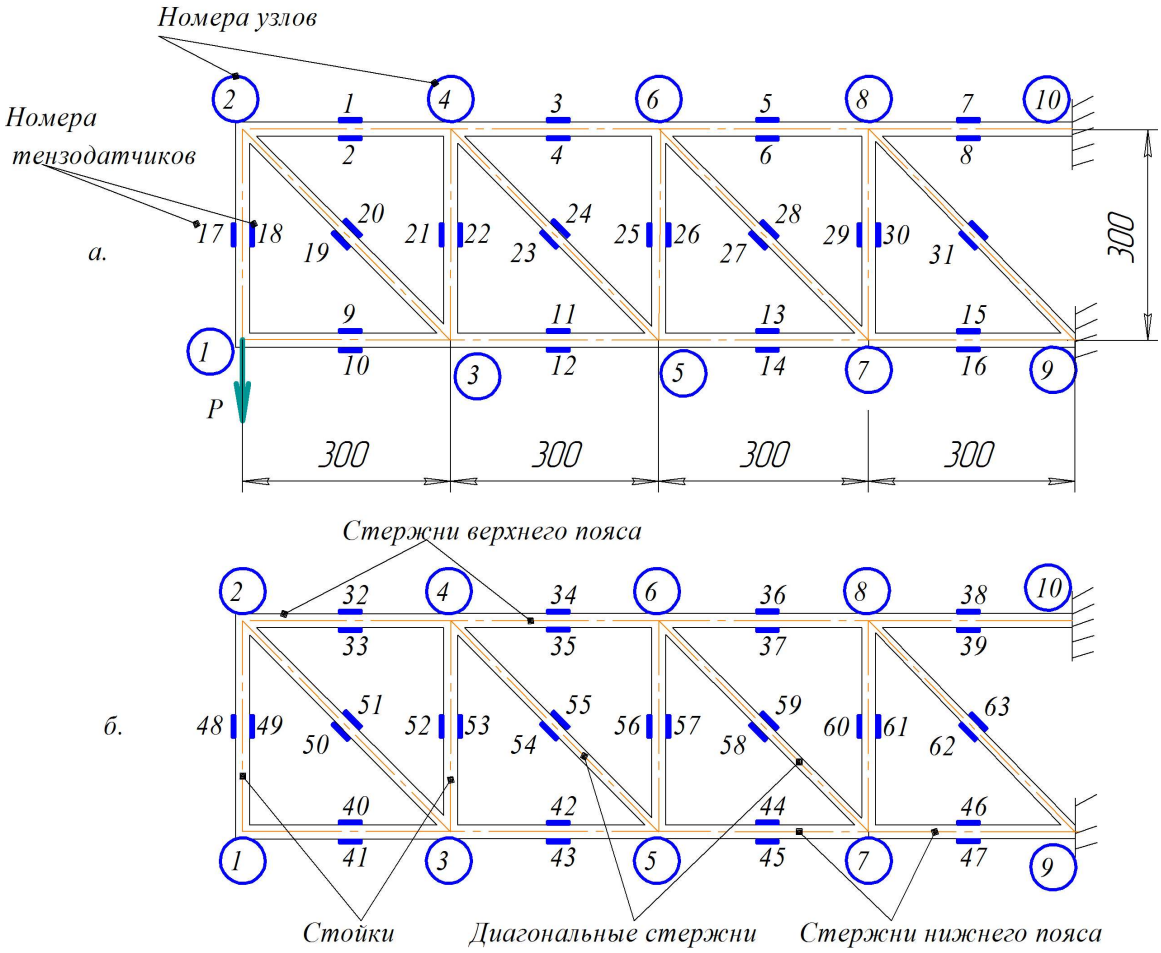


Рис. 48 – Расположение тензорезисторов на стержнях
а – стержневая система № 1, б – стержневая система № 2

5.6. Порядок выполнения теоретических расчётов и обработки результатов измерений

В качестве измерительного устройства используется 64-канальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС 64.01. Порядок выполнения измерений описан в разделе /3/. Электронный бланк эксперимента приведён на рис. 49.

- Для удобства выполнения расчётов в EXCEL рекомендуется закрепить первый столбец электронного протокола эксперимента:

Вид>Закрепить области>Закрепить первый столбец

- В ячейке B25 по показаниям тензодинамометра по формуле (2) подсчитывается приращение нагрузки, действующей на обе фермы. Эта нагрузка перераспределяется между фермами по схеме рис. 44.

$$P_1 = \frac{1}{3}\Delta P, \quad P_2 = \frac{2}{3}\Delta P.$$

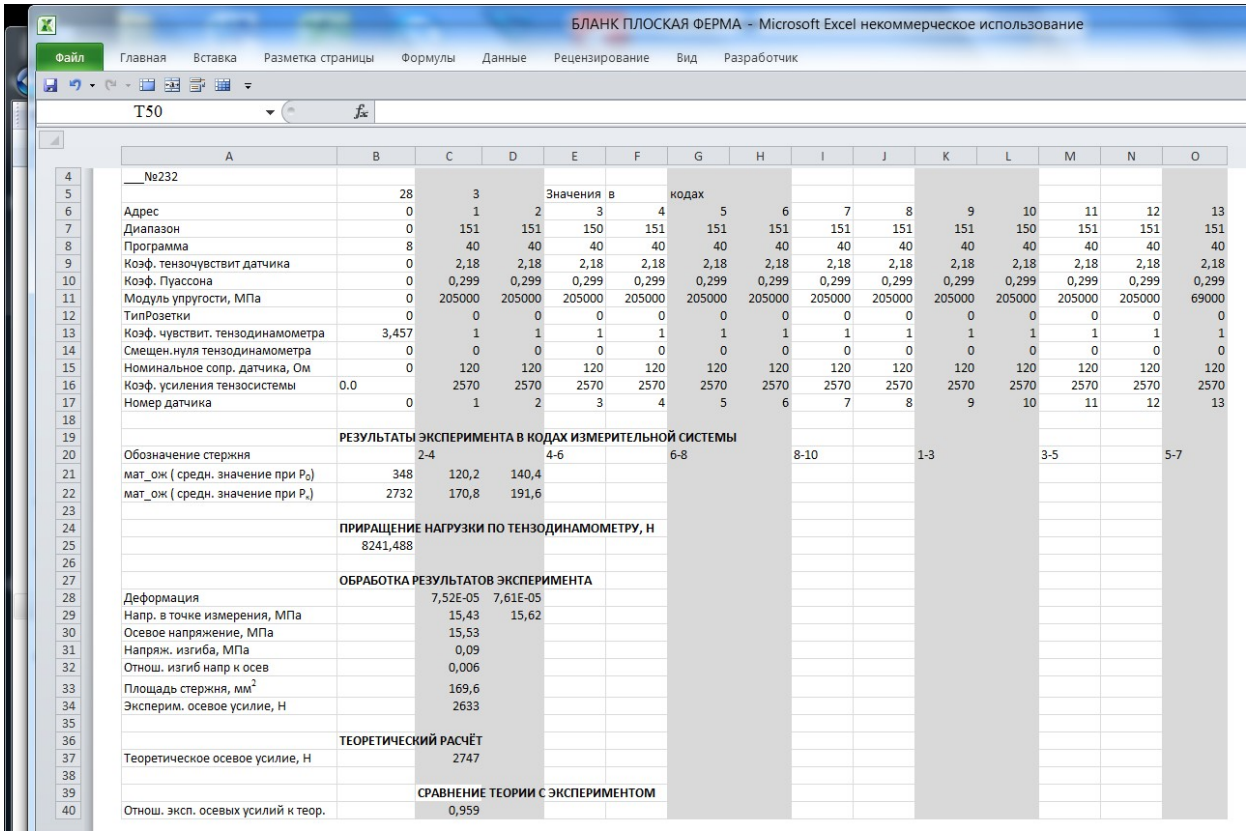
- По формуле (3) в строке 28 подсчитываются деформации.
- По закону Гука (формула (4)) для одноосного напряжённого состояния определяются напряжения в местах наклейки тензорезисторов (строка 29).

Примечание: дальнейшие расчёты рекомендуется выполнить сначала для одного стержня, а потом блоком распространить расчёт на остальные стержни.

•В строке 30 вычисляются осевые напряжения в соответствии с формулой (37).
•По формуле (38) вычисляются изгибные напряжения (строка 31).
•Находится отношение изгибных напряжений к осевым (строка 32).
•В строку 33 заносятся площади поперечного сечения стержней F_i.
•Вычисляются экспериментальные осевые усилия в стержнях (строка 34)

$$N_i = \sigma_N \cdot F_i .$$

•Методом вырезания узлов определяются усилия во всех стержнях фермы и результаты помещаются в строку 37.
•Находится отношение усилий, полученных в результате эксперимента, к усилиям, рассчитанным методом вырезания узлов (строка 39).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
4	___№232														
5		28	3		Значения	в	кодах								
6	Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7	Диапазон	0	151	151	150	151	151	151	151	151	151	150	151	151	151
8	Программа	8	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
9	Коэф. тензочувствит датчика	0	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
10	Коэф. Пуассона	0	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299
11	Модуль упругости, МПа	0	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	69000
12	ТипРозетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Коэф. чувствит. тензодинамометра	3,457	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Смещен.нуля тензодинамометра	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Номинальное сопр. датчика, Ом	0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
16	Коэф. усиления тензосистемы	0.0	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570
17	Номер датчика	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
18															
19		РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													
20	Обозначение стержня		2-4		4-6		6-8		8-10		1-3		3-5		5-7
21	мат_ож (средн. значение при P_0)	348	120,2	140,4											
22	мат_ож (средн. значение при P_x)	2732	170,8	191,6											
23															
24		ПРИРАЩЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ТЕНЗОДИНАМОМЕТРУ, Н													
25		8241,488													
26															
27		ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА													
28	Деформация		7,52E-05	7,61E-05											
29	Напр. в точке измерения, МПа		15,43	15,62											
30	Осевое напряжение, МПа		15,53												
31	Напряж. изгиба, МПа		0,09												
32	Отнош. изгиб напр к осев		0,006												
33	Площадь стержня, мм^2		169,6												
34	Эксперим. осевое усилие, Н		2633												
35															
36		ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ													
37	Теоретическое осевое усилие, Н		2747												
38															
39			СРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ												
40	Отнош. эксп. осевых усилий к теор.		0,959												

Рис. 49 – Фрагмент электронного протокола эксперимента

•По результатам эксперимента строится столбиковая диаграмма:
Выделяется строка 20 (обозначения стержней) и при нажатой клавише Ctrl строки 29 (экспериментальное осевое усилие) и 36 (теоретическое осевое усилие).

Вставка>Гистограмма

•Анализируются результаты и делаются выводы.

5.7. Контрольные вопросы

1. В чём отличие расчётных схем рама и ферма?
2. Каким условиям должна удовлетворять стержневая система, чтобы её можно было рассчитывать как ферму?
3. О чём свидетельствует среднеквадратическое значение результата измерения?
4. В чём сущность метода вырезания узлов?
5. Каким образом экспериментально определяются осевые напряжения в стержнях?
6. Каким образом экспериментально определяются напряжения от изгиба стержней?

7. Как оценить по результатам эксперимента правомерность выбора расчётной схемы в виде фермы?
8. По результатам эксперимента оценить к какой из двух рассматриваемых стержневых систем лучше подходит расчётная схема в виде фермы и почему?
9. Почему в проектировочном расчёте стержневой системы предпочтительнее использовать расчётную схему фермы, а не рамы?
10. Почему в эксперименте тензорезисторы наклеиваются в диаметрально противоположных точках сечения?
11. Какие причины могут вызвать нелинейное изменение напряжений от нагрузки в месте наклейки тензорезистора?
12. В эксперименте производится изгиб стержневых систем в их плоскости. Не искажает ли результаты эксперимента изгиб ферм из их плоскости? В этом направлении их изгибная жёсткость весьма мала.
13. Выполняются ли для испытываемых стержневых систем необходимые условия геометрической неизменяемости?
14. Какое минимальное значение деформации и напряжения может зарегистрировать ММТС-64.01?
15. Что такое коэффициент тензочувствительности тензорезистора?
16. Что такое геометрически изменяемая стержневая система, геометрически неизменяемая, статически определимая?
17. Всегда ли статически определимая ферма является геометрически неизменяемой?
18. Приведите примеры (и не только в авиации), где можно использовать расчётную схему ферма?
19. Подсчитайте критические напряжения местной и общей потери устойчивости для стержней. Определите предельную нагрузку на каждую из стержневых систем.
20. Если повышать нагрузку, то какой стержень первым выйдет из строя?
21. В каком из двух стержней 2-4 или 8-10 точнее измеряются осевые усилия?
22. Если увеличить предварительную и окончательную нагрузки на одинаковую величину и не превышать предела пропорциональности, то повлияет ли это на результаты эксперимента?
23. Если заданный преподавателем уровень нагрузки случайно был превышен, то, как можно исправить ситуацию: потихоньку снизить нагрузку до заданного уровня или разгрузить конструкцию ниже заданного уровня, а затем, догружая её, выйти на заданный уровень?
24. В чём преимущества измерения нагрузки на фермы тензометрическим датчиком по сравнению с пружинным динамометром?
25. Со временем установленная нагрузка немного снижается. Это показывает пружинный динамометр. Почему это происходит?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ШПАНГОУТА

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости расчётной схемы в виде плоской рамы для описания напряжённо-деформированного состояния прямоугольного шпангоута.

6.1. Объект исследования

Экспериментальная установка[5] представляет собой плоский прямоугольный шпангоут (рис. 50). Он состоит из верхнего и нижнего ригелей, левой и правой стоек.

Ригели сделаны из прессованного прямоугольного равнополочного таврового профиля ПР113-7. Площадь поперечного сечения профиля $F = 3{,}292\ см^2$, момент инерции относительно оси x $I_x = 4{,}652\ см^4$.

Стойки склёпаны из двух уголков. Левая – из прессованных бульбообразных уголков ПР102-8. Её площадь поперечного сечения $F = 2 \cdot 0{,}876 = 1{,}752\ см^2$, момент инерции $I_x = 2 \cdot 0{,}252 = 0{,}504\ см^4$.

Правая стойка склёпана из прессованных прямоугольных равнополочных уголков ПР100-39. Её площадь $F = 2 \cdot 2{,}131 = 4{,}262\ см^2$, момент инерции $I_x = 2 \cdot 2{,}010 = 4{,}020\ см^4$.

Все элементы шпангоута изготовлены из алюминиевого сплава Д16АТ. Модуль упругости сплава $E = 7 \cdot 10^4\ МПа$, коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$.

Прикладываемая к шпангоуту нагрузка измеряется пружинным динамометром ДПУ-0,1–2. Её максимальное значение ограничено на шкале динамометра красной полоской.

Рис. 50 – Прямоугольный шпангоут

В теоретических расчётах шпангоут рассматривается как плоская стержневая система, нагруженная силами, лежащими в его плоскости. Однако в силу неточности изготовления самого шпангоута и системы его нагружения возможен изгиб шпангоута из его плоскости. Такой изгиб следует считать погрешностью эксперимента.

Чтобы исключить эту погрешность, в исследуемых сечениях ригелей и стоек установлено по два тензорезистора, которые наклеены на равном расстоянии y от оси симметрии поперечных сечений (рис. 51)

6.2. Теоретические положения

Шпангоут представляет собой плоскую трижды статически неопределимую раму [6, 7, 10]. Раскрытие статической неопределимости выполним методом сил.

Шпангоут симметричен относительно горизонтальной оси, проходящей через его центр. Выберем основную систему, сделав разрез по оси симметрии. Тогда перерезывающая сила в месте разреза будет равна нулю как обратно-симметричный силовой фактор.

[5] Установка спроектирована доцентами кафедры прочности КуАИ И. С. Ахмедьяновым и Б. А. Лавровым.

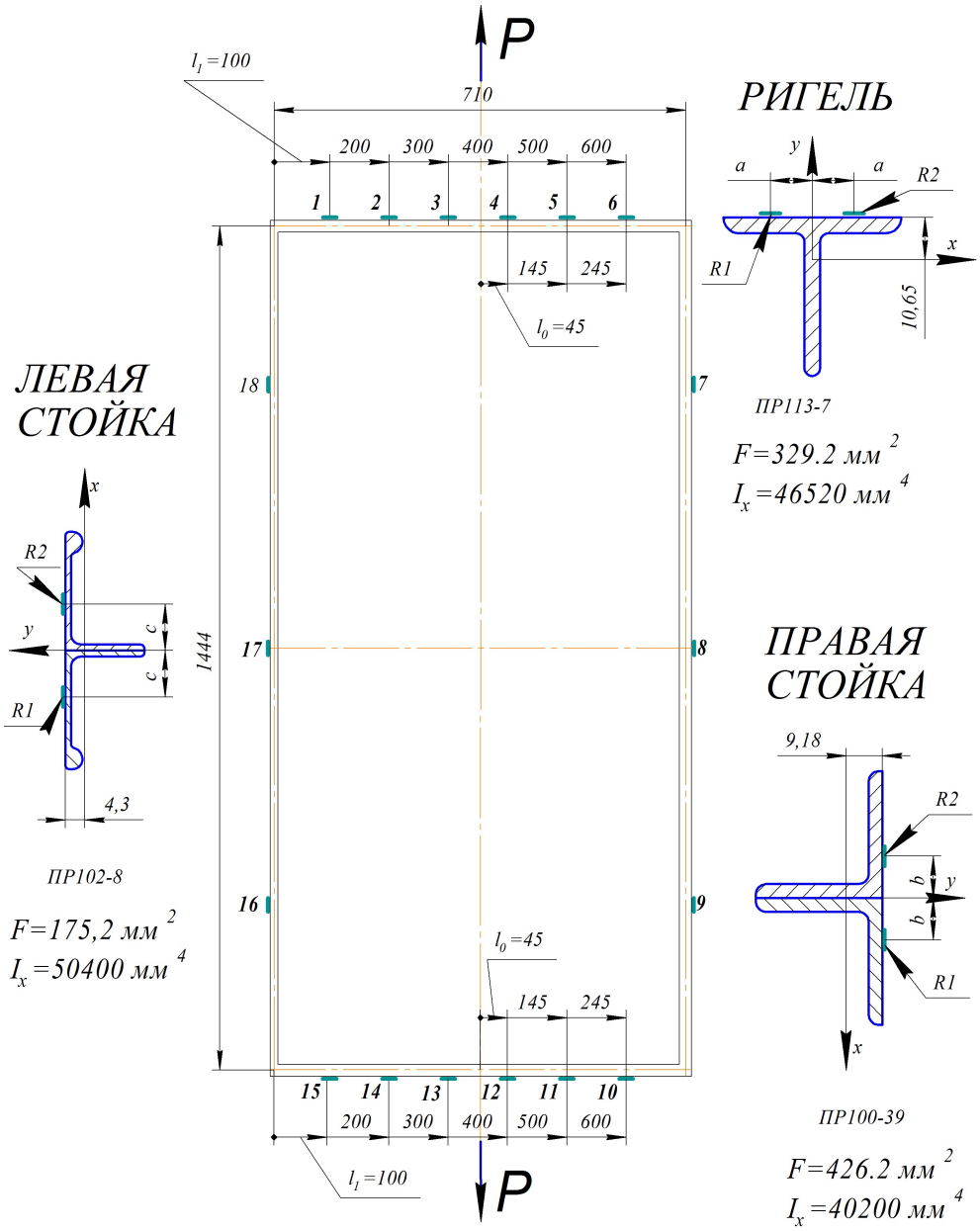


Рис. 51 – Схема шпангоута с наклеенными тензорезисторами

В результате получим эквивалентную систему (рис. 52), в которой всего две неизвестные

$$\begin{aligned} \Delta_{10} + \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 = 0 \\ \Delta_{20} + \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 = 0 \end{aligned} \qquad (39)$$

Для вычисления коэффициентов этих уравнений построим *в основной системе* следующие эпюры:

- эпюру изгибающих моментов M_0 от заданной внешней нагрузки P (рис. 53, а),
- эпюры изгибающих моментов $\bar{M}_1$ и $\bar{M}_2$ от единичных силовых факторов, действующих в направлении неизвестных X_1 и X_2 (рис. 53, в, с).

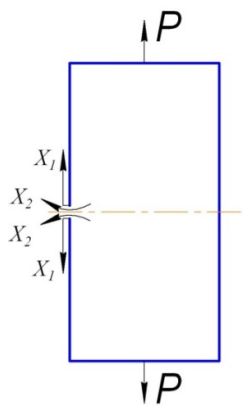


Рис. 52 – Эквивалентная система

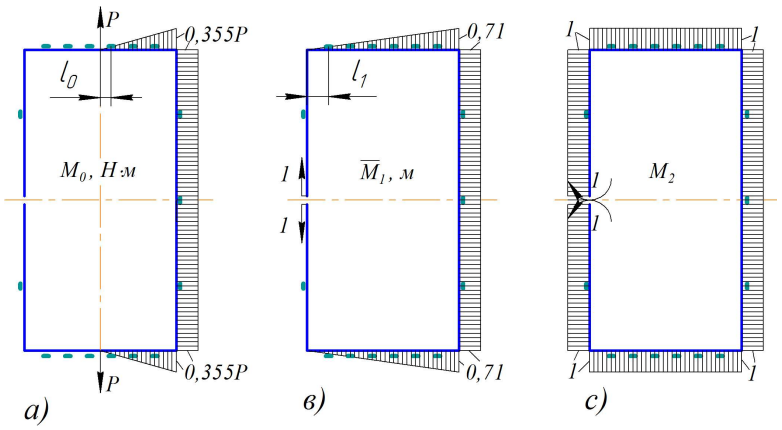


Рис. 53 – Эпюры изгибающих моментов

Коэффициенты канонических уравнений находятся в результате вычисления интегралов Мора способом Верещагина:

$$\Delta_{10} = \int_l \frac{\overline{M_1} \cdot M_0}{E \cdot J_x} ds = \frac{1}{E} \int_l \frac{\overline{M_1} \cdot M_0}{J_x} ds =$$

$$= \frac{P}{7 \cdot 10^4} \left[2 \frac{0,355 \cdot 0,355}{2 \cdot 4,652} \cdot \frac{5}{6} \cdot 0,71 + \frac{0,355 \cdot 1,444}{4,020} \cdot 0,71 \right] \cdot \frac{1}{10^6 \cdot 10^{-8}} = 1,5224 \cdot 10^{-4} P, м,$$

$$\Delta_{20} = \frac{1}{E} \int_l \frac{\overline{M_2} \cdot M_0}{J_x} ds = \frac{P}{7 \cdot 10^4} \left[2 \frac{0,355 \cdot 0,355}{2 \cdot 4,652} \cdot 1 + \frac{0,355 \cdot 1,444}{4,020} \cdot 1 \right] \times$$

$$\times \frac{1}{10^6 \cdot 10^{-8}} = 2,209 \cdot 10^{-4} P,$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{E} \int_l \frac{\overline{M^2}_1}{J_x} ds = \frac{1}{7 \cdot 10^4} \left[2 \frac{0,71 \cdot 0,71}{2 \cdot 4,652} \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,71 + \frac{0,71 \cdot 1,444}{4,020} \cdot 0.71 \right] \times$$

$$\times \frac{1}{10^6 \cdot 10^{-8}} = 3,32 \cdot 10^{-4} м \cdot H^{-1},$$

$$\delta_{12} = \frac{1}{E} \int_l \frac{\overline{M_1} \cdot \overline{M_2}}{J_x} ds = \frac{1}{7 \cdot 10^4} \left[2 \frac{0,71 \cdot 0,71}{2 \cdot 4,652} + \frac{0,71 \cdot 1,444}{4,020} \right] \frac{1}{10^6 \cdot 10^{-8}} = 5,191 \cdot 10^{-4} H^{-1},$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{E} \int_l \frac{\overline{M_2^2}}{J_x} ds = \frac{1}{7 \cdot 10^4} \left[2 \frac{0,71}{4,652} + \frac{1,444}{0,504} + \frac{1,444}{4,020} \right] \frac{1}{10^6 \cdot 10^{-8}} = 5,042 \cdot 10^{-3} м^{-1} \cdot H^{-1}.$$

Тогда имеем

$$\begin{aligned} 1,522 \times 10^{-4} P + 3,32 \times 10^{-4} X_1 + 5,191 \times 10^{-4} X_2 = 0, \\ 2,209 \cdot 10^{-4} P + 5,191 \cdot 10^{-4} X_1 + 5,042 \cdot 10^{-3} X_2 = 0. \end{aligned} \quad (40)$$

Решение системы уравнений даёт

$$X_1 = -0,465P \quad H, \qquad X_2 = 4,069P \quad H \cdot мм.$$

Значения изгибающего момента M и осевой силы N в сечениях шпангоута подсчитываются следующим образом

$$M = M_0 + \overline{M_1} X_1 + \overline{M_2} X_2, \quad (41)$$

$$N = N_0 + \overline{N}_1 X_1. \quad (42)$$

Здесь N_0 и $\overline{N}_1$ – значения осевой силы в основной системе от заданной нагрузки (рис. 54, *а*) и от единичной силы, действующей в направлении силового фактора X_1 (рис. 54, *в*).

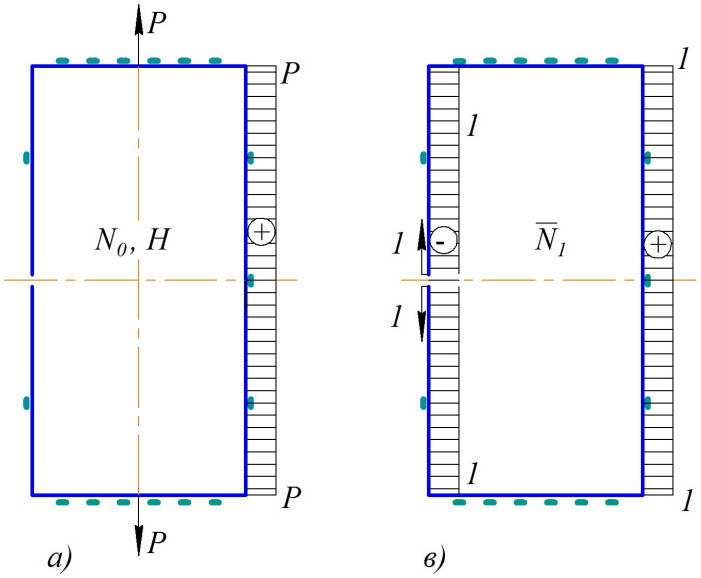


Рис. 54 – Эпюры осевых усилий

Нормальные напряжения в сечениях шпангоута от действия осевой силы и изгибающего момента будут

$$\sigma = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{I_x} y, \tag{43}$$

где F и I_x – площадь и момент инерции поперечного сечения;

y – расстояние от оси изгиба сечения до точки, в которой наклеен тензорезистор (см. рис. 51).

Отметим, что на рис. 53 эпюры изгибающих моментов отложены на сжатом волокне. Следовательно, в точках наклейки тензорезисторов (см. рис. 51) они вызывают сжимающие нормальные напряжения.

6.3. Экспериментальное определение деформаций и напряжений

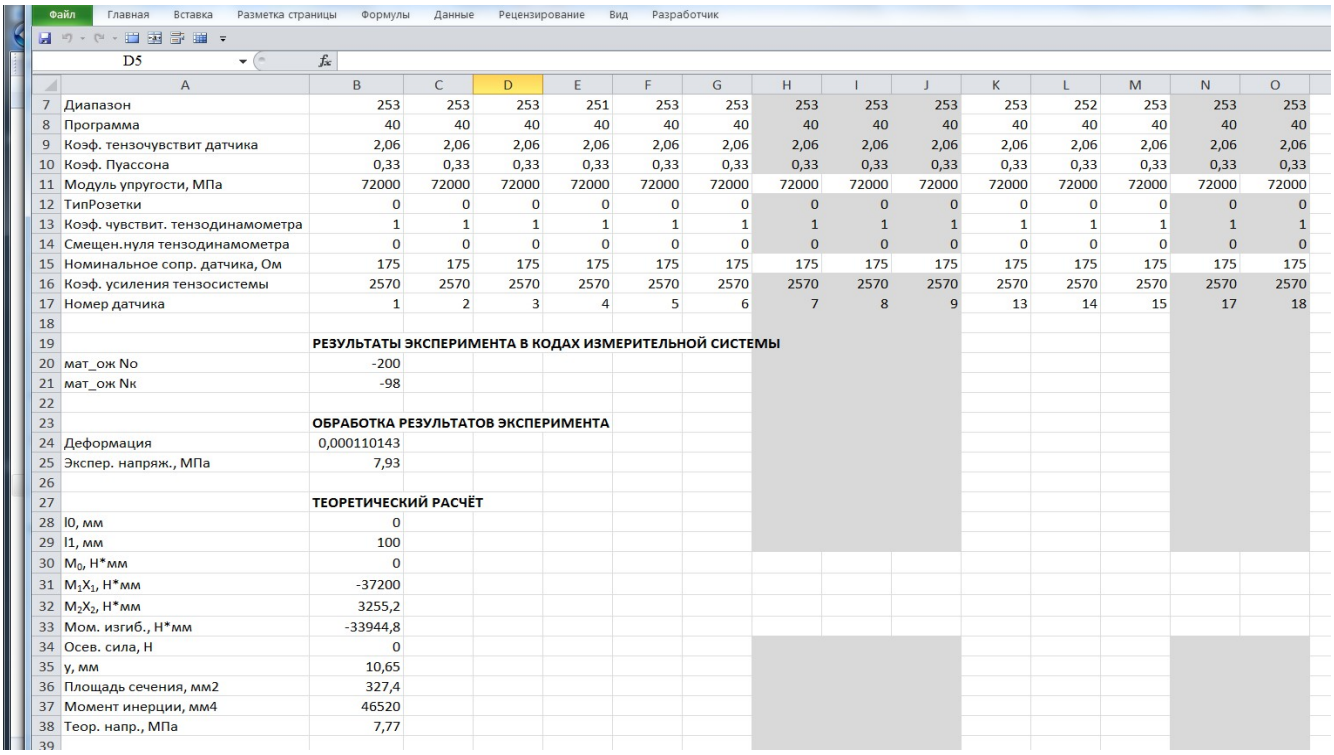
В качестве измерительного устройства используется 64-канальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС 64.01.

На шпангоут наклеены тензорезисторы BF350-6AA фирмы ZEMIC с базой 6 мм и номинальным сопротивлением 350 Ом. На ригеля наклеено по шесть спаренных тензодатчиков, на стойки – по три.

При расчёте теоретических напряжений шпангоут рассматривается как плоская стержневая система, нагруженная силами, лежащими в его плоскости. Однако в силу неточности изготовления самого шпангоута и системы нагружения, малой жёсткости его при изгибе из плоскости возможно возникновение дополнительных напряжений, которые не учитываются расчётной схемой и их следует считать погрешностью эксперимента.

Чтобы исключить эту погрешность, в исследуемых сечениях ригелей и стоек установлено по два тензорезистора, которые наклеены на равном расстоянии y от оси симметрии поперечных сечений (рис. 51). Тензорезисторы соединены параллельно и включены в одно плечо измерительного моста. Тогда общее сопротивление плеча моста будет равно 175 Ом. При изгибе шпангоута из его плоскости в точках наклейки тензорезисторов возникают одинаковые по величине, но противоположные по знаку деформации. При таком включении тензорезисторов чувствительность измерительного моста к деформациям изгиба шпангоута в его плоскости остаётся на обычном для тензометрических измерений уровне, а чувствительность к деформациям изгиба из его плоскости уменьшается настолько, что ею можно пренебречь (меньше 0,6%).

Порядок выполнения измерений описан в разделе /3/. Результаты измерений заносятся в электронный бланк эксперимента (рис. 55).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
7	Диапазон	253	253	253	251	253	253	253	253	253	253	252	253	253	253
8	Программа	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
9	Коэф. тензочувствит датчика	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06
10	Коэф. Пуассона	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
11	Модуль упругости, МПа	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000	72000
12	ТипРозетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Коэф. чувствит. тензодинамометра	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Смещен.нуля тензодинамометра	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Номинальное сопр. датчика, Ом	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
16	Коэф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570
17	Номер датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	13	14	15	17	18
18															
19		РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													
20	мат_ож No	-200													
21	мат_ож Nк	-98													
22															
23		ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА													
24	Деформация	0,000110143													
25	Экспер. напряж., МПа	7,93													
26															
27		ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ													
28	l0, мм	0													
29	l1, мм	100													
30	M_0, Н*мм	0													
31	M_1X_1, Н*мм	-37200													
32	M_2X_2, Н*мм	3255,2													
33	Мом. изгиб., Н*мм	-33944,8													
34	Осев. сила, Н	0													
35	y, мм	10,65													
36	Площадь сечения, мм2	327,4													
37	Момент инерции, мм4	46520													
38	Теор. напр., МПа	7,77													

Рис. 55 – Протокол эксперимента с примером оформления расчётов, удобным для построения графиков в EXCEL

6.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов

1) Используя формулу (3), подсчитывают деформации в местах наклейки тензорезисторов (строка 24 протокола).

2) В строке 25 подсчитывают напряжения по закону Гука (4).

3) Для удобства вычислений изгибающего момента с помощью EXCEL в точках наклейки тензорезисторов преобразуем формулу (41) к виду:

$$M = M_0 + \overline{M}_1 X_1 + \overline{M}_2 X_2 = P l_0 + 1 \cdot l_1 X_1 + 1 \cdot X_2. \qquad (44)$$

Здесь $P = \Delta P = P_i - P_{0.}$ – приращение нагрузки.

l_0 *и* l_1 – плечи сил, вызывающих изгиб шпангоута относительно мест установки тензорезисторов (рис. 53, *а, в*).

В некоторых точках наклейки тензорезисторов (например, в точках 1, 2, 3 и других) момент M_0 отсутствует. Тогда полагаем $l_0 = 0$.

4) Заносим в строки 28 и 29 значения l_0 *и* l_1 соответственно.

5) Используя формулу (44) подсчитываем составляющие изгибающего момента (строки 30, 31 и 32). Напомним, что при расчёте шпангоутов разгибающий момент считается положительным.

6) Суммируя, подсчитываем изгибающий момент M_0 в основной системе от внешней нагрузки (строка 33).

7) В строке 34 вычисляем осевую силу в сечениях по формуле (42).

8) В строки 35, 36 и 37 заносим соответственно координату *y* расположения тензорезисторов в сечении, площадь сечения и момент инерции.

9) В строке 35 вычисляем теоретические напряжения по формуле (43).
10) Сравниваем результаты эксперимента и теоретические расчёты.
11) По результатам эксперимента строим столбиковую диаграмму.
Выделяем строки 17 и 40:
Вставка>Гистограмма.
12) Анализируем результаты и делаем выводы.

6.5. Контрольные вопросы

1. Что такое основная и эквивалентная системы?
2. Почему силовой фактор $X_3 = 0$?
3. Какой физический смысл имеют канонические уравнения метода сил?
4. Как можно проверить правильность построения эпюры *M*?
5. Почему эпюра *M* получается несимметричной относительно линии действия сил *P*?
6. В чем смысл принципа независимого действия сил, где он используется и при каких условиях он справедлив?
7. Каким образом исключаются из результатов эксперимента деформации, вызванные изгибом рамы из её плоскости?
8. Что является показателем надёжности экспериментальных данных?
9. Какое минимальное значение деформации и напряжения может зарегистрировать ММТС-64?
10. Что такое коэффициент тензочувствительности тензорезистора?
11. В какой точке шпангоута наименее точно измеряются напряжения?
12. Если увеличить предварительную и окончательную нагрузки на одинаковую величину, то повлияет ли это на результаты эксперимента и на результаты теоретического расчёта?
13. По паспортным данным пружинный динамометр имеет погрешность два процента от максимально измеряемой силы. Какова возможная максимальная погрешность задания в лабораторной работе предварительной нагрузки P_0, конечной нагрузки P_i, приращения нагрузки $P = \Delta P = P_i - P_0$?

7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГОВОГО ШПАНГОУТА

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости расчётной схемы в виде плоской рамы для описания напряжённо-деформированного состояния кругового шпангоута.

7.1.Описание объекта исследования

Экспериментальная установка представляет собой плоский круговой шпангоут (рис. 56 и 57), изготовленный из алюминиевого сплава АМГ-6.

Шпангоут состоит из двух колец 1 и 2, которые соединены между собой болтами 3.

Рис. 56 – Общий вид установки

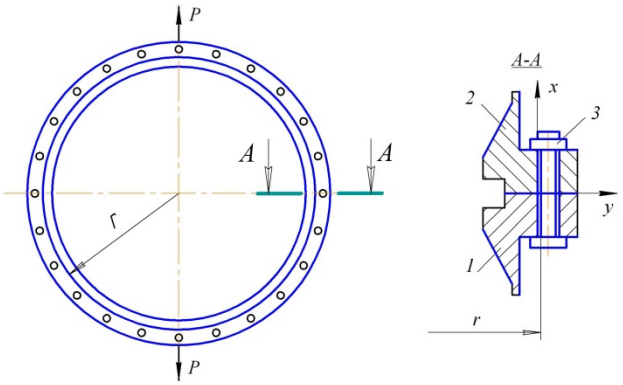


Рис. 57 – Схема экспериментальной установки

Площадь поперечного сечения шпангоута F=17,8 *см²*, момент инерции сечения относительно главной центральной оси x J=22,92 *см*^{4}, радиус осевой линии шпангоута, проходящей через центры тяжести поперечных неослабленных сечений r=34 *см*.

Радиальная нагрузка на шпангоут измеряется пружинным динамометром ДПУ-0,2-2.

Модуль упругости сплава АМГ-6 равен $E=7\cdot10^4$ *МПа.*

7.2. Теоретические расчёты

Шпангоут можно рассматривать как замкнутую плоскую раму, которая является трижды статически неопределимой системой [10]. Раскрытие статической неопределимости осуществим с помощью метода сил. Условия симметрии позволяют сократить число неизвестных до одного.

Основную систему получим, разрезав шпангоут, как показано на рис. 58, а. В силу симметрии системы относительно горизонтальной оси в месте размыкания перерезывающая сила как обратно симметричный фактор будет равна нулю.

В силу симметрии системы относительно вертикальной оси осевая сила в месте разреза будет равна *0,5P*. Тогда остаётся один неизвестный фактор в сечении – изгибающий момент, величину которого обозначим через X_1 (см. рис. 58, б)

Значение X_1 определяется из канонического уравнения:

$$\Delta_{10} + \delta_{11} X_1 = 0. \qquad (45)$$

Для вычисления коэффициентов Δ_{10} и δ_{11} необходимо найти изгибающие моменты M_0 и $\bar{M}_1$ в основной системе от внешней нагрузки (рис. 59) и от единичного момента (рис. 58, в). Соответствующие эпюры приведены на рис. 60.

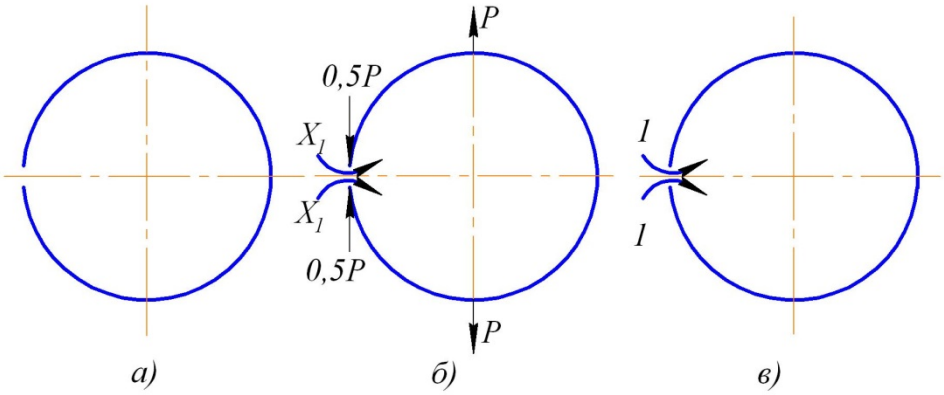


Рис. 58 – Основная, эквивалентная и единичная системы

Аналитическое выражение для M_0 на участке $0 \le \varphi \le \frac{\pi}{2}$ имеет вид:

$$M_0(\varphi) = -0{,}5\,Pr(1 - cos\,\varphi). \qquad (46)$$

При расчёте шпангоутов момент, уменьшающий кривизну шпангоута (разгибающий его), считается положительным.

Определим коэффициенты канонического уравнения. Интегрирование производим от 0 до $\pi/2$, учетверяя результат.

$$\Delta_{10} = 4\int_0^{\pi/2} \frac{M_0 \bar{M}_1}{EI} r d\varphi = \frac{2\,Pr^2}{EI}\int_0^{\pi/2} (1 - cos\,\varphi) d\varphi = \frac{2\,Pr^2}{EI}(\frac{\pi}{2} - 1).$$

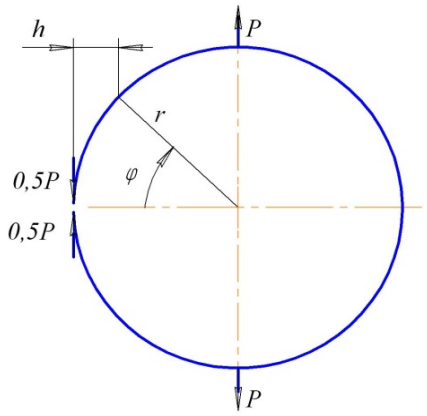


Рис. 59 – Схема нагружения основной системы внешней нагрузкой

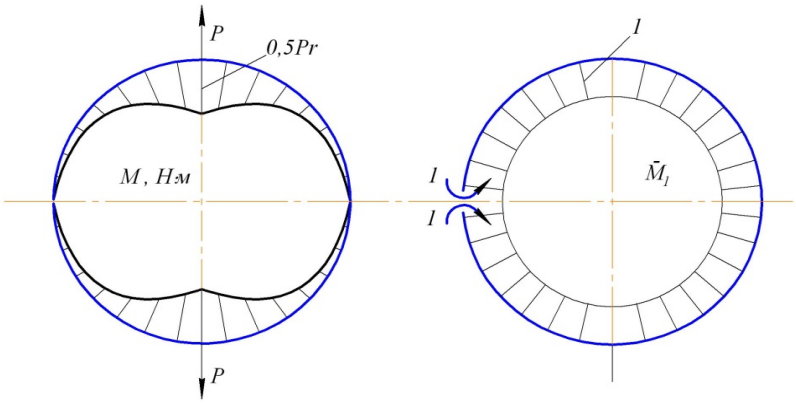


Рис. 60 –Эпюры изгибающих моментов

Поскольку эпюры изгибающих моментов M_0 и $\bar{M}_1$ симметричны относительно горизонтальной и вертикальной осей, достаточно определить их закон изменения для одной четвертинки шпангоута в пределах угла $0 \le \varphi \le \frac{\pi}{2}$.

$$\delta_{11} = 4\int_0^{\pi/2} \frac{\bar{M}_1^2}{EI} r d\varphi = \frac{4r}{EI}\int_0^{\pi/2} d\varphi = \frac{2\pi r}{EI}.$$

Здесь E и J – модуль упругости материала и момент инерции поперечного сечения шпангоута.

Далее находим:

$$X_1 = -\frac{\Delta_{10}}{\delta_{11}} = Pr(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2}). \qquad (47)$$

Статическая неопределимость раскрыта. Окончательные значения изгибающего момента M и осевой силы N в сечениях шпангоута рассчитываются по формулам:

$$M(\varphi) = M_0(\varphi) + \bar{M}_1 X_1, \tag{48}$$

$$N(\varphi) = N_0(\varphi). \tag{49}$$

Осевое усилие N_0 в основной системе от внешней нагрузки как функцию угла φ предлагается студентам найти самостоятельно, используя схему рис. 59.

Изгибающий момент M и осевая сила N вызывают нормальные напряжения в сечениях шпангоута:

$$\sigma = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{I} y. \tag{50}$$

y – расстояние от оси изгиба до точки, в которой определяется напряжение (см. рис. 61).

7.3.Экспериментальное определение деформаций и напряжений

Для измерения деформаций шпангоута используются фольговые тензорезисторы марки BF120-5AA, имеющие измерительную базу 5 мм, номинальное сопротивление $R_0 = 120\,Ом$ и коэффициент тензочувствительности $K=2,18$.

Схема наклейки тензорезисторов показана на рис. 61. Номера датчиков обозначены цифрами. Двенадцать датчиков располагаются на внутренней поверхности шпангоута и столько же – на наружной.

Значения углов φ, определяющих положение датчиков, приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Угловое положение датчиков

Номер датчика	1, 13	2, 14	3, 15	4, 16	5, 17	6, 18	7, 19	8, 20	9, 21	10, 22	11, 23	12, 24
Угол φ, градусы	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5	112,5	127,5	142,5	157,5	172,5

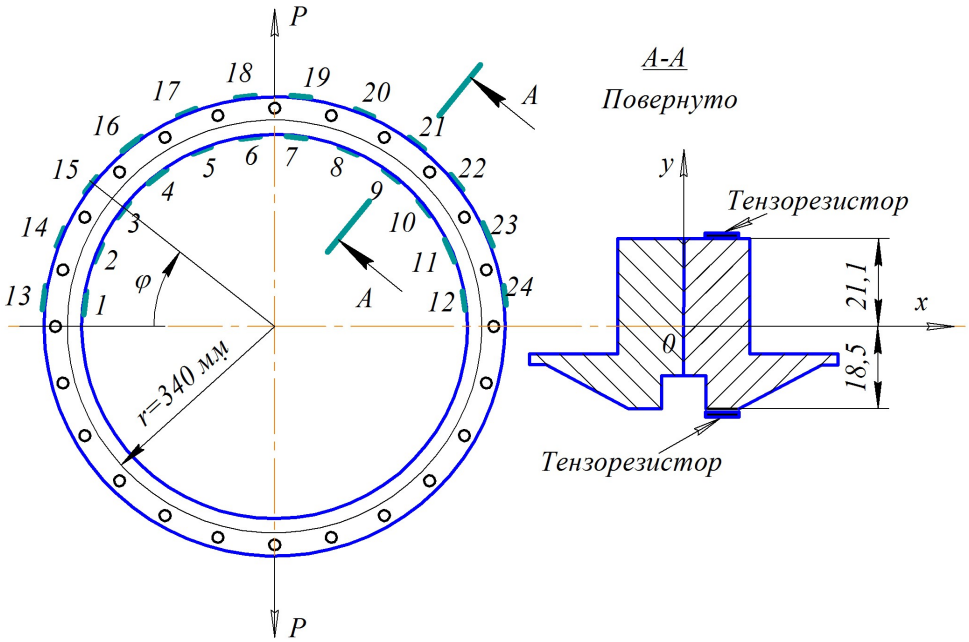
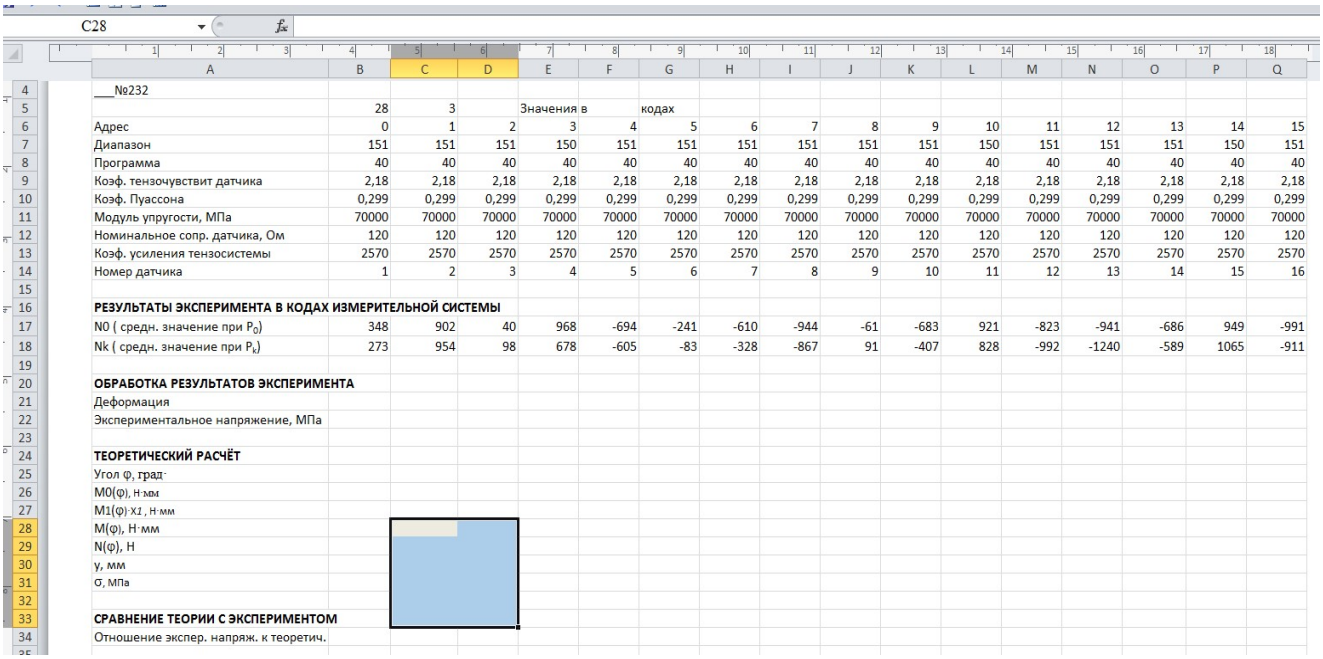


Рис. 61 – Схема наклейки тензорезисторов

Экспериментальные напряжения в исследуемых точках находятся по закону Гука для одноосного напряжённого состояния $\sigma = E\varepsilon$.

В качестве измерительного устройства используется 64-канальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС 64.01.

Порядок выполнения измерений описан в разделе /3/. Фрагмент электронного протокола эксперимента приведён на рис. 62.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
4	___№232																
5		28	3		Значения в		кодах										
6	Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	Диапазон	151	151	151	150	151	151	151	151	151	151	150	151	151	151	150	151
8	Программа	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
9	Коэф. тензочувствит датчика	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
10	Коэф. Пуассона	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299
11	Модуль упругости, МПа	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
12	Номинальное сопр. датчика, Ом	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
13	Коэф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570
14	Номер датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
15																	
16	**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**																
17	N0 (средн. значение при P_0)	348	902	40	968	-694	-241	-610	-944	-61	-683	921	-823	-941	-686	949	-991
18	Nk (средн. значение при P_k)	273	954	98	678	-605	-83	-328	-867	91	-407	828	-992	-1240	-589	1065	-911
19																	
20	**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**																
21	Деформация																
22	Экспериментальное напряжение, МПа																
23																	
24	**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ**																
25	Угол φ, град																
26	M0(φ), Н·мм																
27	M1(φ)·X1 , Н·мм																
28	M(φ), Н·мм																
29	N(φ), Н																
30	y, мм																
31	σ, МПа																
32																	
33	**СРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ**																
34	Отношение экспер. напряж. к теоретич.																

Рис. 62 – Фрагмент электронного протокола эксперимента

7.4. Порядок выполнения теоретических расчётов и обработки результатов измерений

1. В строке (21) протокола эксперимента подсчитать деформации от приращения нагрузки $P = P_к - P_0$ в точках наклейки тензорезисторов по формуле (3).
2. По закону Гука перейти к экспериментальным напряжениям (строка 22).
3. По формуле (47) подсчитать X_1.
4. В строку (25) ввести значения углов φ из таблицы (4).
5. В строке (26) подсчитать значения момента $M_0(\varphi)$.
6. В строке (27) определить значения момента $\overline{M}_1 X_1$.
7. В строке (28) выполнить расчёты по формуле (48).
8. В строку (29) внести значение $N(\varphi)$.
9. В строку (30) внести значения координаты y.
10. По формуле (50) подсчитать значения нормальных напряжений в наружных и внутренних волокнах поперечного сечения шпангоута (строка 31).
11. Найти отношение экспериментальных напряжений к теоретическим (строка 34).
12. Построить столбиковую диаграмму.

Выделить строки со значениями экспериментальных и теоретических напряжений:

Вставка>Диаграмма>Двух столбиковая.

13. Выполнить анализ полученных результатов и сделать выводы.

7.5. Контрольные вопросы

1. Какова степень статической неопределимости шпангоута, если рассматривать его как плоскую раму с однозамкнутым контуром?
2. Какие рациональные варианты выбора основной системы возможны для рассматриваемого шпангоута?

3. Какие внутренние силовые факторы в сечениях шпангоута являются симметричными относительно линии действия сил *P*?
4. В чем смысл принципа независимости действия сил и при каких уровнях нагрузок он справедлив?
5. Повлияет ли на результаты эксперимента увеличение предварительной и окончательной нагрузок на 500 Н?
6. Как определяются экспериментальные значения нормальных напряжений в исследуемых точках шпангоута?
7. Почему не предприняты меры для исключения из результатов эксперимента деформаций, вызванные изгибом шпангоута из его плоскости?
8. Как проверить правильность построения окончательной эпюры М для шпангоута?
9. Какой физический смысл имеет каноническое уравнение?
10. Оцените приемлемость расчётной схемы «рама» к шпангоутам.
11. В чем сущность метода сил?

8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЯСНОГО КЕССОНА

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости балочной теории для описания напряжённо-деформированного состояния четырехпоясного кессона.

8.1. Описание объекта исследования

Четырехпоясный кессон (от франц. *caisson* – ящик) представляет собой межлонжеронную часть крыла. Он воспринимает основную долю изгибающих и крутящих моментов, действующих на крыло.

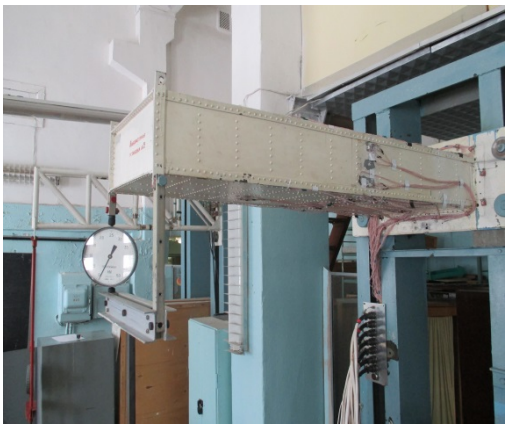


Рис. 63 – Лабораторная установка

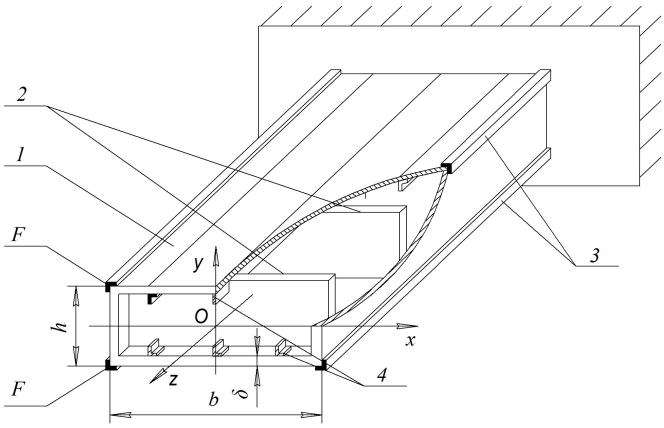


Рис. 64 – Конструкция кессона

Исследуемая конструкция[6] (рис. 63 и 64) состоит из дюралевой обшивки ***1*** толщиной ***δ=0,25*** см, ряда поперечных диафрагм ***2*** для поддержания формы поперечного сечения и силового продольного набора – четырёх стальных поясов ***3*** площадью ***F=1,43*** см^2 каждый. Длина кессона ***L=150*** см, ширина поперечного сечения ***b=50*** см, высота ***h=20*** см.

Поперечное сечение кессона симметрично относительно осей ***x*** и ***y***.

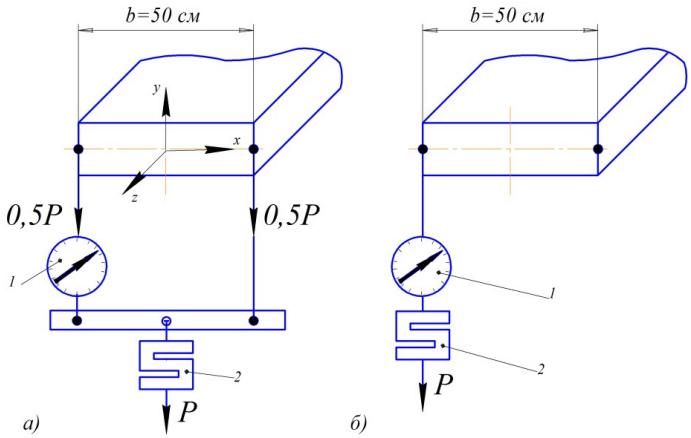


Рис. 65 – Варианты нагружения кессона:
а) – чистый изгиб, б) – изгиб с кручением. 1 – пружинный динамометр, 2 – тензометрический датчик силы

Модуль упругости дюралевой обшивки $E=7\cdot10^4$ МПа, стальных поясов $E=2{,}05\cdot10^5$ МПа, коэффициент Пуассона материалов $\mu=0{,}3$, модуль сдвига материала обшивки $G=2{,}7\cdot10^4$ МПа.

Возможно испытание кессона на чистый изгиб и изгиб с кручением (рис. 65). Нагрузка на кессон создаётся нагружающим устройством на базе гидравлического домкрата. Величина нагрузки задаётся визуально по шкале пружинного динамометра ДПУ-0,5-2. Более точное измерение нагрузки производится тензометрическим датчиком усилия. Следует учитывать, что в случае изгиба (рис. 65, а), пружинный динамометр показывает только половину прикладываемой к кессону нагрузки *P*.

[6] Лабораторная установка разработана профессором Ю.Л. Тарасовым и доцентом Б.А. Лавровым.

8.2. Теоретические положения

Основные силовые элементы летательных аппаратов: фюзеляж, крыло, оперение самолёта, корпус ракеты, как правило, конструктивно представляют собой подкреплённые тонкостенные конструкции. Тонкую обшивку подкрепляют лонжероны, стрингеры, нервюры, шпангоуты.

Теоретический расчёт на прочность подобных конструкций производят с использованием так называемой *балочной теории расчёта тонкостенных конструкций.*

В балочной теории принят ряд допущений, которым должна удовлетворять тонкостенная конструкция. В табл. 5 приведён анализ выполнения допущений применительно к четырёхпоясному кессону.

Таблица 5 – Анализ выполнения допущений балочной теории

№ п.п.	Допущение балочной теории	Анализ выполнения допущения применительно к четырёхпоясному кессону
1	Тонкостенная конструкция должна быть цилиндрической	Выполняется
2	Поперечное сечение конструкции неизменно по её длине	Выполняется
3	Форма поперечного сечения оболочки поддерживается поперечными подкрепляющими элементами	Выполняется. В кессоне имеются частые поперечные диафрагмы (нервюры)
4	Оболочка должна быть бесконечно длинной	Не выполняется. Длина кессона ограничена размером 1,5 метра
5	Материалы, из которых изготовлена конструкция, подчиняются закону Гука во всём диапазоне изменения деформаций	Поведение материала зависит от уровня напряжений. Вывод можно сделать по результатам эксперимента
6	Габаритные размеры поперечного сечения кессона значительно превышают размеры поперечных сечений подкрепляющих элементов	Выполняется
7	Отсутствуют внешние касательные нагрузки, направленные вдоль продольной оси оболочки	Выполняется
8	Продольные деформации поперечного сечения кессона подчиняются закону плоскости	Вывод можно сделать по результатам эксперимента

Для удобства вычислений поперечное сечение тонкостенной конструкции, имеющее силовые элементы из различных материалов, приводится к сечению из одного материала.

Четырёхпоясный кессон представляет собой тонкостенную конструкцию с однозамкнутым контуром поперечного сечения. Согласно балочной теории расчётные формулы для определения нормальных напряжений σ и погонных касательных усилий T имеют вид [11]:

$$\sigma = \varphi \frac{M_x}{I_{rx}} y \ , \tag{51}$$

$$T = T^0 + T^* \ . \tag{52}$$

Здесь $\varphi = \dfrac{E}{E_0}$ – редукционный коэффициент;

E – модуль упругости материала в рассматриваемой точке;

E_0 – модуль упругости материала, к которому приводится сечение;

M_x – изгибающий момент в расчётном сечении;

I_{rx} – момент инерции приведённого сечения;

y – ордината точки, в которой определяется напряжение (оси x, y – главные центральные);

$T^0 = \dfrac{M_z - \oint T^* \rho ds}{\Omega}$ – погонное касательное усилие в некоторой точке поперечного сечения, выбранной в качестве начала отсчёта дуг;

M_z – момент внешней нагрузки относительно произвольно выбранного полюса;

$T^* = \dfrac{Q_y}{I_{rx}} S_{rx}$ – погонные касательные усилия в условно разомкнутом сечении;

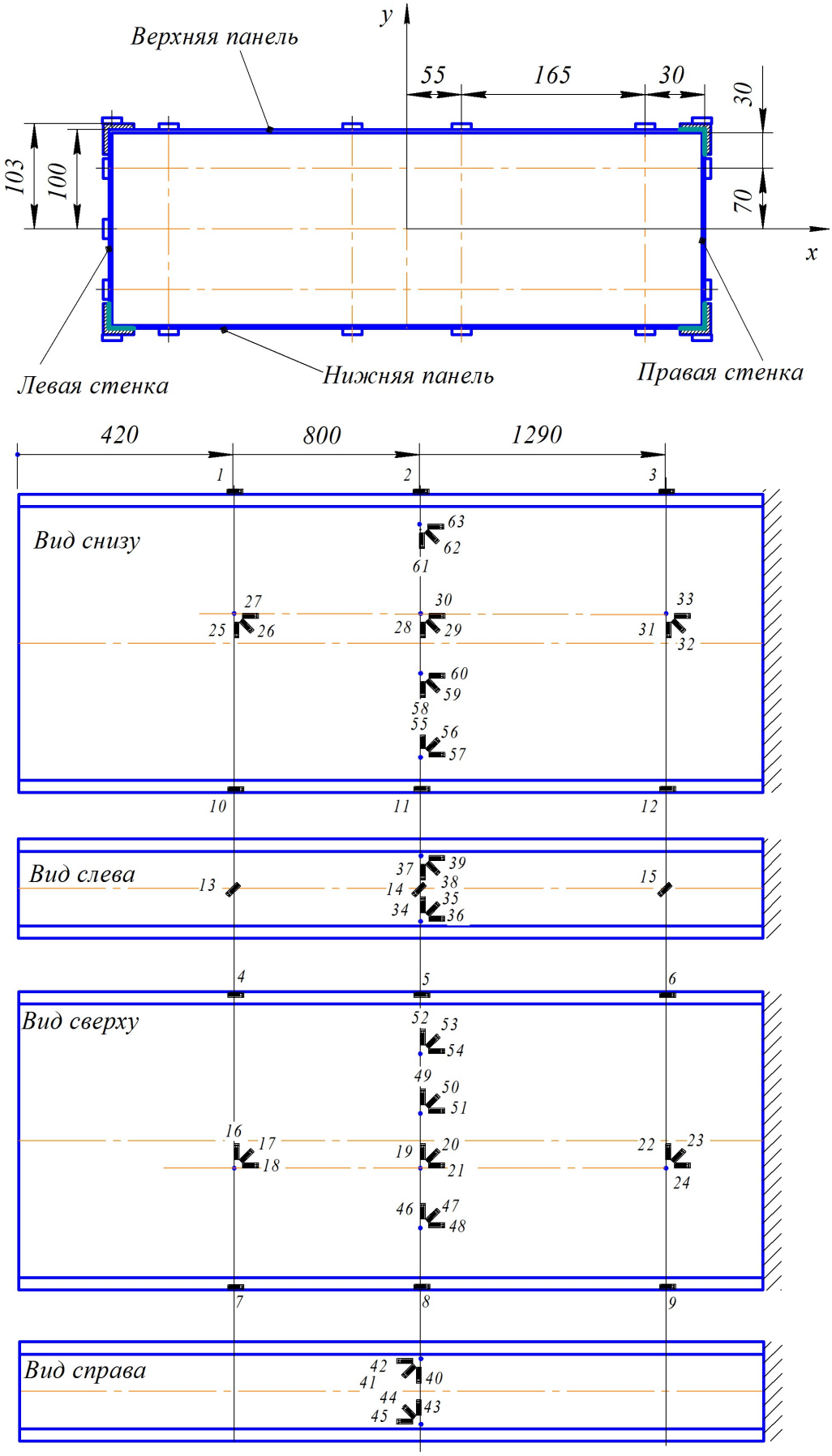


Рис. 66 – Расположение тензорезисторов на кессоне

ρ – плечо этих усилий относительно полюса;

Ω – удвоенная площадь фигуры, ограниченной средней линией контура поперечного сечения;

Q_y – перерезывающая сила в расчётном сечении;

S_{rx} – статический момент части приведённого сечения от начала отсчёта дуг до рассматриваемой точки.

Вычисление погонных касательных усилий T по формуле (52) можно упростить, если воспользоваться симметрией поперечного сечения кессона относительно вертикальной оси ***y***. Для этого следует начало отсчёта дуг поместить на оси симметрии. В результате $\oint T^* \rho ds = 0$. Тогда при чистом изгибе кессона $T^0 = 0$, при изгибе кессона с кручением $T^0 = \dfrac{M_z}{\Omega}$.

8.3. Экспериментальное определение деформаций и напряжений

Деформации в кессоне измеряются фольговыми одиночными тензорезисторами и фольговыми трёхэлементными прямоугольными розетками производства фирмы ZEMIC. Тензорезисторы имеют измерительную базу $l = 4\,мм$, номинальное сопротивление $R = 120\,Ом$, коэффициент тензочувствительности $к = 2{,}18$.

На рис. 66 показано расположение тензорезисторов на развёртке кессона. На стальные *пояса* наклеены 12 одиночных датчиков (№ 1...12). На дюралевую *обшивку* – три одиночных датчика (№ 13, 14, 15) под углом *45°* к продольной оси кессона и шестнадцать трёхэлементных тензорозеток (датчики № I6...63*)*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
4	__№232																													
5		20	1	15:41	Значения в		кодах																							
6	Адрес	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22	23	24	28	29	30	31	32	33	34	35
7	Диапазон	0	151	150	151	151	151	151	152	151	151	152	151	151	151	151	150	150	150	150	151	151	150	150	151	151	151	151	150	151
8	Программа	8	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
9	Коэф. тензочувствит. датчика	0	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
10	Коэф. Пуассона	0	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299
11	Модуль упругости, МПа	0	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
12	Ориентация датчиков розетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
13	Коэф. чувств. датчика силы	3,457	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Смещение нуля датчика силы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Номинальное сопр. тензор., Ом	0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
16	Коэфф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570
17	Номер датчика	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22	23	24	28	29	30	31	32	33	34	35
18																														
19	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ																													
20	мат_ож	256,2	-981,5											759,4			594,7	1008	800,2											
21	мат_ож	2658	-1074											856,1			564,3	1036	858,6											
22																														
23	ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА																													
24	Нагрузка по тензодатч. силы, Н	8303,02																												
25	Деформация		-0,0001											0,00014			-4,513E-05	4E-05	9E-05											
26	Напряжение в поясах, МПа		-28,295																											
27	Напряжение чистого сдвига, МПа													7,73173																
28	ОБРАБОТКА ПОКАЗАНИЙ ТЕНЗОРОЗЕТОК																													
29	Деформация сдвига																4,15137E-05													
30	Касательные напряжения t_{xy}, МПа																1,118538201													
31	Продольные напряжения s_x, МПа																6,064774078													
32	Поперечные напряжения s_x, s_y, МПа																-3,15910528													
33	tg2j																-0,31503182													
34	j																-0,15259489													
35	Деформация в направлении j																-4,83228-05													
36	Деформация в направлении j+90°																8,98316E-05													
37	Главная деформация e_1																8,98316E-05													
38	Главная деформация e_2																-4,8322E-05													
39	Напряжение s_1, МПа																5,794898984													
40	Напряжение s_2, МПа																-1,64987379													
41	Максимальное касат. напряж. МПа																3,722386385													
42	Эквивалентное напряжение, Ма																6,772280981													
43																														
44	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПО БАЛОЧНОЙ ТЕОРИИ																													
45	Редукционный коэффициент j		2,93																											
46	Плечо силы l, мм		420														420													
47	Изгибающ. момент Mx, Нмм		3E+06																											
48	Координата y, мм		103																											
49	Теоретич. напряжения s_x, МПа																9,110392336													
50	Касательные напряжения, МПа																													
51																														
52	СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ РАСЧЁТАМИ																													
53	Отношение экспер. напряж. к теоретич																													
54																														

Рис. 67 – Фрагмент электронного протокола эксперимент

Восемью электрическими кабелями тензорезисторы подключаются к микропроцессорной многоканальной тензометрической системе ММТС-64.01. Порядок выполнения эксперимента описан в разделе /3/. Фрагмент бланка эксперимента представлен на рис. 67. В бланке тёмными полосами выделены тройки столбцов, относящихся к отдельной тензорозетке.

8.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов

1. Используя формулу (2) подсчитать приращение нагрузки $P = \Delta P = P_i - P_{0.}$, действующей на кессон. Результат поместить в ячейку B24 протокола эксперимента.

2. В строке 25 подсчитать деформации по всем тензорезисторам (кроме нулевого столбца), используя формулу (3).

3. Подсчитать напряжения в поясах кессона по закону Гука по показаниям датчиков №1…12 (строка 26).

4. По показаниям трёх датчиков №13, 14 и 15 определить касательные напряжения на оси изгиба кессона, используя формулы (5) или (6).

5. В строке 29 подсчитываем деформации сдвига в местах установки розеток (формула 8).

6. Подсчитываем касательные напряжения в поперечном сечении кессона $\tau = G\gamma = \dfrac{E}{2(1+\mu)}\gamma$ и помещаем в строку 30.

7. В строках 31 и 32 подсчитываем напряжения в продольном σ_z и поперечном направлениях кессона (в панелях σ_x, в боковинах σ_y) по формулам (12).

8. Используя формулу (9) в строках 33 и 34 определяем ориентацию главных площадок.

9. Подсчитываем величины главных деформаций, используя соотношения (10).

10. Наибольшую деформацию считаем ε_1 , а меньшую – ε_2. Результаты заносим в строки 37 и 38.

11. Вычисляем главные напряжения σ_1 и σ_2, максимальные касательные напряжения τ_{max} и эквивалентное напряжение $\sigma_{экв}$ по формулам (13)…(16) и помещаем в строки 39…42.

12. Вычисляем теоретические нормальные напряжения по балочной теории, используя формулу $\sigma = \varphi \dfrac{M_x}{I_{rx}} y$.

12.1. В строку 45 вводим значение редукционного коэффициента, в зависимости от того, на какой материал наклеен тензорезистор (сталь или дюраль).

12.2. В строку 46 заносим плечо силы для вычисления изгибающего момента в трёх поперечных сечениях кессона (см. рис. 68).

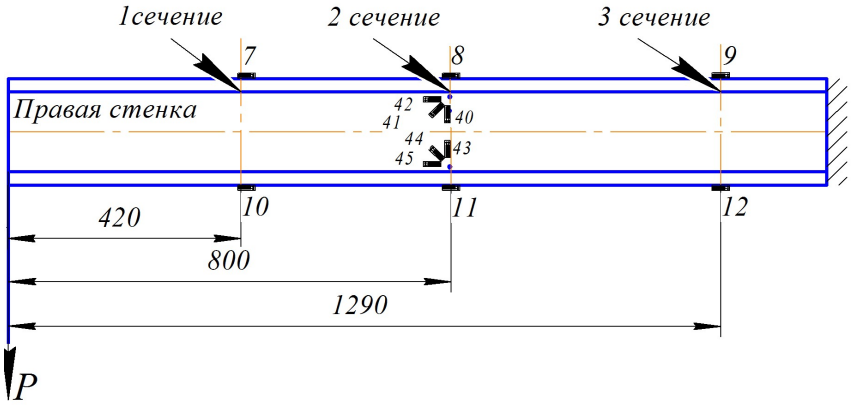


Рис. 68 – Схема изгиба кессона

12.3. В строке 47 вычисляем значения изгибающего момента в сечении, где наклеен тензорезистор.

12.4. В строку 48 вводим значение координаты y, определяющей удалённость тензодатчика от оси изгиба (см. рис. 66).

12.5. В строке 49 вычисляем теоретические значения нормальных напряжений в местах установки тензорезисторов.

13. Теоретические касательные напряжения в местах наклейки тензорезисторов определяем, используя балочную теорию, по формуле $\tau = \frac{1}{\delta}\left(\frac{Q_y}{I_{rx}} S_{rx} + \frac{M_z}{\Omega}\right)$. Условное размыкание сечения производим по оси симметрии *y* на пересечении её с верхней панелью.

При испытании кессона на изгиб с кручением (см. рис. 65, *б*) крутящий момент будет $M_z = P\frac{b}{2}$. При чистом изгибе кессона M_z отсутствует.

В силу симметрии поперечного сечения кессона эпюра статического момента S_{rx} будет симметрична относительно оси x и обратно симметрична относительно оси y. Поэтому достаточно определить S_{rx} для четвертинки сечения. Значения статического момента S_{rx} в местах установки тензорезисторов вычислим таблично.

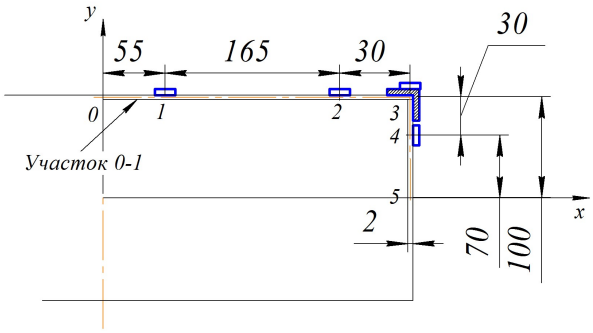


Рис. 69 – К расчёту эпюры статических моментов

Преобразуем формулу вычисления статического момента части сечения от точки размыкания контура до произвольной точки *s*

$$S_{rx} = \int_0^s y\varphi\delta ds + \sum_{i=1}^{k} y\varphi F_i = \int_0^{(1)} y\varphi\delta ds + \int_{(1)}^{(2)} y\varphi\delta ds + \int_{(2)}^{(3)} y\varphi\delta ds + y_i\varphi_i F_i + ... =$$

$$= \Delta S_{rx}^{0-1} + \Delta S_{rx}^{1-2} + \Delta S_{rx}^{2-3} + \Delta S_{rx}^{F} + ...$$

$$\textit{Здесь} \quad \Delta S_{rx}^{0-1} = \int_{(0)}^{(1)} y\varphi\delta ds - \textit{статический момент участка } 0-1.$$

Таблица 6 – Расчёт касательных напряжений

Участок	Длина	Толщина	F	φ	$F_г$	$y_{цт}$	ΔS_{rx}	S_{rx}	τ
	мм	мм	мм^2		мм^2	мм	мм^3	мм^3	МПа
0	0	0		0	0	0	0	0	0
0-1									
1-2									
2-3									
F	1	1							
3-4									
4-5									

Для расчёта статического момента и касательных напряжений по контуру сечения в точках установки тензорезисторов рекомендуется использовать табл. 6.

14. В строку 53 поместить результаты сравнения теории с экспериментом.

15. Выполнить анализ результатов и сделать выводы.

8.5. Контрольные вопросы

1. Какие гипотезы положены в основу балочной теории расчёта тонкостенных конструкций?
2. Каков порядок вычисления погонных касательных усилий в тонкостенной конструкции с однозамкнутым сечением?
3. В каких точках поперечного сечения кессона наиболее целесообразно располагать начало отсчёта дуг при вычислении касательных усилий?
4. Что такое приведённое сечение тонкостенной конструкции?
5. Какой физический смысл имеет величина S_{rx} ?
6. В каких силовых элементах (поясах, стрингерах, обшивке), согласно балочной теории, при кручении кессона напряжения не возникают?
7. Как измерить касательные напряжения при чистом сдвиге?
8. В каких местах кессона наблюдаются наибольшие расхождения теории и эксперимента? Почему?
9. В каких местах поперечного сечения кессона действуют наибольшие нормальные и касательные напряжения?
10. В каком из трёх сечений лучше всего балочная теория согласуется с экспериментом?
11. Что такое эквивалентные напряжения?
12. Какими компонентами характеризуется НДС на поверхности обшивки?
13. Как велико отклонение главных напряжений в эксперименте по сравнению с балочной теорией?
14. Почему в балочной теории оболочка считается бесконечно длинной?
15. Где лучше согласовываются результаты эксперимента с балочной теорией в растянутой или сжатой панелях?
16. Как велико влияние заделки на напряжённое состояние кессона?
17. Почему в заделке обшивка частично выключается из работы?
18. В чём причина отклонения от симметричности НДС кессона?
19. Почему в эксперименте используются трёхэлементные прямоугольные розетки, а не дельта-розетки?
20. Крутящий момент не вызывает в поясах нормальных напряжений. Подтвердил ли это эксперимент?
21. Сколько повторных измерений проводилось в эксперименте?
22. Как можно оценить стабильность работы измерительных каналов?
23. Зачем в эксперименте производится предварительное нагружение конструкции?
24. В каких точках поперечного сечения наблюдаются наибольшие нормальные и касательные напряжения?

9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ОБОЛОЧКИ

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости балочной теории для расчёта напряжённо-деформированного состояния подкреплённой цилиндрической оболочки.

9.1. Описание объекта исследования

Исследуемый объект (рис. 70 и 71) представляет собой дюралевую цилиндрическую оболочку *1*, толщиной $\delta = 0{,}15\ см$, подкреплённую равномерно расположенными шпангоутами *2* с диафрагмами *3* и четырьмя стальными поясами *4*. Каждый пояс площадью $F = 2{,}86\ см^2$ состоит из двух склёпанных между собой профилей уголкового типа (рис. 72). Длина оболочки $L = 150\ см$, диаметр $D = 30\ см$. Нагрузка на оболочку прикладывается через жёсткий диск *5* на конце.

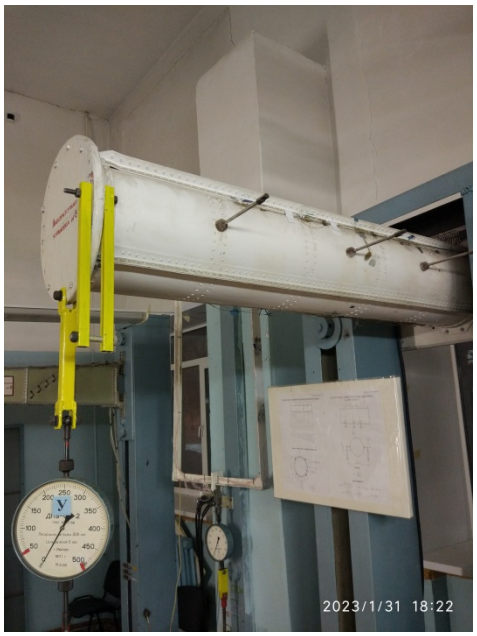


Рис. 70 – Общий вид установки

Материал обшивки имеет модуль упругости $E = 7 \cdot 10^4\ МПа$, модуль сдвига $G = 2{,}7 \cdot 10^4\ МПа$, коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$. Модуль упругости материала поясов $E = 2{,}05 \cdot 10^5\ МПа$.

Схема поперечного сечения оболочки показана на рис. 72. Сечение симметрично относительно осей *x* и *y*.

Испытательный стенд позволяет консольно закреплённую оболочку подвергать изгибу и изгибу с кручением (рис. 73).

9.2. Теоретические положения

Фюзеляж, крыло, оперение самолёта, корпус ракеты, как правило, имеют тонкую обшивку, подкреплённую продольным и поперечным силовыми наборами. Напряжённо-деформированное состояние (НДС) подобных конструкций, чаще всего, определяется по балочной теории расчёта тонкостенных конструкций.

Цилиндрическая оболочка лабораторной установки соответствует, в основном, условиям применения балочной теории:

- обшивка её достаточно тонкая;
- материалы, из которых изготовлена оболочка, подчиняются закону Гука по крайней мере при тех нагрузках, что прикладываются в ходе выполнения лабораторной работы;
- в продольном направлении геометрия поперечного сечения оболочки неизменна;
- форма поперечного сечения оболочки поддерживается довольно частыми поперечными диафрагмами;
- поперечные размеры силовых подкрепляющих элементов намного меньше габаритных размеров всего поперечного сечения оболочки.

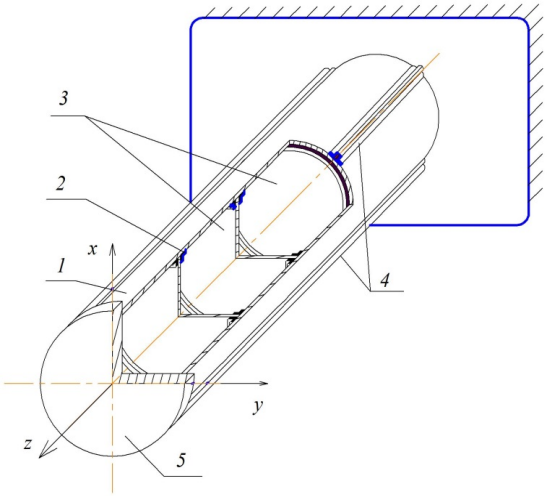


Рис. 71 – Схема оболочки

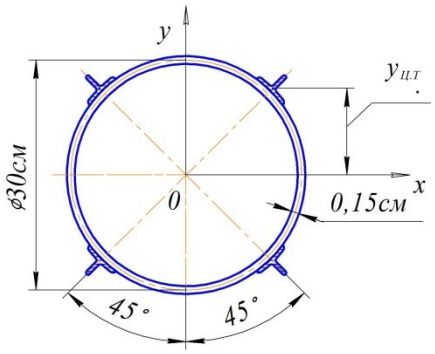


Рис. 72 – Схема поперечного сечения оболочки

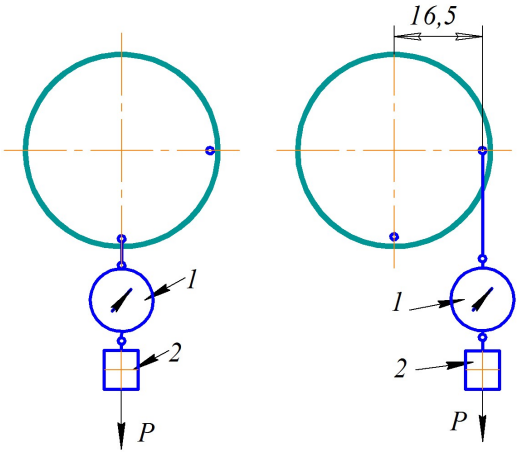


Рис. 73 – Схемы нагружения цилиндрической оболочки
Слева – изгиб; справа – изгиб с кручением. 1 – Пружинный динамометр, 2 – Тензодинамометр

Балочная теория предполагает расчёт бесконечно длинных оболочек. Однако исследуемая оболочка имеет конечную длину $l = 1,5\,м$. Это значит, что на концах оболочки должны возникнуть отклонения от балочной теории, обусловленные краевыми эффектами.

Действительно, на одном конце НДС оболочки будет зависеть от того, как к ней приложена нагрузка (в виде одной сосредоточенной силы или двух сил как в нашем случае или в виде погонной нагрузки и т. д.).

С другого конца НДС оболочки будет зависеть от характера прикрепления её к опоре.

В средней части оболочки, удалённой от концов, балочная теория должна давать хорошие результаты, в чем студенты должны убедиться, выполняя лабораторную работу.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния цилиндрической оболочки как тонкостенной конструкции с однозамкнутой формой поперечного сечения выполняется по формулам (51) и (52), приведенным в разделе /8.2/.

9.3. Экспериментальное измерение деформаций и расчёт напряжений

Деформации в кессоне измеряются фольговыми тензорезисторами производства фирмы ZEMIC. Тензорезисторы имеют измерительную базу $l = 6\,мм$, номинальное сопротивление $R = 120\,Ом$, коэффициент тензочувствительности $\kappa = 2{,}1$.

Напряжённо-деформированное состояние оболочки исследуется в четырёх поперечных сечениях.

Схема наклейки тензорезисторов приведена на развёртке оболочки (рис. 74).

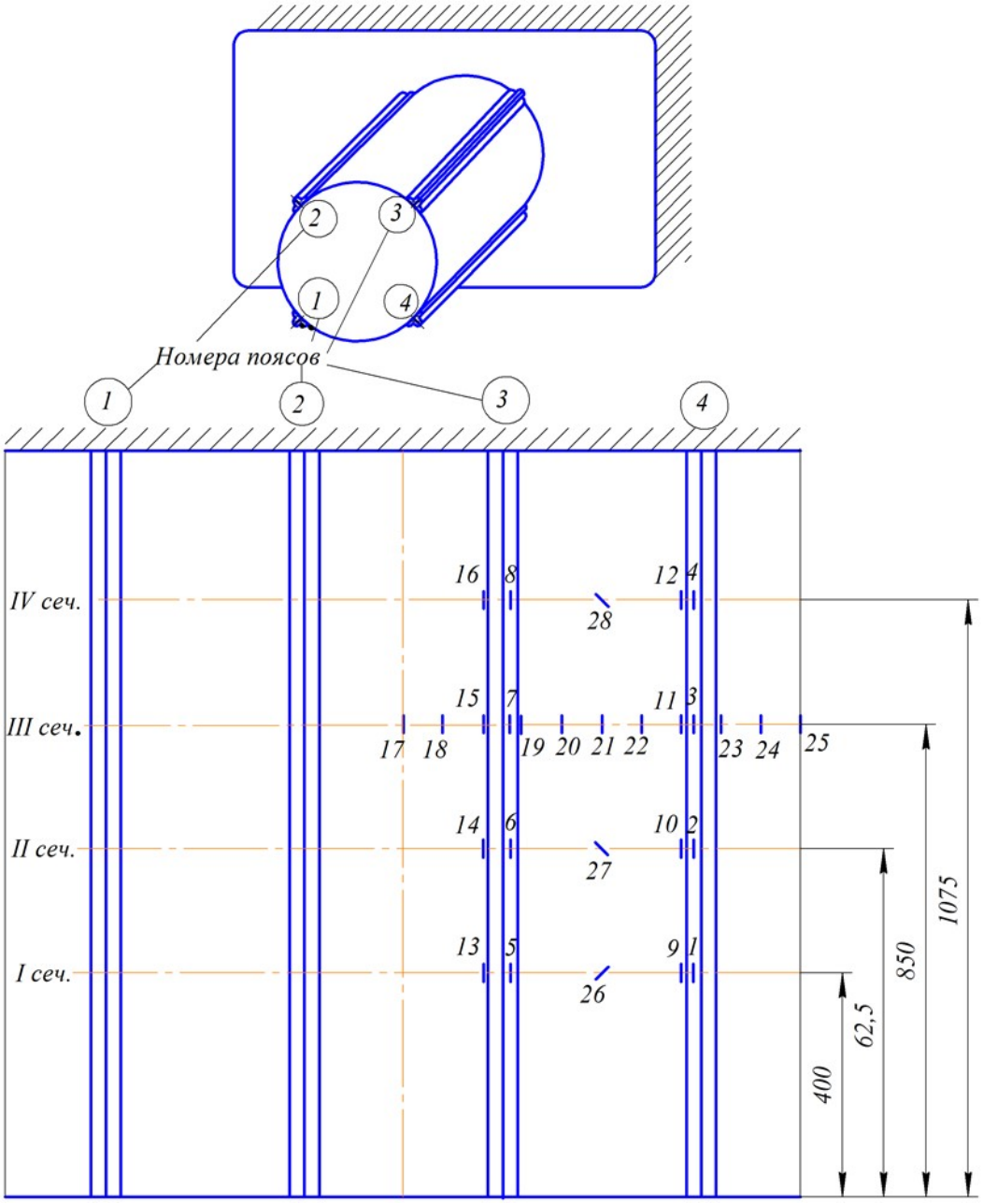


Рис.74 – Развёртка цилиндрической оболочки

Датчики № 1...8 наклеены на стальные пояса. Датчики № 9...16 – на оболочку вблизи поясов.

Датчики № 17…25 позволяют исследовать изменение нормальных напряжений в поперечном сечении оболочки (рис. 75). Три датчика № 26, 27 и 28 расположены на оси изгиба оболочки под углом 45° к её образующей, где обшивка работает на чистый сдвиг.

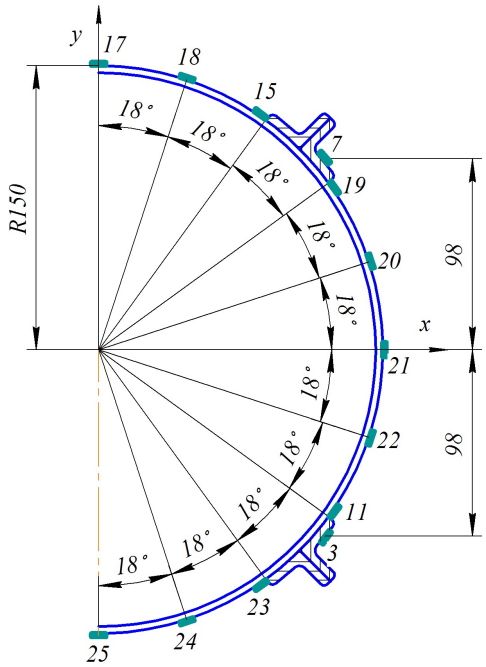
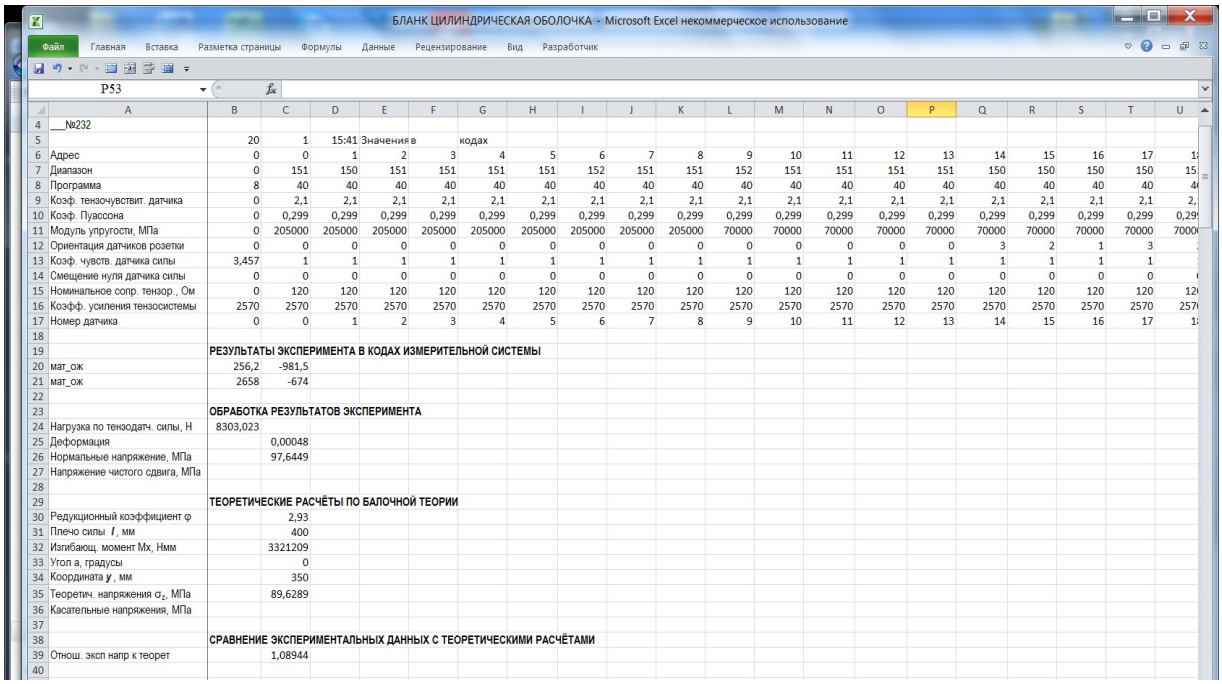


Рис. 75 – Схема расположения тензорезисторов по поперечному сечению оболочки

Показания тензорезисторов фиксируются микропроцессорной многоканальной тензометрической системой ММТС-64.01. Порядок выполнения эксперимента описан в разделе /3/.

Фрагмент электронного бланка эксперимента представлен на рис. 76.



БЛАНК ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА - Microsoft Excel некоммерческое использование

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
4	__№232																				
5		20	1	15:41	Значения в		кодах														
6	Адрес	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1
7	Диапазон	0	151	150	151	151	151	151	152	151	151	152	151	151	151	151	150	150	150	150	15
8	Программа	8	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	4
9	Коэф. тензочувствит. датчика	0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,
10	Коэф. Пуассона	0	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,29
11	Модуль упругости, МПа	0	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	205000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	7000
12	Ориентация датчиков розетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	3	
13	Коэф. чувств. датчика силы	3,457	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	Смещение нуля датчика силы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	Номинальное сопр. тензор., Ом	0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	12
16	Коэфф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	257
17	Номер датчика	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1
18																					
19		РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ																			
20	мат_ож	256,2	-981,5																		
21	мат_ож	2658	-674																		
22																					
23		ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА																			
24	Нагрузка по тензодатч. силы, Н	8303,023																			
25	Деформация		0,00048																		
26	Нормальные напряжение, МПа		97,6449																		
27	Напряжение чистого сдвига, МПа																				
28																					
29		ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПО БАЛОЧНОЙ ТЕОРИИ																			
30	Редукционный коэффициент φ		2,93																		
31	Плечо силы *l*, мм		400																		
32	Изгибающ. момент Мх, Нмм		3321209																		
33	Угол а, градусы		0																		
34	Координата *y*, мм		350																		
35	Теоретич. напряжения σ_z, МПа		89,6289																		
36	Касательные напряжения, МПа																				
37																					
38		СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ РАСЧЁТАМИ																			
39	Отнош. эксп напр к теорет		1,08944																		
40																					

Рис. 76 – Электронный бланк эксперимента

9.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов

1. Используя формулу (2) подсчитать нагрузку, действующую на оболочку. Результат поместить в ячейку B24 протокола эксперимента.

2. В строке 25 подсчитать деформации по всем тензорезисторам (кроме нулевого столбца), используя формулу (3).

3. Подсчитать по закону Гука напряжения в поясах и поместить в строку 26.

4. По показаниям датчиков № 9…25 вычислить нормальные напряжения в обшивке (строка 27).

5. По показаниям трёх датчиков № 26, 27 и 28 определить касательные напряжения на оси изгиба оболочки, используя формулы (5) или (6) и поместить в строку 28.

6. Вычислить теоретические нормальные напряжения по балочной теории, используя формулу $\sigma = \varphi \dfrac{M_x}{I_{rx}} y$.

6.1. В строку 31 вводим значение редукционного коэффициента, в зависимости от того, на какой материал наклеен тензорезистор (сталь или дюраль).

6.2. В строку 32 заносим плечо силы для вычисления изгибающего момента в поперечных сечениях оболочки (см. рис. 74).

6.3. В строке 33 вычисляем изгибающий момент.

6.4. В строку 34 вводим значения угла α, определяющего положение тензорезистора в окружном направлении (см. рис. 75).

6.5. В строке 35 рассчитываем значение координаты *y*, определяющей удалённость тензодатчика от оси изгиба (см. рис. 75).

6.6. Вычисляем момент инерции приведённого сечения и в строке 36 вычисляем теоретические значения нормальных напряжений в местах установки тензорезисторов.

7. Теоретические касательные напряжения, в соответствии с балочной теорией, определяем по формуле

$$\tau = \frac{1}{\delta}\left(\frac{Q_y}{I_{rx}} S_{rx} + \frac{M_z}{\Omega}\right).$$

7.1. Условное размыкание однозамкнутого контура производим по оси симметрии *y* в верхней точке оболочки.

7.2. Выводим формулу для вычисления статического момента как функцию угла α и вычисляем значения статического момента для точек, где наклеены тензорезисторы (см. рис. 75). Результаты помещаем в строку 37.

7.3. Вычисляем касательные напряжения в строке 38.

8. В строке 41 и ниже производится сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами по указанию преподавателя.

9. Анализ результатов и выводы.

Анализ результатов удобно производить по столбиковой гистограмме.

Вставка>Гистограмма.

9.5. Контрольные вопросы

1. Какие гипотезы положены в основу балочной теории расчёта тонкостенных конструкций?
2. Какой порядок вычисления погонных касательных усилий в тонкостенной конструкции с однозамкнутым сечением?
3. В каких точках поперечного сечения оболочки наиболее целесообразно располагать начало отсчёта дуг при вычислении касательных усилий?
4. Что такое приведённое сечение тонкостенной конструкции?

5. Какой физический смысл имеет величина S_{rx} ?
6. В каких силовых элементах (поясах, стрингерах, обшивке), согласно балочной теории, при кручении кессона нормальные напряжения не возникают?
7. Как измерить касательные напряжения при чистом сдвиге?
8. В каких местах оболочки наблюдаются наибольшие расхождения теории и эксперимента?
9. В каких местах поперечного сечения оболочки действуют наибольшие нормальные и касательные напряжения?
10. В каком из четырёх сечений лучше всего балочная теория согласуется с экспериментом?
11. Почему в балочной теории оболочка считается бесконечно длинной?
12. Где лучше согласовываются результаты эксперимента с балочной теорией: в растянутой или сжатой зонах?
13. Как велико влияние заделки на напряжённое состояние оболочки?
14. Почему в заделке обшивка частично выключается из работы?
15. Сколько повторных измерений проводилось в эксперименте?
16. Как можно оценить стабильность работы измерительных каналов?
17. Зачем в эксперименте производится предварительное нагружение конструкции?
18. Согласно балочной теории, какие тонкостенные конструкции не воспринимают крутящий момент?
19. Какие силовые элементы тонкостенной конструкции (пояса, стрингеры, обшивка) участвуют в работе как при изгибе, так и при кручении?
20. Что такое приведённое сечение тонкостенной конструкции?

10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО БАКА СО СФЕРИЧЕСКИМИ ДНИЩАМИ

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости безмоментной теории для расчёта напряжённо-деформированного состояния оболочки вращения в виде цилиндрического бака со сферическими днищами.

10.1. Объект исследования

Исследуемый бак (рис. 77) изготовлен из алюминиевого сплава АМГ-6, имеющем модуль упругости E=7,07·10^4 МПа, μ=0,319, $s_в = 360\ МПа$, $s_{0,2} = 165\ МПа$.

Рис. 77 – Лабораторная установка

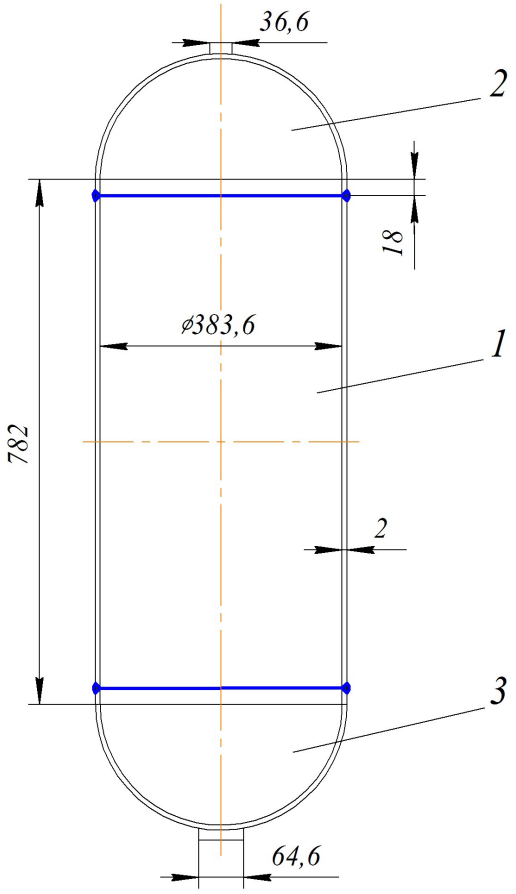


Рис. 78 – Схема бака

Бак состоит (рис. 78) из цилиндрической обечайки *1* и двух полусферических днищ *2* и *3*. При штамповке днищ кроме полусферы формировалась ещё часть цилиндрической обечайки длиною 18 мм. Поэтому сварные швы, соединяющие днища с обечайкой, получились смещёнными от сферы в сторону обечайки на 18 мм. В днища вварены жёсткие шайбы. Давление в бак подаётся через отверстие в нижней шайбе. Внутренность бака заполнена гидравлическим маслом. Отверстие в верхней шайбе используется для удаления воздуха из гидросистемы, так как по технике безопасности наличие воздуха в баке недопустимо.

Гидравлическая система является общей для двух лабораторных работ. Выбор испытываемого сосуда зависит от положения гидравлического переключателя: **«Цилиндрический бак»** или **«Торовый бак»**.

Давление в цилиндрическом баке создаётся ручным насосом *9* (рис. 79). При закрытом вентиле *8* трансформаторное масло из подпитывающего бачка *10* ручным насосом *9* подаётся в цилиндрический бак *1*, если переключатель *5* установлен в положение **«Цилиндрический бак»**.

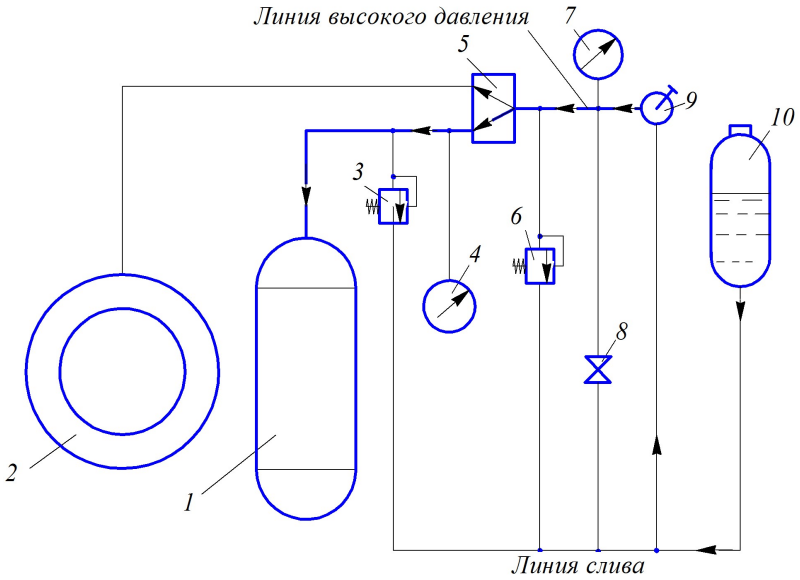


Рис. 79 – Гидравлическая схема лабораторных установок
1 – Цилиндрический бак, 2 – Торовый бак, 3 – Предохранительный клапан в линии цилиндрического бака, 4 – манометр измерения давления в цилиндрическом баке, 5 – Переключатель, 6 – Предохранительный клапан в линии торового бака, 7 – Манометр контроля давления в торовом баке, 8 – Кран сброса давления, 9 – Гидравлический насос с обратным клапаном, 10 – Подпитывающий бачок

Если при нагружении давление в баке *1* превысит допустимую величину, то произойдёт сброс избыточного давления через предохранительный клапан *3*. Для полного сбрасывания давления в баке необходимо открыть кран *8*. При этом масло, находящееся под давлением, через этот кран сбрасывается в линию слива и возвращается в подпитывающий бачок. Давление в цилиндрическом баке измеряется манометром *4*.

10.2. Теоретические положения

Для расчёта тонких оболочек ($R/\delta > 30$) обычно используется безмоментная теория, построенная на предположении, что напряжения распределяются равномерно по толщине оболочки. Как известно, эта теория даёт удовлетворительные результаты для тех частей оболочек, которые достаточно удалены от мест приложения сосредоточенных нагрузок, от мест резкого изменения геометрии срединной поверхности оболочки, от различного рода упругих или жёстких включений (например, фланцев, патрубков и т.д.), от зон сварных швов и т. п.

Если указанные выше условия не выполняются, то расчёты проводят по моментной теории [8], учитывающей изгиб оболочки и предполагающей, что изменение нормальных напряжений по толщине оболочки происходит по линейному закону.

10.3. Расчёт напряжений в баке по безмоментной теории

Согласно безмоментной теории меридиональные s_{xx} и окружные s_{jj} напряжения в оболочке вращения при осесимметричном нагружении определяются из двух уравнений:

уравнения Лапласа

$$\frac{s_{xx}}{R_1} + \frac{s_{jj}}{R_2} = \frac{P}{d} \qquad (53)$$

и уравнения равновесия зоны

$$s_{xx} = \frac{\Phi(q)}{2pR_2 d \sin^2 q} \ . \qquad (54)$$

Здесь

R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны срединной поверхности оболочки вращения;

d – толщина оболочки;

$\Phi(q)$ – результирующая внешней нагрузки, действующей на рассматриваемую часть (зону) оболочки;

q – угол между осью вращения оболочки и нормалью к меридиану в рассматриваемой точке.

Если оболочка вращения нагружена внутренним давлением и замкнута в вершине, то уравнение равновесия зоны принимает более простой вид:

$$s_{xx} = \frac{pR_2}{2d}. \qquad (55)$$

Подставляя (55) в (53) и учитывая, что в сферическом днище $R_1 = R_2 = R$ получаем для днища:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{PR}{2\delta} \cdot \qquad (56)$$

Для цилиндрической обечайки ($R_1 =$ Ґ , $R_2 = R$) расчётные формулы принимают вид

$$\sigma_{xx} = \frac{PR}{2\delta}, \quad \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{PR}{\delta}. \qquad (57)$$

В цилиндрической обечайке окружные напряжения s_{jj} в два раза больше меридиональных s_{xx} .

10.4. Расчёт напряжений в баке по моментной теории

Расчёты по моментной теории[7] намного сложнее, чем по безмоментной. Поэтому, опуская теоретические выкладки, приводим окончательные результаты в виде графиков. На рис. 80 и 81 приведено распределение меридиональных s_{xx} и окружных s_{jj} напряжений в точках наружной поверхности

Результаты получены без учёта влияния на напряжённое состояние сварного шва. Это влияние обычно распространяется на небольшую область по обе стороны от шва и сказывается в том, что в районе шва могут измениться механические характеристики материала свариваемых частей, возникнуть остаточные напряжения, величина которых зависит от скорости охлаждения оболочки после сварки. Кроме того, не зачищенный сварной шов, как утолщение, является концентратором напряжений.

10.5. Экспериментальное определение деформаций и напряжений

На бак (рис. 82) наклеено 30 двухэлементных прямоугольных тензорозеток[8].

Использованы фольговые константановые тензорезисторы фирмы ZEMIC типа BE120-4CA(11) с номинальным сопротивлением 120 Ом, базой 4 мм и коэффициентом тензочувствительности к=2,18.

---

[7] Расчёты по моментной теории выполнил доцент Ахмедьянов И. С.

[8] Согласно ГОСТ 26158-84 «Сосуды и аппараты из цветных металлов. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования» допускаемые напряжения для сосудов из алюминиевого сплава АМг-6 не должны превышать 74 МПа.

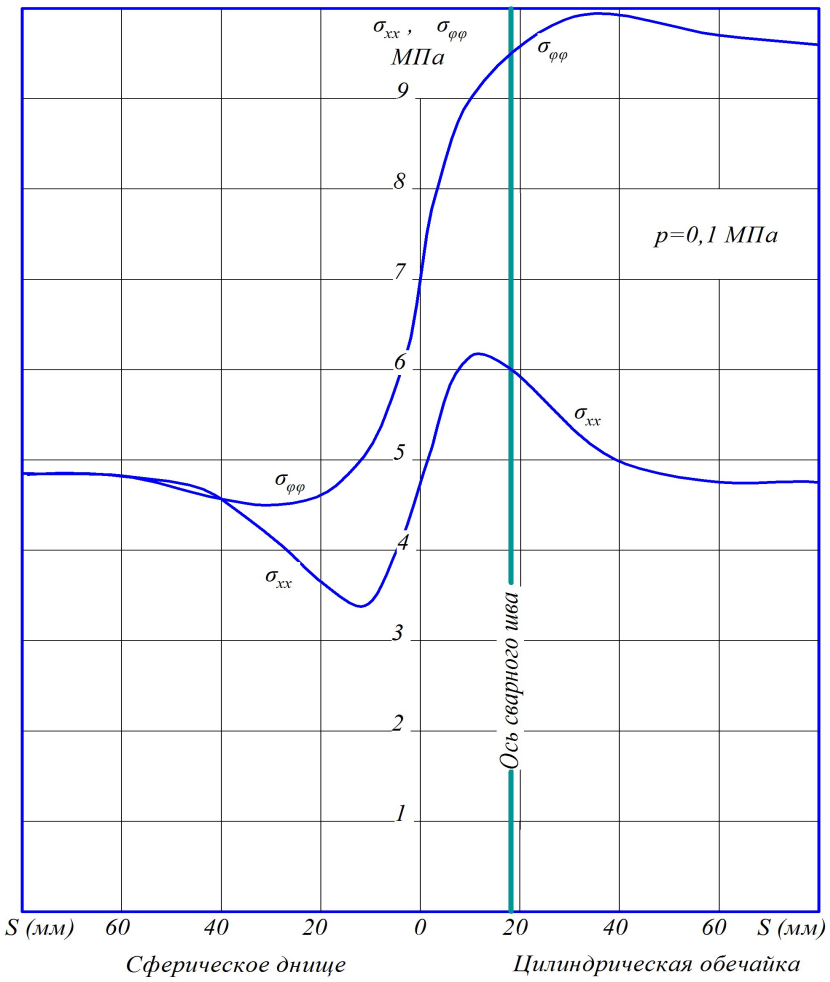


Рис. 80 – Изменение меридиональных σ_{xx} и окружных $\sigma_{\varphi\varphi}$ напряжений от места сопряжения сферического днища и цилиндрической оболочки по моментной теории

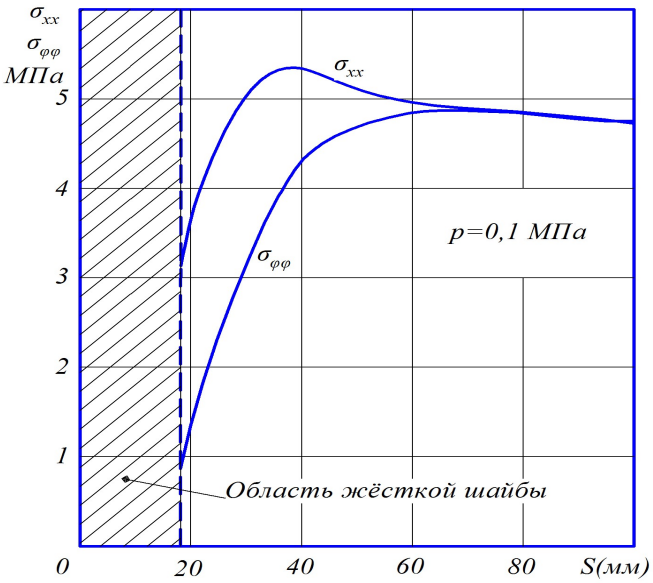


Рис. 81 – Распределение напряжений у жёсткой шайбы по наружной поверхности верхнего днища, рассчитанное по моментной теории

Поскольку меридиональные и окружные напряжения не зависят от окружной угловой координаты, тензорозетки произвольно разбросаны в окружном направлении для удобства монтажа соединительных проводов (рис. 83).

Тензорезисторам, ориентированным в меридиональном направлении, присвоены нечётные номера, а ориентированным в окружном направлении – чётные номера (рис. 84).

Расположение тензорозеток по меридиану оболочки показано на рис. 85 и 86.

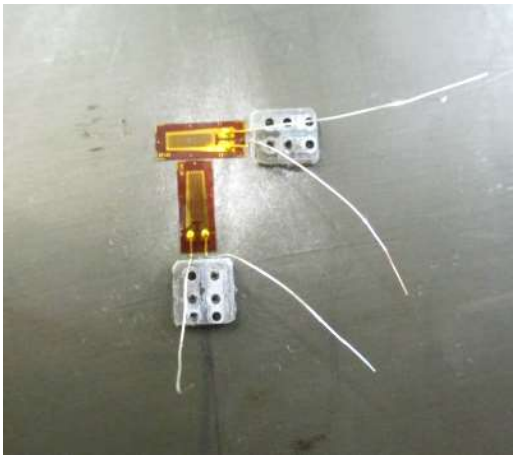


Рис. 82– Двухэлементная тензорозетка с колодками для припайки выводных проводников

Рис. 83 – Расположение тензорезисторов в зоне сварного шва

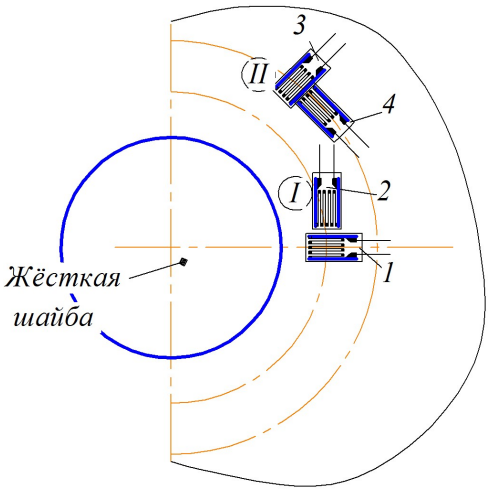


Рис. 84 – Нумерация датчиков в тензорозетке

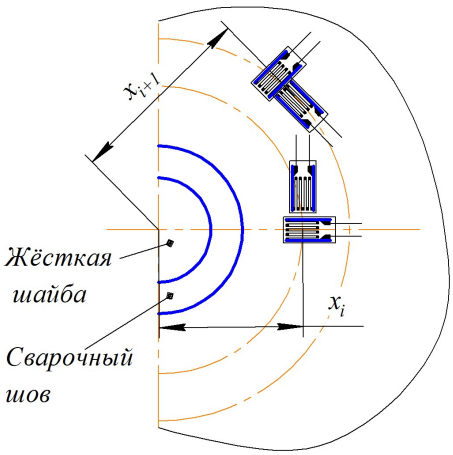


Рис. 85 – Схема задания положения тензорозетки по меридиану

10.6. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов

Измерения с использованием системы ММТС 64.01 производятся под руководством преподавателя или инженера кафедры в порядке, описанном в разделе /3/.

Фрагмент бланка протокола эксперимента показан на рис. 87. Столбцы, относящиеся к отдельным тензорозеткам, выделены цветовыми полосами.

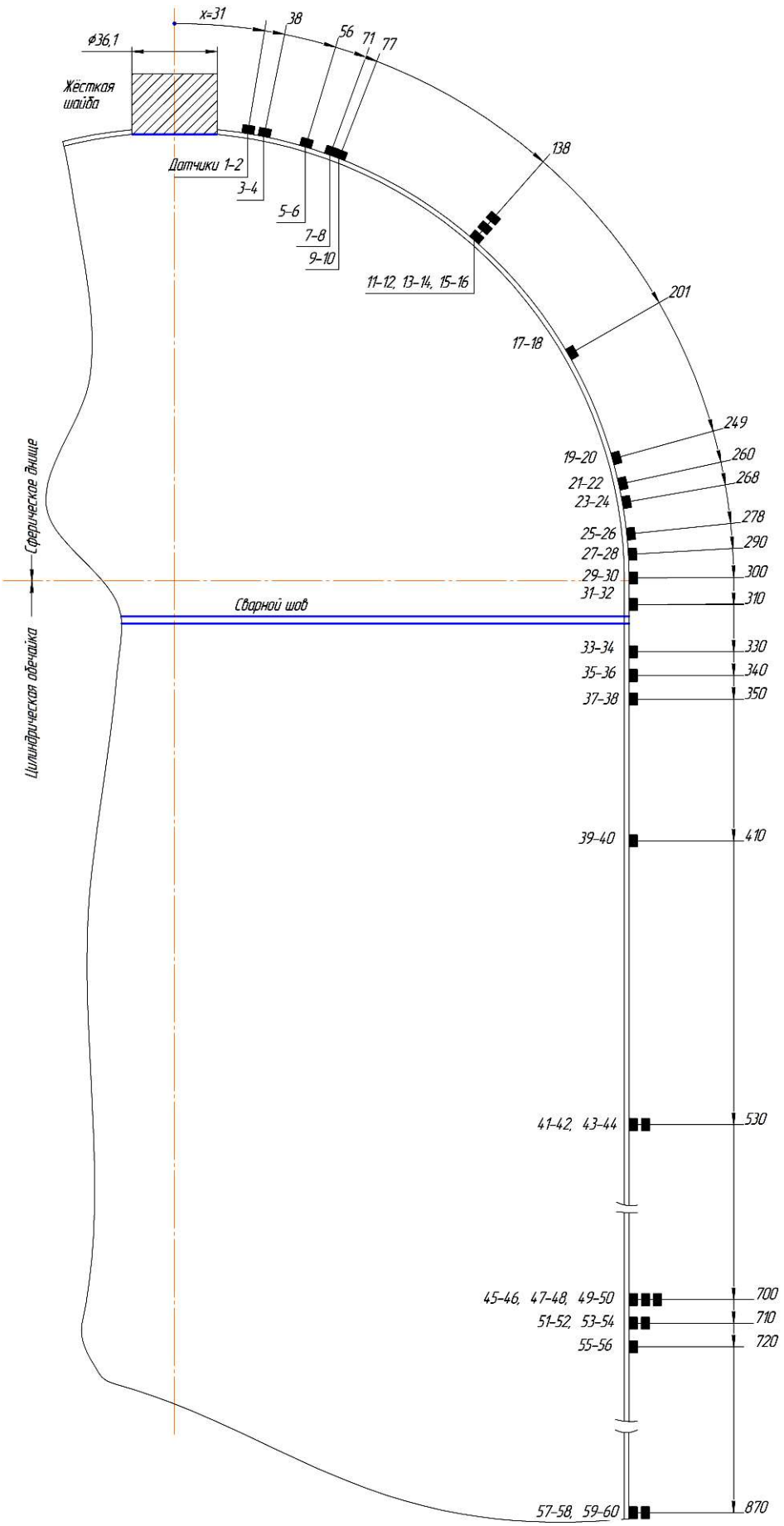


Рис. 86 – Схема расположение тензодатчиков на баке

Последовательность выполнения расчётов следующая:

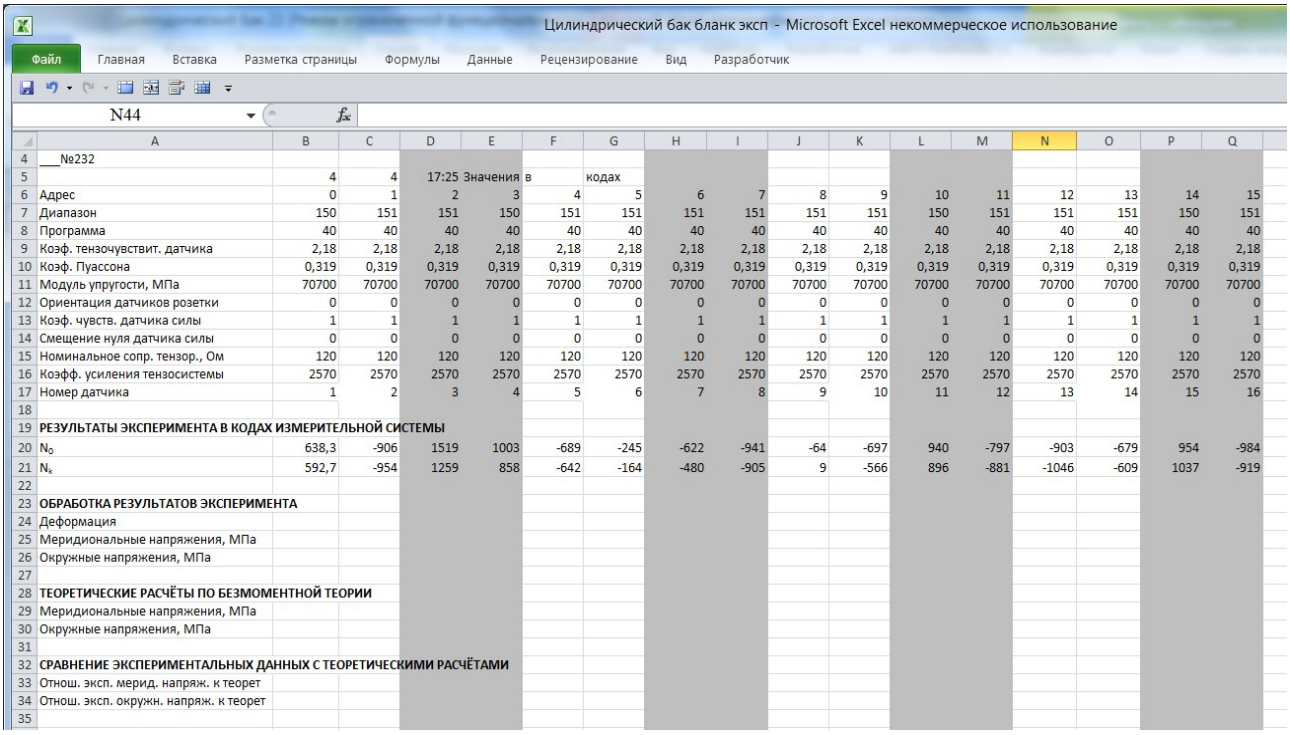
1. В строке 24 подсчитать деформации по всем тензорезисторам, используя формулу (3).
2. Определить экспериментальные значения меридиональных и окружных напряжений в днище и цилиндрической обечайке по формулам (7) в строках 25 и 26 соответственно.
3. Подсчитать теоретические значения меридиональных и окружных напряжений в днище и цилиндрической обечайке по формулам (56) и (57) в строках 29 и 30 соответственно.
4. В строках 33 и 34 найти отношение экспериментальных напряжений к напряжениям, вычисленным по безмоментной теории.
5. Соответствие теории и эксперимента удобно анализировать по столбиковой гистограмме **Вставка>Гистограмма>Двух столбиковая гистограмма.**

Теоретические расчёты по безмоментной и моментной теориям предполагают идеальную форму бака. В таком случае эксперимент должен дать линейную зависимость между давлением и деформацией, измеряемой тензорезистором.

На самом деле бак, особенно если он тонкостенный, может иметь незаметные на глаз несовершенства в виде вмятин, выпуклостей, погибей и т. д. При подаче внутреннего давления они распрямляются и форма бака стремится к идеальной. Распрямление сопровождается появлением на поверхности оболочки дополнительных деформаций изгиба, которые «чувствуют» тензорезисторы.

Если оболочка имеет вогнутость, то при её выпрямлении на поверхности появятся дополнительные деформации растяжения. Наоборот, выпуклость приведёт к появлению деформаций сжатия. Не учитывая эти процессы можно прийти к ложному выводу, что безмоментная теория даёт большие погрешности.

Максимальное напряжение в испытываемой оболочке, а она изготовлена из сплава АМГ-6, согласно требованиям ГОСТа 26158-84, не должно превышать 74 МПа. Это напряжение меньше предела пропорциональности алюминиевого сплава АМГ-6.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
4	___№232																
5		4	4	17:25 Значения в			кодах										
6	Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	Диапазон	150	151	151	150	151	151	151	151	151	151	150	151	151	151	150	151
8	Программа	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
9	Коэф. тензочувствит. датчика	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
10	Коэф. Пуассона	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319
11	Модуль упругости, МПа	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700
12	Ориентация датчиков розетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Коэф. чувств. датчика силы	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Смещение нуля датчика силы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Номинальное сопр. тензор., Ом	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
16	Коэфф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570
17	Номер датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
18																	
19	**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**																
20	N_0	638,3	-906	1519	1003	-689	-245	-622	-941	-64	-697	940	-797	-903	-679	954	-984
21	$N_к$	592,7	-954	1259	858	-642	-164	-480	-905	9	-566	896	-881	-1046	-609	1037	-919
22																	
23	**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**																
24	Деформация																
25	Меридиональные напряжения, МПа																
26	Окружные напряжения, МПа																
27																	
28	**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПО БЕЗМОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ**																
29	Меридиональные напряжения, МПа																
30	Окружные напряжения, МПа																
31																	
32	**СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ РАСЧЁТАМИ**																
33	Отнош. эксп. мерид. напряж. к теорет																
34	Отнош. эксп. окружн. напряж. к теорет																
35																	

Рис. 87 – Фрагмент электронного бланка эксперимента

10.7. Исследование линейности показаний тензорезисторов от давления

Необходимо снять показания тензорезисторов при отсутствии внутреннего давления и при ступенчатом его увеличении по 0,1 МПа до максимального уровня 0,6 МПа.

От показаний тензосистемы в кодах перейти к деформациям по формуле (3).

Построить графики зависимости деформаций от давления для проблемных точек.

Выделить соответствующие столбцы давления и деформации.

Вставка>Точечная>Выбрать соединение точек линиями.

10.8. Контрольные вопросы

1. Какие допущения и гипотезы положены в основу безмоментной теории?
2. В чем основное отличие моментной теории от безмоментной?
3. В каких зонах бака применим расчёт по безмоментной теории? Подтвердилось ли это экспериментом и расчётами по моментной теории?
4. Как определить меридиональные и окружные напряжения в исследуемом баке по безмоментной теории? Какие уравнения для этого используются? Как они называются?
5. Если предположить, что верна безмоментная теория, то в каком месте следует ожидать разрушения бака от внутреннего давления, и в каком направлении произойдёт разрыв: в окружном или меридиональном?
6. Согласно безмоментной теории в цилиндрической обечайке окружные напряжения в два раза больше меридиональных, а каково при этом соотношение между окружными и меридиональными деформациями? Воспользуйтесь законом Гука для двухосного напряжённого состояния: $e_{xx} = \frac{1}{E}\left(s_{xx} - ms_{jj}\right)$, $e_{jj} = \frac{1}{E}\left(s_{jj} - ms_{xx}\right)$. Принять $m = 0,3$.
7. Как путём тензометрических измерений выявить наличие местных вмятин или выпуклостей в баке?
8. Подтверждаются ли экспериментально зоны распространения моментного состояния оболочки с результатами теоретических расчётов?
9. В теоретических расчётах толщина днища принимается равной 2 мм. При этом не учитывается утонение днища при штамповке. По результатам выполненного эксперимента можно сделать заключение, что произошло утонение днища?
10. Согласно ГОСТ 21631-76 алюминиевый лист номинальной толщины 2 мм может быть изготовлен с максимальным отрицательным допуском 0,28 мм. Укладываются ли экспериментальные напряжения в тот диапазон разброса напряжений, который может быть вызван неточностью изготовления листа?
11. Почему гидростатическое давление в баке не учитывается в теоретическом расчёте?
12. Почему показания некоторых тензорезисторов изменяются нелинейно с изменением давления в баке, особенно на малых уровнях давления?
13. В чем смысл принципа независимого действия сил, где он используется в лабораторной работе и при каких условиях он справедлив?
14. По паспортным данным манометр имеет относительную погрешность один процент от максимально измеряемого давления. Какова абсолютная погрешность задания в лабораторной работе предварительного давления p_0, конечного давления p_i, приращения давления $\Delta p = p_i - p_0$?
15. Какое минимальное значение деформации и напряжения может зарегистрировать ММТС-64?
16. Что такое коэффициент тензочувствительности тензорезистора?
17. Если увеличить предварительную и окончательную нагрузки на одинаковую величину, то повлияет ли это на результаты эксперимента и на результаты теоретического расчёта?

18. Если заданный преподавателем уровень давления случайно был превышен, то как можно исправить ситуацию: потихоньку снизить давление до заданного уровня или разгрузить конструкцию ниже заданного давления, а затем, догружая её, выйти на заданный уровень?
19. Почему в инструкции к лабораторной работе меридиональные и окружные напряжения обозначены через σ_{xx} и $\sigma_{\varphi\varphi}$, а не через σ_1 и σ_2, как это принято в безмоментной теории?
20. При каком отношении R/d можно практически использовать безмоментную теорию?
21. Какие элементы содержит гидравлическая система лабораторной установки и каково их назначение?
22. Как работает гидравлическая система лабораторной установки?
23. Для измерения напряжённо-деформированного состояния на поверхности конструкций обычно используются трёхэлементные тензорозетки. Почему в настоящей работе используются двухэлементные розетки?
24. Почему по технике безопасности при испытании сосудов на внутреннее давление не допускается наличие в них воздуха? Какой элемент гидравлической системы лабораторной работы позволяет обеспечить это условие?
25. Цилиндрический бак изготовлен из алюминиевого сплава АМг-6. Каковы механические характеристики этого сплава? При проведении испытаний возникающие в баке напряжения были ниже предела текучести сплава АМг-6? Почему бак нельзя изготовить из более высокопрочного алюминиевого сплава Д16АТ?
26. Почему нельзя проводить испытания бака сжатым воздухом?
27. Сколько повторных измерений проводилось на каждом уровне нагрузки? Как влияет количество повторных экспериментов на точность определения среднего значения?
28. При обработке показаний тензорозеток используется блочное копирование вычислений. Как оно выполняется в EXCEL?
29. По протоколу эксперимента оцените скорость измерений системы ММТС-64.
30. На каком расстоянии от жёсткой шайбы наблюдается безмоментное состояние оболочки?

11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРОВОГО БАКА

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости безмоментной теории для расчёта напряжённо-деформированного состояния оболочки вращения в виде торового бака.

11.1.Объект исследования

Исследуемый бак (рис. 88) изготовлен из нержавеющей аустенитной стали IXI8H9T с модулем упругости $E = 1{,}88*10^5$ *МПа*, коэффициентом Пуассона $\mu = 0{,}275$, $\sigma_{0,2} = 216\,МПа$, $\sigma_в = 530\,МПа$.

Рис. 88 – Внешний вид торового бака

Давление в бак подаётся через штуцер, расположенный в верхней точке бака. Через этот штуцер удаляется воздух из гидросистемы, так как по технике безопасности наличие воздуха в баке недопустимо. Внутренность бака заполнена трансформаторным маслом.

Рис. 89 – Геометрические размеры торового бака

Гидравлическая система (рис. 79) является общей для двух лабораторных работ. Выбор испытываемого сосуда зависит от положения гидравлического переключателя: **«Торовый бак»** или **«Цилиндрический бак»**.

Давление в торовом баке создаётся ручным насосом 9. При закрытом вентиле 8 трансформаторное масло из подпитывающего бачка 10 ручным насосом 9 с имеющемся в нём обратным клапаном подаётся в торовый бак 2, если переключатель 5 установлен в положение **«Торовый бак»**.

Если при нагружении давление в баке 2 превысит допустимую величину, то произойдёт сброс избыточного давления через предохранительный клапан 6. Для полного сбрасывания давления в баке необходимо открыть кран 8. При этом масло, находящееся под давлением, через этот кран сбрасывается в линию слива и возвращается в подпитывающий бачок. Давление в торовом баке измеряется манометром 7.

11.2. Теоретические положения

Для расчёта тонких оболочек ($R/\delta > 30$) обычно используется безмоментная теория, построенная на предположении, что напряжения распределяются равномерно по толщине оболочки. Как известно, эта теория даёт удовлетворительные результаты для тех частей оболочек, которые достаточно удалены от мест приложения сосредоточенных нагрузок, от мест резкого изменения геометрии срединной поверхности оболочки, от различного рода упругих или жёстких включений (например, фланцев, патрубков и т.д.), от зон сварных швов и т.п.

Если указанные выше условия не выполняются, то расчёты проводят по моментной теории [8], учитывающей изгиб оболочки и предполагающей, что изменение нормальных напряжений по толщине оболочки происходит по линейному закону.

Используя уравнения (53) и (54) безмоментной теории можно получить [8] формулы для определения меридиональных σ_1 и окружных σ_2 напряжений в торовом баке

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2\delta}(1+\frac{r_0}{r}), \quad \sigma_2 = \frac{pR}{2\delta}. \tag{58}$$

Окружные напряжения в торе, согласно безмоментной теории, постоянны.

11.3.Экспериментальное определение деформаций и напряжений

Для измерения меридиональных ε_1 и окружных ε_2 деформаций в соответствующих направлениях на наружную поверхность бака наклеены тензорезисторы, образующие двухэлементные фольговые тензорозетки (рис. 90)

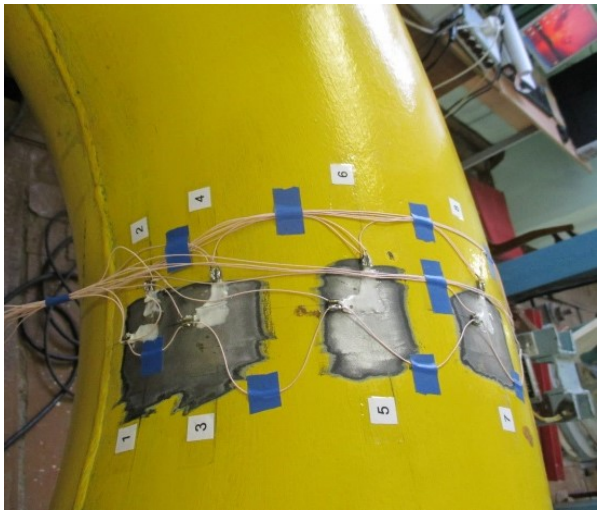


Рис. 90 – Расположение тензорезисторов на баке

Использованы фольговые константановые тензорезисторы фирмы ZEMIC типа BE120-4CA(11) с номинальным сопротивлением 120 Ом, базой 4 мм и коэффициентом тензочувствительности к=2,18. На бак (рис. 91) наклеено 7 тензорозеток (14 тензорезисторов).

Тензорезисторам, ориентированным в меридиональном направлении, присвоены **чётные** номера, а ориентированным в окружном направлении – **нечётные** номера.

В качестве регистрирующего устройства используется 64-канальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС 64.01. Результаты измерения через хост-контроллер автоматически заносятся в ЭВМ.

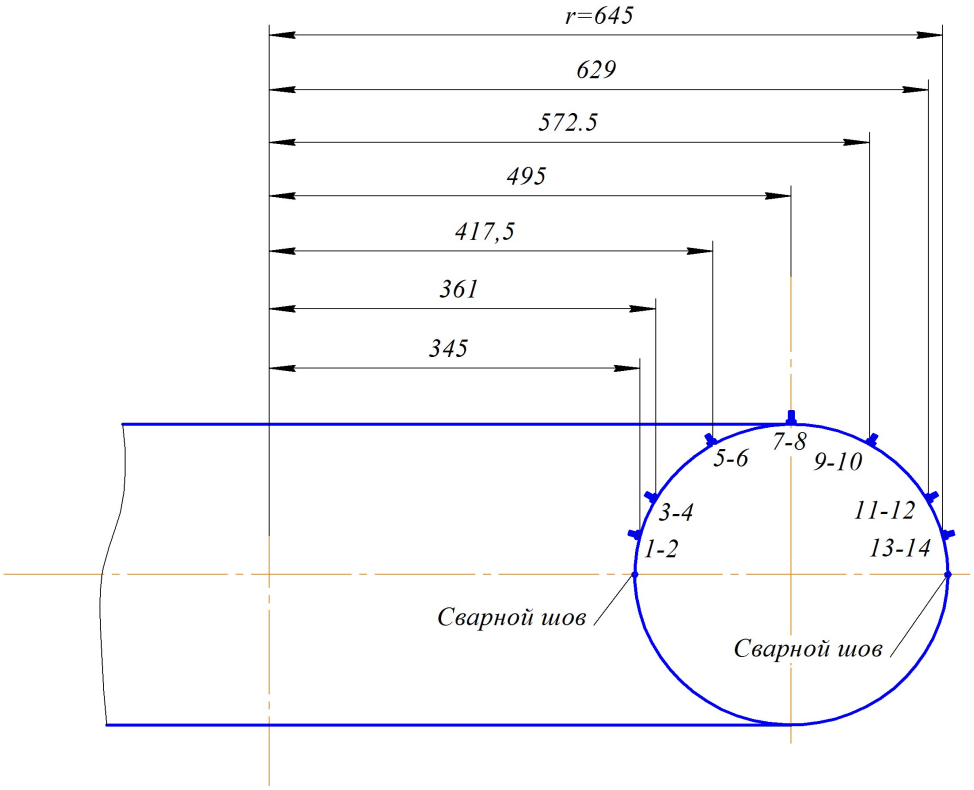
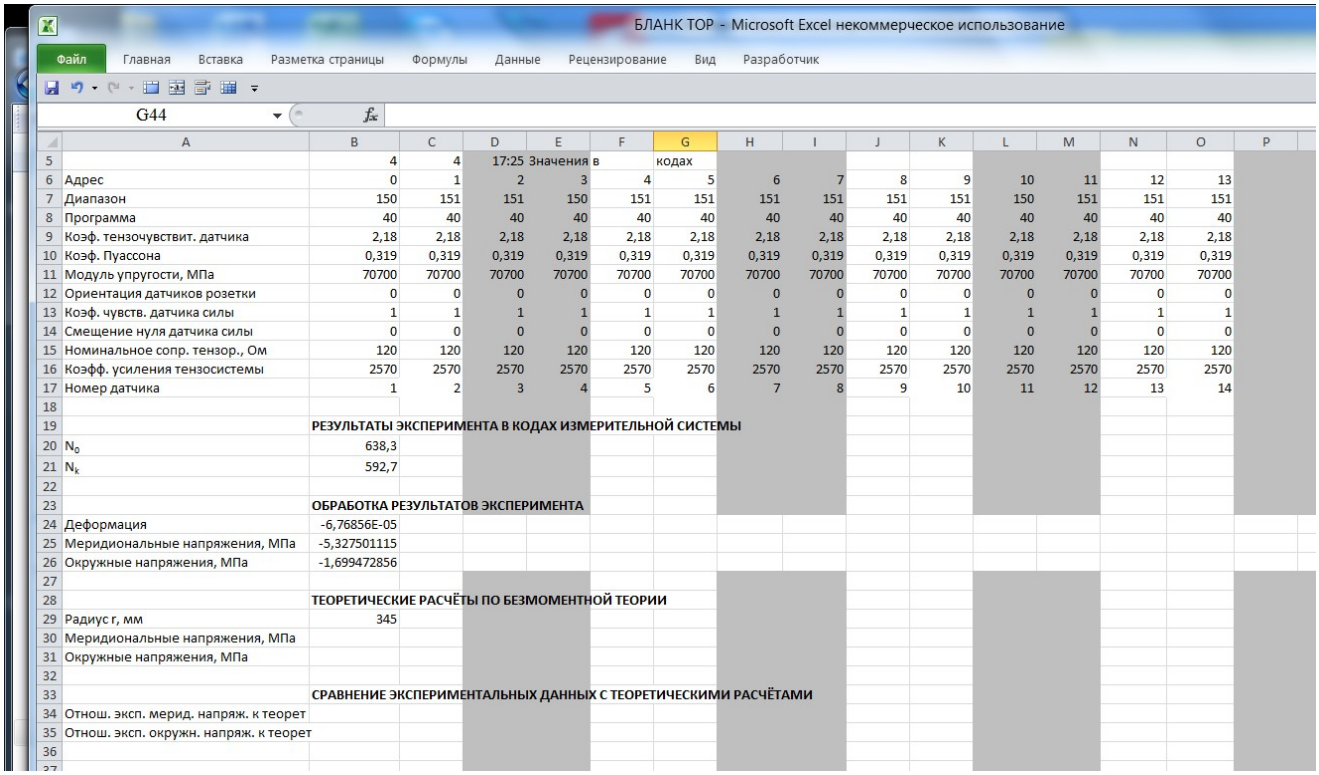


Рис. 91 – Схема расположения тензодатчиков на баке

11.4. Порядок обработки результатов измерений и выполнения теоретических расчётов

Измерения с использованием системы ММТС 64.01 производятся под руководством преподавателя или инженера кафедры в порядке, описанном в разделе /3/.



БЛАНК ТОР - Microsoft Excel некоммерческое использование

Файл | Главная | Вставка | Разметка страницы | Формулы | Данные | Рецензирование | Вид | Разработчик

G44

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
5		4	4	17:25 Значения в			кодах									
6	Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
7	Диапазон	150	151	151	150	151	151	151	151	151	151	150	151	151	151	
8	Программа	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
9	Коэф. тензочувствит. датчика	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	
10	Коэф. Пуассона	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319	
11	Модуль упругости, МПа	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	70700	
12	Ориентация датчиков розетки	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	Коэф. чувств. датчика силы	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	Смещение нуля датчика силы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	Номинальное сопр. тензор., Ом	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	
16	Коэфф. усиления тензосистемы	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	2570	
17	Номер датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
18																
19		РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В КОДАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ														
20	N_0	638,3														
21	N_k	592,7														
22																
23		ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА														
24	Деформация	-6,76856E-05														
25	Меридиональные напряжения, МПа	-5,327501115														
26	Окружные напряжения, МПа	-1,699472856														
27																
28		ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПО БЕЗМОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ														
29	Радиус r, мм	345														
30	Меридиональные напряжения, МПа															
31	Окружные напряжения, МПа															
32																
33		СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ РАСЧЁТАМИ														
34	Отнош. эксп. мерид. напряж. к теорет															
35	Отнош. эксп. окружн. напряж. к теорет															
36																

Рис. 92 – Электронный бланк эксперимента

Электронный бланк эксперимента показан на рис. 92. Столбцы, относящиеся к отдельным тензорозеткам, выделены цветовыми полосами.

Последовательность выполнения расчётов следующая:

1. В строке 24 подсчитать деформации по всем тензорезисторам, используя формулу (3).
2. Вычислить экспериментальные значения меридиональных и окружных напряжений по формулам (7) в строках 25 и 26 соответственно.
3. Ввести радиус, определяющий положение тензорозетки на баке (см. рис. 91).
4. Подсчитать теоретические значения меридиональных и окружных напряжений по формулам (58) в строках 30 и 31 соответственно.
5. В строках 34 и 35 найти отношение экспериментальных напряжений к напряжениям, вычисленным по безмоментной теории.
6. Соответствие теории и эксперимента удобно анализировать по столбиковой гистограмме **Вставка>Гистограмма>Двух столбиковая гистограмма.**

11.5. Контрольные вопросы

1. Какие допущения и гипотезы положены в основу безмоментной теории?
2. В каких зонах бака применим расчёт по безмоментной теории согласно эксперименту?
3. Как определить меридиональные и окружные напряжения в исследуемом баке по безмоментной теории? Какие уравнения для этого используются? Как они называются?
4. Если предположить, что верна безмоментная теория, то, в каком месте следует ожидать разрушения бака от внутреннего давления, и в каком направлении произойдёт разрыв: в окружном или меридиональном?
5. В теоретических расчётах толщина стенки бака принимается равной 4 мм. При этом не учитывается утонение днища при штамповке. По результатам выполненного эксперимента можно сделать заключение, что произошло утонение днища?
6. Распространяется ли влияние сварного шва на НДС в точках установки тензорозеток, ближайших к шву?
7. Согласно ГОСТ 19903-74 стальной лист номинальной толщины 4 мм при повышенной точности прокатки изготавливается с допусками: ***+0,10 мм и -0,40 мм.***. Укладываются ли экспериментальные напряжения в тот диапазон разброса напряжений, который может быть вызван допусками изготовления листа?
8. Почему гидростатическое давление в баке не учитывается в теоретическом расчёте?
9. В чем смысл принципа независимого действия сил, где он используется в лабораторной работе и при каких условиях он справедлив?
10. По паспортным данным манометр имеет относительную погрешность один процент от максимально измеряемого давления. Какова абсолютная погрешность задания в лабораторной работе предварительного давления p_0 , конечного давления p_i , приращения давления $\Delta p = p_i - p_0$?
11. Какое минимальное значение деформации и напряжения может зарегистрировать ММТС-64?
12. Что такое коэффициент тензочувствительности тензорезистора?
13. Если увеличить предварительную и окончательную нагрузки на одинаковую величину, то повлияет ли это на результаты эксперимента и на результаты теоретического расчёта?
14. При каком отношении R/δ можно практически использовать безмоментную теорию?

15. Какие элементы содержит гидравлическая система лабораторной установки и каково их назначение?
16. Как работает гидравлическая система лабораторной установки?
17. Для измерения напряжённо-деформированного состояния на поверхности конструкций обычно используются трёх элементные тензорозетки. Почему в настоящей работе используются двух элементные розетки?
18. Почему по технике безопасности при испытании сосудов на внутреннее давление не допускается наличие в них воздуха? Какой элемент гидравлической системы лабораторной работы позволяет обеспечить это условие?
19. Торовый бак изготовлен из нержавеющей стали 1Х18Н9Т. Каковы механические характеристики этой стали? При проведении испытаний возникающие в баке напряжения были ниже предела текучести стали?
20. Почему нельзя проводить испытания бака сжатым воздухом?
21. Сколько повторных измерений проводилось на каждом уровне нагрузки? Как влияет количество повторных экспериментов на точность определения среднего значения?
22. При обработке показаний тензорозеток используется блочное копирование вычислений. Как оно выполняется в EXCEL?
23. По протоколу эксперимента оцените скорость измерений системы ММТС-64.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст] / Д. Химмельблау. – М.: «Мир», 1973. – 957 с.
2. Палий, И.А. Прикладная статистика [Текст]: учебное пособие для вузов / И.А. Палий. – М.: Высшая школа, 2004. – 176 с.
3. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст]: учебник / В. И. Феодосьев.– М.: Наука, 1970. – 544 с.
4. Рабинович, И. М. Основы строительной механики стержневых систем [Текст] : учебник / И. М. Рабинович. – М.: Госстойиздат, 1960. – 518 с.
5. Дарков, А.В. Строительная механика [Текст]: учебник для вузов / А. В. Дарков и другие. – М.: Высш. школа, 1976. – 600 с.
6. Смирнов, В.А. Строительная механика [Текст]: учебник для вузов / В.А. Смирнов, С.А. Иванов, М. А. Тихонов. – М.: Стройиздат, 1984. – 208 с.
7. Бояршинов, С.В. Основы строительной механики машин [Текст]: учебник / С.В. Бояршинов. – М.: Машиностроение. – 1973. – 456 с.
8. Основы расчёта упругих оболочек: учебное пособие [Текст] / сост. Н. В. Колкунов. – М.: Высшая школа, 1963. 279 с.
9. Хазанов, Х.С. Алгоритм выбора метода исследования геометрической неизменяемости и определения усилий в стержнях фермы [Текст]: методические указания / Х.С. Хазанов. – Куйбышев: типография им. В. П. Мяги, 1984. – 32 с.
10. Ахмедьянов, И.С. Расчет шпангоутов [Текст] : учебное пособие / И.С. Ахмедьянов. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 76 с.
11. Зацепина, М.В. Балочная теория расчета тонкостенных конструкций [Текст] : учебное пособие; 3-е изд., переработанное / М. В. Зацепина. – Самара: СГАУ, 2012. – 48 с.
12. Экспериментальная механика. В двух книгах. Книга 1. Пер. с англ. / под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
13. Мехеда, В. А. Тензометрический метод измерения деформаций [Текст] : учеб. пособие / В. А. Мехеда. – Самара: СГАУ, 2011. – 54 с.
14. Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01. Руководство по эксплуатации РЭ-02/2062-01.01 [Текст] – Новосибирск : ФГУП «Сибирский НИИ авиации им. С. А. Чаплыгина, 2013. – 66 с.

Учебное издание

**ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ.
ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ.
ТЕОРИЯ И ЗАДАЧИ**

Практикум

Составитель
Мехеда Виллий Андреевич

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 25.05.2023. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печ. л. 9,5.
Тираж 50 экз. Заказ .

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.