

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра металлических конструкций и испытания сооружений

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

к лабораторным работам по курсу

«Металлические конструкции, включая сварку»

для студентов направления подготовки 08.03.01 и 08.04.01
«Строительство», специальности 08.05.01 «Строительство уникальных
зданий и сооружений» по специализации «Строительство высотных и
большепролётных зданий и сооружений»

Казань

2018

УДК 624.014

ББК 38.54

М54

М54 Учебно-методическое пособие к лабораторным занятиям по курсу «Металлические конструкции, включая сварку» для студентов направления подготовки 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство», специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» по специализации «Строительство высотных и большепролётных зданий и сооружений» / Сост.: В.С. Агафонкин, М.А. Дымолазов, А.Э. Фахрутдинов, М.А. Салахутдинов, Л.Р. Гимранов. – Казань: Издательство КГАСУ, 2018.- 63 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Учебно-методическое пособие предназначено для лабораторных занятий по курсу «Металлические конструкции, включая сварку» студентов направления подготовки 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство», специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» по специализации «Строительство высотных и большепролётных зданий и сооружений»

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры металлических конструкций и испытания сооружений

И.Л. Кузнецов

УДК 624.014

ББК 38.54

© Казанский
государственный
архитектурно-строительный
университет, 2018г.

© В.С. Агафонкин,
М.А. Дымолазов,
А.Э. Фахрутдинов,
М.А. Салахутдинов,
Л.Р. Гимранов, 2018г.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 (2 ЧАСА). Расчет и испытание центрально-сжатого элемента	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 (2 ЧАСА). Расчет и испытание изгибаемого элемента на общую устойчивость	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 (2 ЧАСА). Расчет и испытание внецентренно-растянутого элемента	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 (2 ЧАСА). Расчет прочности, технология сварки и определение деформаций стыковых соединений	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 (2 ЧАСА). Теоретическое и экспериментальное определение сварочных деформаций стержня при дуговой сварке	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 (2 ЧАСА). Расчет и испытание угловых сварных швов на срез	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 (2 ЧАСА). Расчет соединения и установка высокопрочных болтов	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 (2 ЧАСА). Расчет и испытание соединений на самосверлящихся винтах (ССВ)	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 (4 ЧАСА). Расчет и испытание модели подкрановой балки	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 (4 ЧАСА). Расчет и испытание модели фермы покрытия здания	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 (4 ЧАСА). Изучение действительной пространственной работы каркаса промышленного здания	55

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 (2 ЧАСА)

Расчет и испытание центрально-сжатого элемента

1. Цель работы. Теоретическое и экспериментальное изучение устойчивости центрально-сжатых элементов. Определение критического продольного усилия.

2. Общие сведения.

Под устойчивостью понимается свойство системы сохранять свое состояние при внешних воздействиях. Если система таким свойством не обладает, она называется неустойчивой. Также можно сказать, что неустойчивым является ее состояние.

В реальных условиях всегда существуют определенные причины, по которым может произойти отклонение от исходного равновесного состояния. Следовательно, возможность перехода к новому состоянию в неустойчивой системе всегда реализуется. В этом случае говорят, что произошла потеря устойчивости.

Рассмотрим достаточно длинный по сравнению с его поперечными размерами стержень, шарнирно-прикрепленный к опорам (рис.1) и нагрузим его сверху центрально силой P , постепенно возрастающей. Пока сила P сравнительно мала, стержень будет сохранять прямолинейную форму. При отклонении стержня в сторону, он будет после ряда колебаний возвращаться к первоначальной форме, как только будет удалена сила, вызвавшая отклонение. При постепенном увеличении силы P стержень будет все медленнее возвращаться к первоначальному положению при проверках его устойчивости. Силу P можно довести до такой величины, при которой стержень после небольшого отклонения в сторону уже не выпрямится, а останется искривленным. Если не удаляя силы P , выпрямить стержень, то он уже не сможет сохранить прямолинейную форму. При этом значении силы P , называемом *критическим*, P_K , прямолинейная форма перестает быть устойчивой формой равновесия сжатого стержня. Критическая сила P_K вызывает в сжатом стержне напряжение, называемое «критическим напряжением»: $\sigma_K = \frac{P_K}{F}$. Критические напряжения являются опасными напряжениями для сжатого стержня. Поэтому, чтобы обеспечить устойчивость прямолинейной формы стержня к условию прочности добавляют условие устойчивости:

$$\sigma = \frac{P}{A} \leq \varphi \cdot R_y,$$

где R_y – расчетное сопротивление стали; φ – коэффициент продольного изгиба.

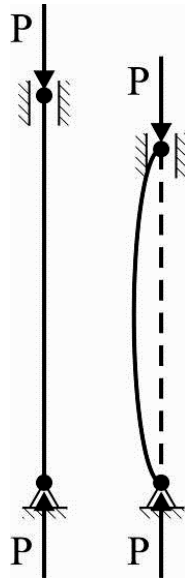


Рис. 1. Устойчивость центрально-сжатого стержня.

Для нахождения критических напряжений $\sigma_{кр}$ необходимо вычислить критическую силу $P_{кр}$, т.е. наименьшую осевую сжимающую силу, способную удержать в равновесии слегка искривленный сжатый стержень. Впервые эта задача была поставлена и решена Л. Эйлером в 1757 г. Рассмотрим прямой стержень постоянного сечения, шарнирно опертый по концам (рис. 2). Нагрузим стержень центрально приложенными продольными сжимающими силами $P = P_{кр}$ и дадим ему весьма небольшое искривление в плоскости наименьшей жесткости. Рассмотрим условия, при которых возможно равновесие стержня с изогнутой осью.

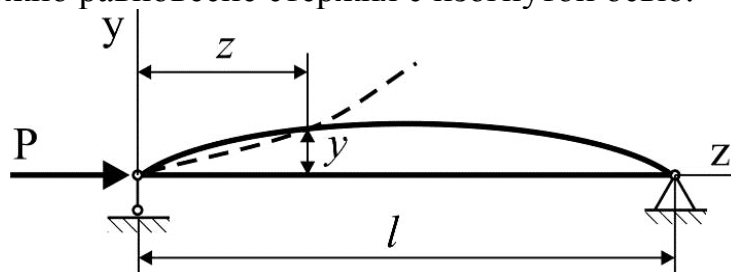


Рис. 2. Расчетная схема центрально-сжатого стержня.

Обозначим координаты точек упругой линии стержня z и y . При малых прогибах:

$$E \cdot J \cdot y'' = M, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; J – минимальный момент инерции сечения; M – изгибающий момент.

Изгибающий момент M по абсолютной величине равен $P \cdot y$. Положительным считается тот момент, который увеличивает кривизну. Следовательно,

$$E \cdot J \cdot y'' = - P \cdot y.$$

Обозначим:

$$\frac{P}{EJ} = k^2. \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$y'' + k^2 \cdot y = 0,$$

откуда

$$y = C_1 \cdot \sin(kz) + C_2 \cdot \cos(kz).$$

Постоянные C_1 и C_2 должны быть выбраны таким образом, чтобы были выполнены граничные условия: при $z=0, y=0$ и при $z=l, y=0$.

Отсюда $C_2 = 0$ и $C_1 \cdot \sin(kl) = 0$.

Последнее уравнение имеет два возможных решения: либо $C_1 = 0$, либо $\sin(kl) = 0$.

В первом случае при $C_1 = C_2 = 0$ перемещения y тождественно обращаются в нуль, и стержень имеет прямолинейную форму. Во втором случае:

$$kl = \pi n,$$

где n – произвольное целое число.

Учитывая (2), получаем:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot E \cdot J}{l^2}, \quad (3)$$

Это означает, что для сохранения криволинейной формы необходимо, чтобы сила P принимала определенное значение. Наименьшая сила P , отличная от нуля, будет при $n = 1$:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2}, \quad (4)$$

Эта сила называется *первой критической* или *эйлеровой силой*.

При $n = 1$:

$$kl = \pi.$$

И уравнение упругой линии стержня принимает вид:

$$y = C_1 \cdot \sin(\pi z / l).$$

Стержень изгибается по полуволне синусоиды с максимальным прогибом C_1 .

Для различных условий опирания значение критической силы может быть найдено по формуле:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент приведения длины.

Значения коэффициента приведения длины для различных условий опирания приведены на рис. 3.

При достижении внешней нагрузкой первой критической силы стержень в виду присутствия в его геометрии начальных несовершенств теряет устойчивость. В случае кинематического нагружения стержень переходит в новую форму равновесия – искривленную, при этом

напряжения и деформации в его среднем сечении резко возрастают в связи с возникновением изгибающего момента. Таким образом, потеря устойчивости по первой форме может быть легко зафиксирована двумя тензодатчиками, установленными вдоль оси стержня в его среднем сечении (рис. 4). В случае, когда плоскость изгиба при потере устойчивости неизвестна, например, для круглого сечения образца, то датчики устанавливают в двух перпендикулярных плоскостях.

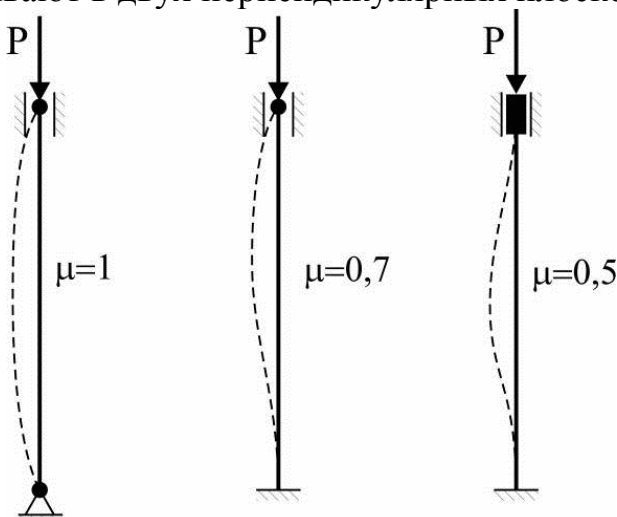


Рис. 3. Коэффициент приведения длины.

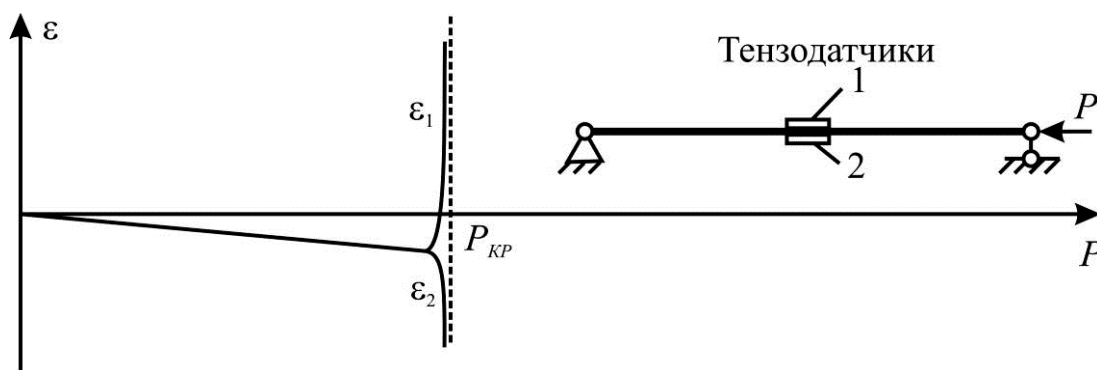


Рис. 4. Зависимость деформаций от сжимающей силы.

До момента достижения критического значения сжимающей силы, показания датчиков деформации (тензорезисторов) линейно зависят от величины сжимающей силы. При приближении к нагрузке потери устойчивости деформации в среднем сечении образца начинают резко возрастать, при малом увеличении значения силы. Таким путем определяется факт потери устойчивости прямолинейной формы равновесия стержня.

Справочные величины:

- модуль упругости стали: $E_{СТ} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;
- модуль упругости алюминиевого сплава: $E_{АЛ} = 0,7 \cdot 10^5$ МПа.

3. Описание лабораторных занятий.

3.1. Устройство стенда.

Конструкция стенда представлена на рисунке 5.

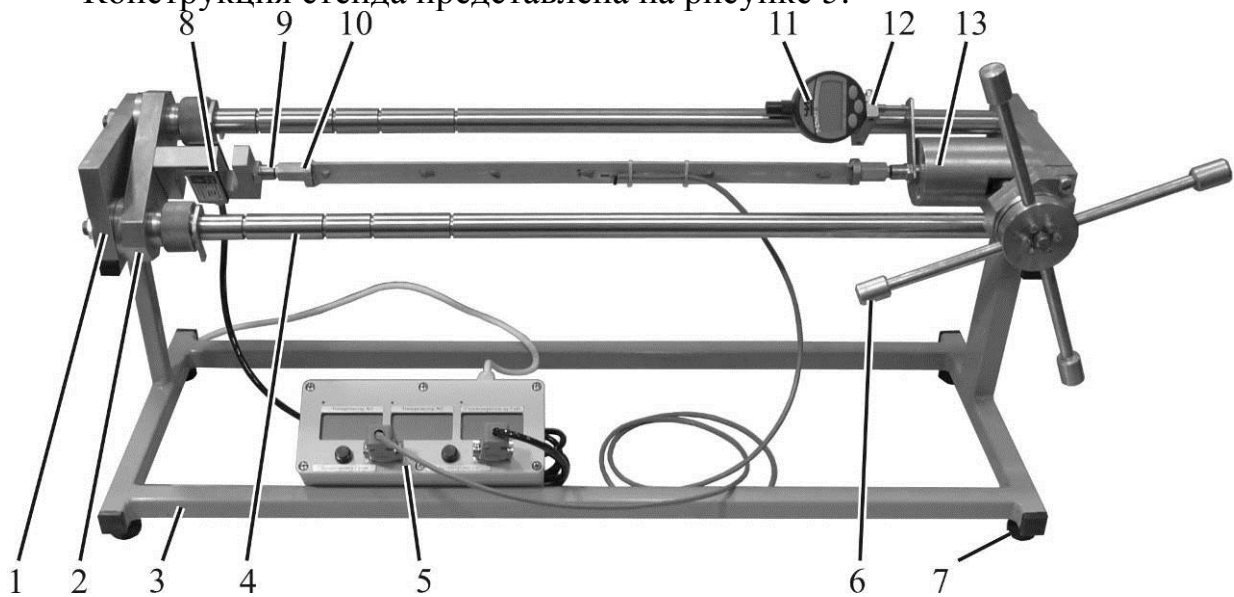


Рис. 5. Общий вид стенда.

Стенд учебный «Общая устойчивость центрально-сжатого стержня» ОУС-ЗЛР-12 включает:

- опорные плиты 1;
- подвижную плиту 2, для регулировки длины рабочей зоны;
- рамку 3 для установки стенда на ровной поверхности (столе);
- силовые направляющие 4, с канавками под установку стопорных вилок;
- измерительный блок 5 для индикации показаний тензорезисторов и силоизмерителя;
- ручной привод 6 устройства нагружения;
- регулируемые опоры 7;
- силоизмеритель 8 с максимальным усилием 2 кН;
- опоры 9 со сферической лункой для установки образца;
- образцы 10.

Для индикации показаний силоизмерителя и тензодатчиков предназначен измерительный блок, показанный на рисунке 6. Измерительный блок показывает действующее значение усилия в кН, значение деформаций в тысячных процента, т.е. одна единица соответствует деформации 10^{-5} .

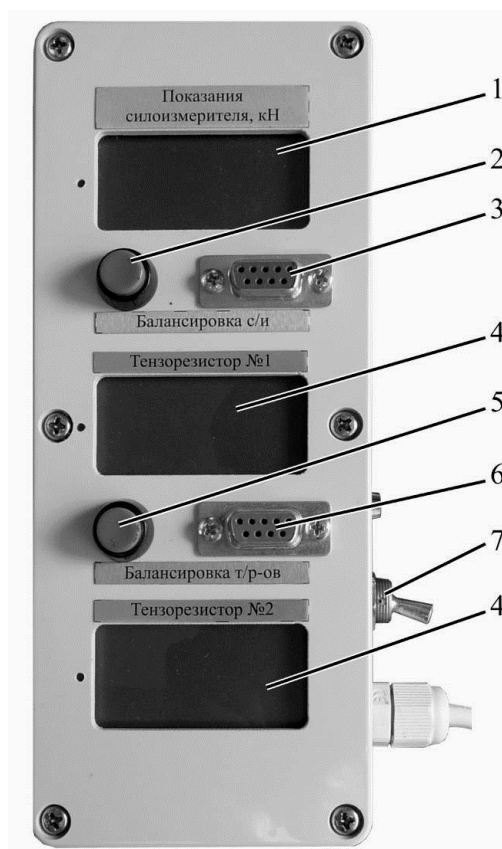


Рис. 6. Измерительный блок.

На измерительном блоке расположены:

- цифровое табло 1 для индикации показаний силоизмерителя, свечение зеленого светодиода слева от табло означает знак «минус»;
- кнопка 2 для балансировки показаний силоизмерителя;
- разъем 3 для подключения силоизмерителя;
- два цифровых табло 4 для индикации показаний тензорезисторов, свечение зеленого светодиода слева вверху от табло означает знак «минус»;
- кнопка 5 для балансировки показаний тензорезисторов;
- разъем 6 для подключения тензорезисторов;
- тумблер 7 включения электропитания измерительного блока.

3.2. Теоретическая часть.

Теоретическое определение величины критической силы производится по формуле:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (6)$$

где J_x – момент инерции сечения образца; $E_{ст}$ – модуль упругости стали, $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^6$ кг/см²; $E_{ал}$ – модуль упругости алюминия, $E_{ал} = 0,7 \cdot 10^6$ кг/см²; l – расстояние между точками раскрепления.

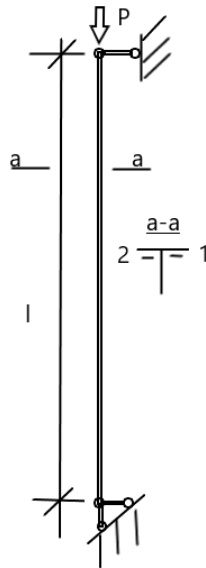


Рис.7. Расчетная схема испытываемого образца.

3.3. Экспериментальная часть.

1. Подключить разъем тензорезисторов к соответствующему разъему на измерительном блоке.

2. Включить электропитание измерительного блока. Подождать 5 – 10 минут для выхода электронных компонент блока на тепловой режим.

3. Произвести балансировку силоизмерителя и тензорезисторов нажатием соответствующих кнопок на измерительном блоке.

4. Плавно вращая рукоятку приводного устройства по направлению хода часовой стрелки, начать нагружение образца, контролируя при этом значение усилия и деформаций по цифровым табло. В процессе нагружения записывать текущие значения усилия (P) и деформаций ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) в таблицу 1 с шагом 5-6 единиц по деформациям. Нагружение проводить до значений деформаций 60-70.

Обновление показаний цифровых табло происходит один раз в 2–3 с. Запрещено превышать значение деформаций 80×10^{-5} (показания цифрового табло «80») для образцов из стали.

5. Сделать эскиз формы потери устойчивости образца.

6. Разгрузить образец, вращая рукоятку приводного устройства против направления хода часовой стрелки.

7. Построить зависимости деформаций от сжимающего усилия. Определить значение критической силы (нагрузки потери устойчивости), занести полученное значение в таблицу 1.

8. Рассчитать теоретическое значение критической силы, занести результат в таблицу 1.

9. Сравнить полученные экспериментальные и расчетные значения. Сделать выводы.

Таблица 1. Экспериментальные данные испытаний.

№ этапа	P, кН	Показания датчиков		Среднее значение напряжений	Наклон кривой
		$\varepsilon_1 \cdot 10^5$	$\varepsilon_2 \cdot 10^5$	$\sigma = \frac{E \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot 10^{-5}}{2}$	$k_1 = \frac{P}{\sigma}$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					

Для определения значения критического усилия полученного в ходе эксперимента необходимо определить усилие, при котором наклон кривой изменяется. Критическое усилие определяется по формуле:

$$P_{\varepsilon} = \frac{k_i \cdot \left(\frac{P_{кр i} \cdot \sigma_{кр, j} - P_{кр j} \cdot \sigma_{кр, i}}{\sigma_{кр, j} - \sigma_{кр, i}} \right)}{k_i - \left(\frac{P_{кр j} - P_{кр i}}{\sigma_{кр, j} - \sigma_{кр, i}} \right)}, \quad (7)$$

где $P_{кр i}$ – критическая сила перед изменением наклона кривой;
 $P_{кр j}$ – критическая сила, при которой меняется наклон кривой;
 $\sigma_{кр i}$ – критические средние напряжения перед изменением наклона кривой;
 $\sigma_{кр j}$ – критические средние напряжения, при которых меняется наклон кривой;
 k_i – наклон кривой графика на i -м этапе; $\varepsilon_{1, i}$ – показания 1-го датчика на i -м этапе; $\varepsilon_{2, i}$ – показания 2-го датчика на i -м этапе.

Сравнительный анализ результатов теоретических исследований и экспериментальных данных:

$$\Delta = \frac{P_{кр} - P_{\varepsilon}}{P_{\varepsilon}} \cdot 100\%.$$

4. Общие выводы.

После определения теоретического и экспериментального значения критической силы необходимо:

- 1) сравнить теоретическое и экспериментальное значение критической силы;
- 2) схематически нарисовать форму потери устойчивости.

5. Контрольные вопросы.

1. Что понимается под устойчивостью центрально-сжатого элемента?
2. Что такое коэффициент продольного изгиба?
3. Что такое коэффициент приведения длины?
4. Как отслеживается потеря устойчивости стержня в ходе эксперимента?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 (2 ЧАСА)

Расчет и испытание изгибаемого элемента на общую устойчивость

1. Цель работы. Теоретическое и экспериментальное изучение общей устойчивости изгибаемых элементов.

2. Общие сведения.

Известно, что в некоторых случаях плоская форма изгиба стержня становится неустойчивой, и при потере устойчивости происходит изгиб в плоскости YZ и одновременно возникает кручение. Это наблюдается у стержней, имеющих большую жесткость в плоскости действия внешних сил и малую жесткость – в плоскости YZ .

Рассмотрим стержень (рис.1), нагруженный на концах моментами, действующими в вертикальной плоскости. Условия закрепления на концах будем считать допускающими свободный поворот сечения при изгибе как в одной, так и в другой плоскости, и в то же время запрещающими поворот при кручении. Жесткость в плоскости заданных внешних моментов предполагаем достаточно большой. Это позволяет считать, что до потери устойчивости стержень сохраняет в основном прямолинейную форму.

Представим себе, что стержень изогнулся в плоскости, перпендикулярной плоскости моментов M_0 , и одновременно закрутился. На рис.1 показана форма изогнутого стержня.

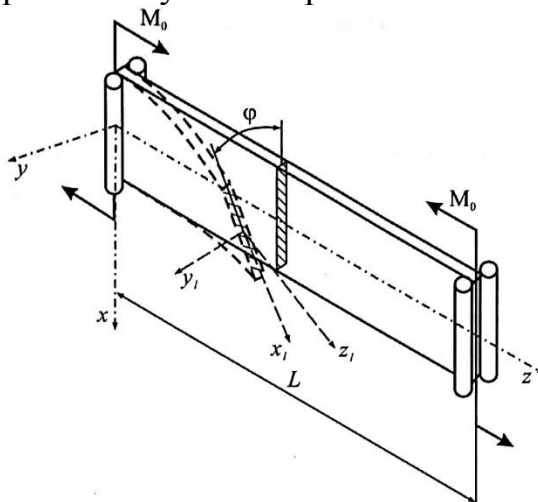


Рис. 1. Вводимые обозначения.

В сечении стержня, расположенном на расстоянии z от левой опоры, изгибающий момент относительно оси x_i , равен:

$$M_{XI} = -M_0 \cdot \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол поворота рассматриваемого сечения относительно оси z .

Крутящий момент в рассматриваемом сечении равен:

$$M_k = M_0 \cdot \theta = M_0 \cdot \frac{dy}{dz}, \quad (2)$$

где θ – угол поворота сечения относительно оси X : $\theta = \frac{dy}{dz}$.

С учетом того, что:

$$E \cdot J_x \cdot \theta' = M_{XI}, \quad (3)$$

$$G \cdot J_k \cdot \varphi' = M_k, \quad (4)$$

получаем следующие уравнения:

$$E \cdot J_x \cdot \theta' = -M_0 \cdot \varphi, \quad (5)$$

$$G \cdot J_k \cdot \varphi' = M_0 \cdot \theta, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_{XI}}{E \cdot J_x} = \frac{-M_0 \cdot \varphi}{E \cdot J_x}, \quad (7)$$

Исключая из уравнений θ , получаем следующее уравнение второго порядка:

$$M_0 \cdot \frac{dy}{dz} = G \cdot J_k \cdot \varphi', \quad (8)$$

$$M_0 \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = G \cdot J_k \cdot \varphi'', \quad (9)$$

$$M_0 \cdot \frac{-M_0 \cdot \varphi}{E \cdot J_x} = G \cdot J_k \cdot \varphi'', \quad (10)$$

$$\varphi'' + \frac{M_0^2}{G J_k E J_x} \varphi = 0, \quad (11)$$

Решением данного дифференциального уравнения является функция:

$$\varphi = C_1 \cdot \sin(kz) + C_2 \cdot \cos(kz), \quad (12)$$

где

$$k = \frac{M_0}{\sqrt{G J_k E J_x}}, \quad (13)$$

С учетом граничных условий: $\varphi = 0$ при $z = 0$ и $\varphi = 0$ при $z = L$, ненулевое значение константа C_1 может принимать только в случае, когда $kL = \pi$, тогда значение изгибающего момента M_0 , при котором возможна не прямолинейная форма равновесия равно:

$$M_0 = \frac{\pi}{L} \sqrt{G J_k E J_x}, \quad (14)$$

Таким образом, критическое значение изгибающего момента определяется жесткостью стержня на кручение и жесткостью в плоскости, перпендикулярной к плоскости действия момента.

3. Описание лабораторных занятий.

3.1. Устройство стенда.

Конструкция стенда представлена на рисунке 2.

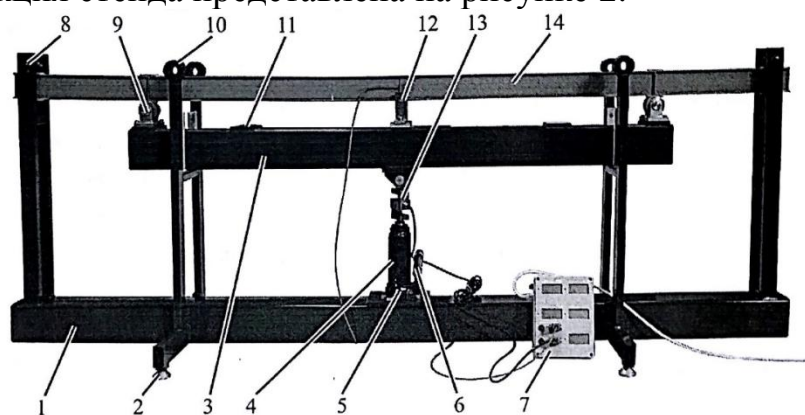


Рис. 2. Общий вид стенда.

Стенд учебный «Общая устойчивость изгибаемого стержня» ОУС-ЗЛР-12 включает в себя (рис. 2):

- силовую раму 1, обеспечивающую замыкание усилия от нагружающего устройства и образца;
- регулируемые опоры 2 для установки стенда на горизонтальной поверхности (столе);
- подвижную траверсу 3 с подкладками 11 для установки устройств опирания 9 образцов 14;
- гидравлический цилиндр 4, выполненный в едином корпусе с насосом;
- винт 5 для сброса давления рабочей жидкости в гидроцилиндре;
- рукоятки 6 привода гидравлического насоса;
- измерительный блок 7 для индикации показаний тензорезисторов и силоизмерителя.

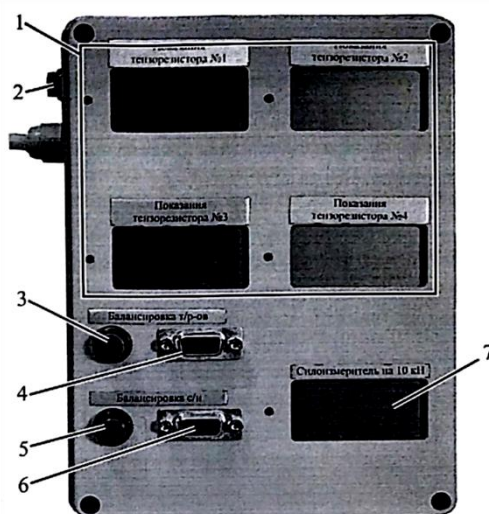


Рис. 3. Измерительный блок.

На измерительном блоке расположены:

- четыре цифровых табло 1 для индикации показаний тензорезисторов, свечение зеленого светодиода слева от табло означает знак «минус»;
- кнопка 2 включения электропитания измерительного блока;
- кнопка 3 для балансировки показаний тензорезисторов;
- разъем 4 для подключения тензорезисторов;
- кнопка 5 для балансировки показаний силоизмерителя;
- разъем 6 для подключения силоизмерителя;
- цифровое табло 7 для индикации показаний силоизмерителя, свечение зеленого светодиода слева от табло означает знак «минус».

3.2. Теоретическая часть.

Теоретическое определение величины критического момента производится по формуле:

$$M_{crt} = \frac{\pi}{L} \sqrt{GJ_k E J_x}, \quad (15)$$

где $J_x = 0.233\text{см}^4$ – момент инерции сечения образца в горизонтальной плоскости; J_k – момент инерции сечения при кручении для двутаврового сечения.

Вычисляется J_k по формуле:

$$J_k = \frac{1.3}{3} (2bt_f^3 + ht^3), \quad (16)$$

где $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ – модуль упругости стали; $G = 0,78 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ – модуль сдвига стали; $L = 1160\text{мм}$ – расстояние между точками раскрепления; $b = 24\text{мм}$ – ширина полки двутавра; $t_f = 1\text{мм}$ – толщина полки двутавра; $h = 50\text{мм}$ – высота двутавра; $t = 2\text{мм}$ – толщина стенки двутавра.

Величина критической силы, действующей на балку, зависит от статической схемы опирания балки:

$$P_{crt} = \frac{2M_0}{a},$$

где $a = 12\text{см}$ – расстояние от опоры до места приложения усилия.

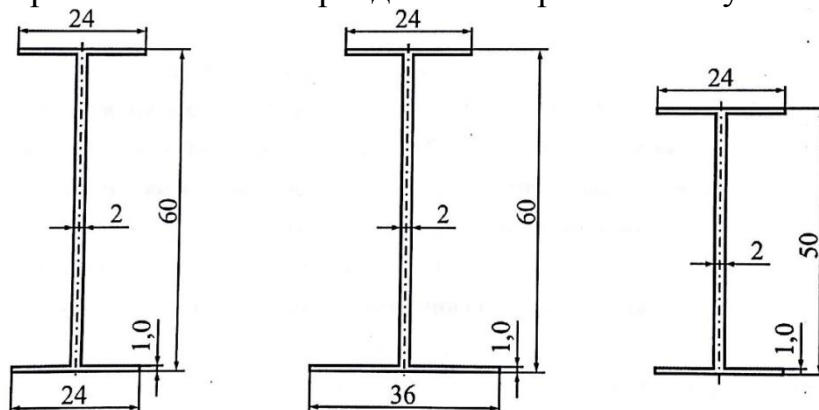


Рис.4. Поперечное сечение образцов.

3.3. Экспериментальная часть.

1. Подключить разъем тензорезисторов к соответствующему разъему на измерительном блоке.
2. Включить электропитание измерительного блока. Подождать 5 – 10 минут для выхода электронных компонент блока на тепловой режим.
3. Произвести балансировку силоизмерителя и тензорезисторов нажатием соответствующих кнопок на измерительном блоке.
4. Затянуть винт сброса давления в гидроцилиндре.
5. Плавно качая рукоятку гидравлического насоса, произвести подъем траверсы до касания образцом верхних опор.
6. Установить ограничители поперечного смещения на расстоянии 2-3 мм от образца, затянуть винты их крепления к траверсе.
7. Плавно качая рукоятку гидравлического насоса, начать нагружение образца, контролируя при этом значения усилия и деформаций по цифровым табло. В процессе нагружения записывать текущие значения усилия (P) и деформаций ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$) в таблицу 1 с шагом 0,5 единиц по усилию.
8. Сделать эскиз формы потери устойчивости образца.
9. Произвести разгрузку образца, отвернув винт сброса давления в гидроцилиндре на 1-2 оборота.
10. Выключить питание измерительного блока, отключить разъем тензорезисторов, снять образец.
11. Построить зависимости разности деформаций ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3$) и ($\varepsilon_2 - \varepsilon_4$) от изгибающего усилия. Определить значение критической силы (нагрузки потери устойчивости), занести полученное значение в таблицу 1.

Для определения значения критического усилия, полученного в ходе эксперимента, необходимо определить усилие, при котором наклон кривой изменяется. Критическое усилие по датчикам в верхнем поясе определяется по формуле:

$$P_{crexp,1-3} = \frac{k_{1,3} \cdot \left(\frac{P_9 \cdot (\varepsilon_{1,10} - \varepsilon_{3,10}) - P_{10} \cdot (\varepsilon_{1,9} - \varepsilon_{3,9})}{(\varepsilon_{1,10} - \varepsilon_{3,10}) - (\varepsilon_{1,9} - \varepsilon_{3,9})} \right)}{k_{1,3} - \left(\frac{P_{10} - P_9}{(\varepsilon_{1,10} - \varepsilon_{3,10}) - (\varepsilon_{1,9} - \varepsilon_{3,9})} \right)}, \quad (17)$$

Критическое усилие по датчикам в нижнем поясе определяется по формуле:

$$P_{crexp,2-4} = \frac{k_{2,4} \cdot \left(\frac{P_9 \cdot (\varepsilon_{2,10} - \varepsilon_{4,10}) - P_{10} \cdot (\varepsilon_{2,9} - \varepsilon_{4,9})}{(\varepsilon_{2,10} - \varepsilon_{4,10}) - (\varepsilon_{2,9} - \varepsilon_{4,9})} \right)}{k_{2,4} - \left(\frac{P_{10} - P_9}{(\varepsilon_{2,10} - \varepsilon_{4,10}) - (\varepsilon_{2,9} - \varepsilon_{4,9})} \right)}, \quad (18)$$

где P_i – показания измерителя на i -м этапе; k_i – наклон кривой графика на i -м этапе; $\varepsilon_{1,i}$ – показания 1-го датчика на i -м этапе; $\varepsilon_{2,i}$ – показания 2-го датчика на i -м этапе; $\varepsilon_{3,i}$ – показания 3-го датчика на i -м этапе; $\varepsilon_{4,i}$ – показания 4-го датчика на i -м этапе.

Таблица 1. Таблица экспериментальных данных.

№ этапа	P, кН	Показания датчиков		Среднее значение напряжений	Наклон кривой
		$\varepsilon_1 \cdot 10^5$	$\varepsilon_2 \cdot 10^5$	$\sigma = \frac{E \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot 10^{-5}}{2}$	$k_1 = \frac{P}{\sigma}$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					

4. Общие выводы.

После определения теоретического и экспериментального значения критической силы необходимо:

- 1) сравнить теоретическое и экспериментальное значение критической силы;
- 2) схематически нарисовать форму потери устойчивости.

5. Контрольные вопросы.

1. У каких изгибаемых стержней наблюдается склонность к одновременному изгибу и кручению?
2. Как условия закрепления изгибаемого стержня на концах влияют на потерю его общей устойчивости?
3. Какие величины используются при определении критического изгибающего момента для случая, рассматриваемого в данной работе?
4. Каким образом отслеживается момент потери общей устойчивости в изгибаемом стержне в ходе эксперимента?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 (2 ЧАСА)

Расчет и испытание внецентренно-растянутого элемента

1. Цель работы. Приобретение навыков расчета растянуто-изогнутых и внецентренно-растянутых элементов по СП 16.13330.2017 [6] с последующим испытанием образца до разрушения и сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

2. Опытный образец. Образец для испытания представляет собой отрезок уголка с приваренными на его концах пластинами, за которые растягивается образец, изготовленный из малоуглеродистой стали (рис. 1).

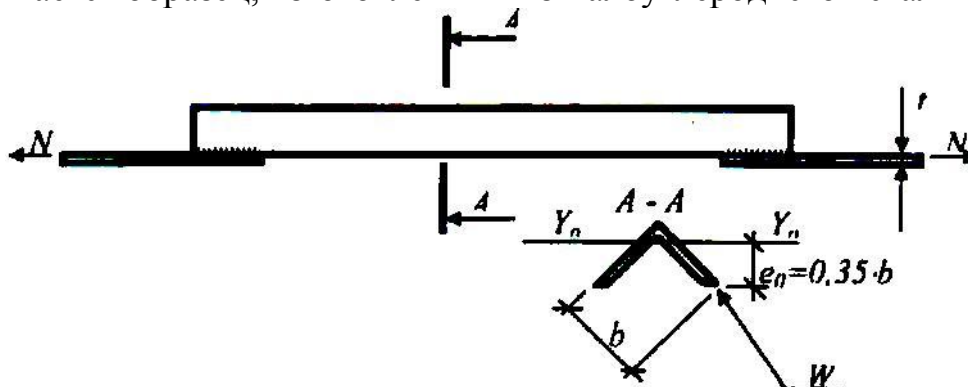


Рис. 1. Образец для испытания на внецентренное растяжение.

3. Порядок выполнения работы. Студенты, пользуясь положениями СП 16.13330.2017 [6], рассчитывают и определяют несущую способность внецентренно-растянутого элемента без учета развития пластических деформаций и с учетом развития пластических деформаций. Наиболее нагруженной зоной сечения уголка являются полки, приваренные к пластинам, а напряжения в них без учета пластических деформаций определяют по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq R_y \gamma_c.$$

Тогда расчетная несущая способность сечения А-А без учета развития пластических деформаций составит:

$$N = \frac{A \cdot R_y \cdot \gamma_c}{1 + A \cdot e / W'} \quad (1)$$

где A – площадь сечения уголка, см^2 ; R_y – расчетное сопротивление стали (по приложению В, табл. В.3, В.4, В.5 [6]); γ_c – коэффициент условия работы элемента (по табл. 1 [6]); e – эксцентриситет приложения силы, см : $e = \frac{t}{2} + e_0$.

Затем определяется несущая способность стержня с учетом развития пластических деформаций, заменяя неравенство на равенство:

$$\left(\frac{N}{A \cdot R_y \cdot \gamma_c} \right)^n + \frac{M}{c_x \cdot W_{min} \cdot R_y \cdot \gamma_c} = 1, \quad (2)$$

где $M = N \cdot e$; $n = 2$ – для уголка; $c_x = 1,47$ – для уголка (по приложению Е, табл. Е.1 [6]). Величина N определяется из решения уравнения (2).

Далее в лабораторных условиях студенты выполняют испытание стержня до разрушения, сравнивают результаты расчета с экспериментальными данными и делают вывод по работе с анализом схемы разрушения.

4. Контрольные вопросы.

1. Во сколько раз отличается несущая способность стержня с учетом и без учета пластических деформаций?
2. Оказывался ли стержень прямолинейным при расчетной нагрузке с учетом развития пластических деформаций?
3. Во сколько раз разрушающая нагрузка превысила расчетную и чем это объясняется?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 (2 ЧАСА)

Расчет прочности, технология сварки и определение деформаций стыковых соединений

1. Цель работы. Изучить вопрос назначения типа электродов, научиться выполнять расчет сварных стыковых соединений, назначать режим сварки и диаметр электродов, а также теоретически и экспериментально определить деформации после сварки стыковых швов.

2. Исходные данные. Осуществляется сварка встык двух листов из стали С245 [4] шириной 200 мм, толщиной 4мм (рис. 1). Расчетное усилие в накладке $N = 15$ т. Сварка ручная. Используется визуальный контроль качества сварного шва.

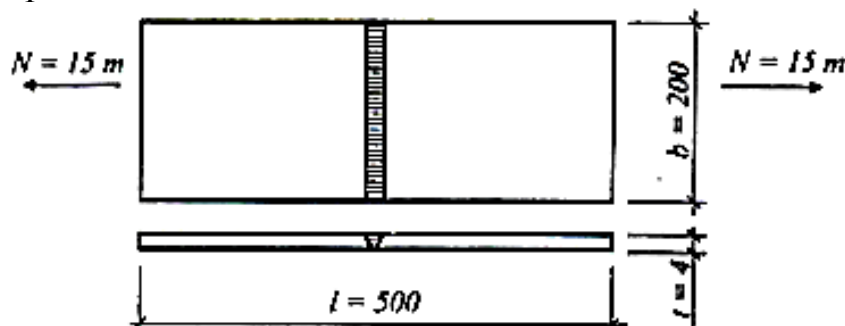


Рис. 1. Стыковое соединение листов.

3. Порядок выполнения работы.

1. По СП 16.13330.2017 [6] (приложение Г, табл. Г.1) определяется тип электродов по ГОСТ 9467-75* [1]. По табл. 3 [6], в зависимости от R_y , который определяется по табл. В.3, В.4 и В.5 [6], определяется расчетное сопротивление стыкового сварного шва R_{wy} .

2. Расчет прочности стыкового шва выполняется по формуле:

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

где N – действующее усилие на стыковое соединение; t – наименьшая толщина соединяемых элементов; l_w – расчетная длина сварного шва; R_{wy} – расчетное сопротивление стыкового соединения; γ_c – коэффициент

условий работы, табл. 1 [6].

Расчетная длина сварного шва (l_w) принимается равной ширине свариваемых пластин при выводе сварных швов на технологические подкладки. При отсутствии технологических подкладок длина сварного шва принимается равной:

$$l_w = b - 2t, \quad (2)$$

3. Определяется диаметр электродов и режим сварки.

Диаметр электродов определяется по табл. 1.

Таблица 1

Толщина стали, мм	0,5 - 1	1 - 2	2 - 5	4 - 10	>10
Диаметр электрода, мм	1,6	2 - 2,5	2,5 - 4	4 - 6	4 - 8

Сварка данного соединения выполняется в нижнем положении.

Сила тока определяется по приближенной формуле:

$$I = (20 + 6 \cdot d_э) \cdot d_э, \quad (3)$$

где $d_э$ – диаметр электрода (мм).

Скорость ручной сварки принимается равной $v=0.5 \div 0.6$ (см/с).

Погонная энергия сварки:

$$q_{II} = \frac{0,2 \cdot U \cdot I \cdot \eta}{v}, \quad (\text{кал/см}) \quad (4)$$

где U – напряжение дуги (В): $U = 30 \div 35$ В; I – сила тока (А); η – КПД электрической дуги при ручной сварке ($\eta = 0.6$).

4. Вычисление кривизны сварного элемента.

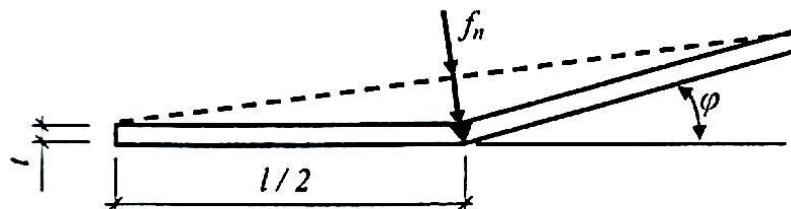


Рис. 2. Схема деформаций соединения

Угол поворота сечения (рис. 2):

$$\varphi = \mu \cdot q_n \cdot \frac{y'}{I} \cdot l_w, \quad (5)$$

здесь $\frac{y'}{I} = \frac{t \cdot 12}{2 \cdot b \cdot t^2} = \frac{6}{b \cdot t^2}$, где μ – коэффициент, учитывающий тип металла: для малоуглеродистой стали $\mu = -3.53 \cdot 10^{-6}$ (см³/ккал).

Стрелка прогиба (рис. 2):

$$f_n = \frac{l}{4} \cdot \varphi, \quad (6)$$

где l – длина соединяемых листов ($l = 50.0$ см).

5. Производится изготовление образца при указанных технических и технологических параметрах и делается сравнение значения теоретической и экспериментальной стрелки прогиба.

4. Контрольные вопросы.

1. Как определяется тип и диаметр электрода?
2. Какие геометрические параметры сварного шва влияют на его прочность?
3. Как определяется расчетная длина сварного шва в стыковых соединениях?
4. Какой параметр определяет кривизну сварного элемента?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 (2 ЧАСА)

Теоретическое и экспериментальное определение сварочных деформаций стержня при дуговой сварке

1. Цель работы. Изучение методики определения деформаций стального стержневого элемента несимметричного сечения при приварке к нему конструктивных элементов. В задачу лабораторной работы входит также ознакомление с измерительными приборами и технологией ручной дуговой сварки при изготовлении образца.

2. Теоретическая часть работы. Определить стрелку прогиба и деформацию элемента из малоуглеродистой стали сечением из прокатного равнобокого уголка при приварке к нему листовых кронштейнов. Схема сварной конструкции приведена на рис. 1.

Стрелка прогиба элемента посередине пролета от выполнения n -поперечных швов равна:

$$\text{- по оси } X_0: \quad f_{x0} = \frac{\varphi_{x0} \cdot n^2 \cdot d}{8}, \quad (1)$$

$$\text{- по оси } Y_0: \quad f_{y0} = \frac{\varphi_{y0} \cdot n^2 \cdot d}{8}. \quad (2)$$

Здесь φ_{x0} и φ_{y0} – углы поворота в главных плоскостях; n – число приваренных кронштейнов; d – шаг поперечных швов.

Стрелка прогиба элемента в направлении перпендикулярном полке:

$$f = \sqrt{f_{x0}^2 + f_{y0}^2}, \quad (3)$$

Деформация укорочения элемента по длине центра тяжести сечения от приварки n -кронштейнов:

$$\Delta l = \Delta l_{\text{ит}} \cdot n, \quad (4)$$

где $l_{\text{ит}}$ – абсолютное укорочение элемента в продольном направлении по линии центра тяжести от приварки одного кронштейна.

Углы поворота в обеих главных плоскостях и абсолютное укорочение элемента при выполнении одного поперечного шва определяется по формулам:

$$\varphi_{y0} = \mu' \cdot g_n \cdot \frac{Y_0'}{I_{x0}} \cdot a, \quad (5)$$

$$\varphi_{x0} = \mu' \cdot g_n \cdot \frac{X_0'}{I_{y0}} \cdot a, \quad (6)$$

$$l_{\text{цт}} = \mu' \cdot g_n \cdot \frac{l}{A} \cdot a, \quad (7)$$

Здесь $\mu = - \left(\frac{10.5}{\sqrt{\frac{m}{2} + 1}} + 3.53 \right) \cdot 10^{-6}$ – коэффициент, связанный с

теплофизическими свойствами стали (см³/кал), где $m = \frac{A}{(X \cdot t_y)}$, A – площадь поперечного сечения уголка; t_y – толщина полки уголка; значение X определяется по формуле:

$$X = B \cdot \left(\frac{g_n}{\Sigma t} \right)^2 \cdot v, \quad (8)$$

где $B = 8.07 \cdot 10^{-6}$ – для малоуглеродистой стали (см²·с/кал); $g_n = 9500k^2$ – погонная энергия сварки, где k – катет шва, см; Σt – сумма толщин свариваемых деталей, по которым в процессе сварки распределяется тепло ($\Sigma t = t_k + t_y$ – при одностороннем шве и $\Sigma t = t_k + 2t_y$ – при двустороннем шве); v – скорость сварки, см/сек; a – ширина полки уголка; I_{x0} и I_{y0} – моменты инерции относительно главных осей; Y_0' и X_0' – размеры, указанные на рис. 1.

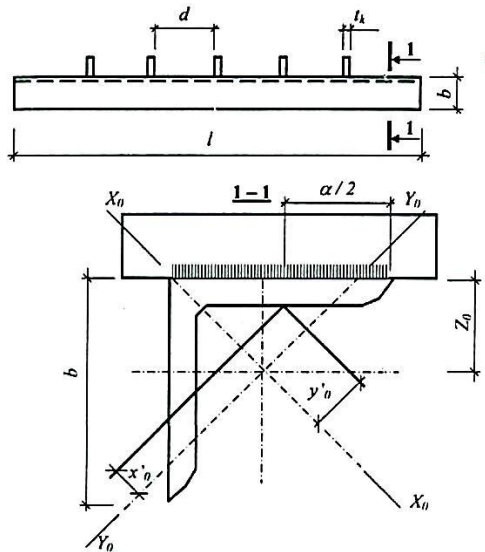


Рис. 1. Схема сварной конструкции:

Y_0' и X_0' – расстояния от центральных осей до середины сварного шва.

Таблица 1

Значение стрелки прогиба (мм)			Деформация укорочения		
Теоретическая формула (3)	Эксперимент ($f = f_k - f_n$)	%	Теоретическая формула (4)	Эксперимент ($\Delta l = l_k - l_n$)	%

3. Экспериментальная часть.

Экспериментальная часть лабораторной работы состоит из трех этапов. На первом этапе измеряются геометрические характеристики стержня из прокатного уголка до приварки кронштейнов, и размечается положение кронштейнов (рис. 1). Результаты измерений заносятся в табл. 2.

Таблица 2

Длина образца, l_n	Шаг кронштейнов, d (мм)	Толщина кронштейнов, t_k	Сечение уголка, $a \times b \times t_y$	Начальная стрелка прогиба в направлении, перпендикулярном полке уголка, f_n

Кроме того, по сортаменту на прокатные уголки [2] определяются геометрические характеристики A , I_{x0} , I_{y0} и вычисляются значения Y_0' и X_0' (рис. 1).

На втором этапе производится приварка кронштейнов при фиксированном режиме сварки. А именно: скорости сварки v (см/сек) и погонной энергии сварки при катете шва – k . После этого измеряют катет шва k и длину шва $l_w = a$.

На третьем этапе по изготовленному образцу производится измерение его длины по оси уголка l_k и стрелки прогиба в направлении, перпендикулярном плоскости приварки кронштейнов f_k .

4. Оформление результатов работы.

По результатам расчетов и экспериментальных измерений составляется конспект, содержащий все промежуточные и окончательные результаты работы. Итогом работы является сравнение экспериментальных и теоретических данных (табл. 2) и выводы по справедливости рассмотренной методики.

5. Контрольные вопросы.

1. Дайте определение термину "сварочные деформации".
2. Что такое дуговая сварка?
3. От каких параметров зависит стрелка прогиба элемента по середине пролета?
4. На какой параметр влияет толщина кронштейна t_k ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 (2 ЧАСА)

Расчет и испытание угловых сварных швов на срез

1. Цель работы. Приобретение навыков расчета сварных швов по СП 16.13330.2017 [6] с последующим испытанием образца до разрушения и анализом схемы разрушения сварных швов.

2. Опытные образцы. Образцы для испытания представляют собой сваренные угловым швом два отрезка уголков (рис. 1), которые затем будут испытываться в прессе на сжатие.

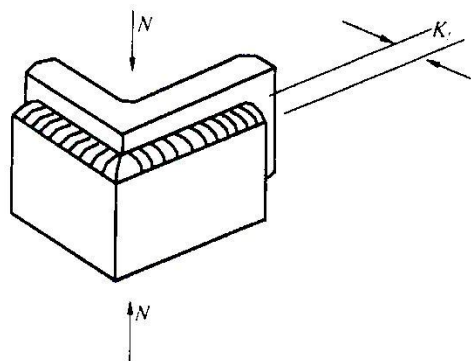


Рис. 1. Образец сварного соединения.

Материал уголков – С245.

Электроды – марки Э-42.

3. Порядок выполнения работы.

1. Студент должен выполнить обмер образца и замерить параметры углового шва.

2. Определить расчетную несущую способность углового шва по двум сечениям (измерив предварительно длину l_w и катет шва k_f):

а) по материалу шва несущая способность определяется по формуле (1):

$$N_f = \beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c; \quad (1)$$

б) по границе сплавления – по формуле (2):

$$N_f = \beta_z \cdot k_f \cdot l_w \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c. \quad (2)$$

Все параметры формул (1) и (2) студент должен выбрать самостоятельно, пользуясь СП 16.13330.2017 [6]. После выполнения расчетов делается вывод о минимальной несущей способности шва.

3. Далее студенческая группа выполняет испытание образца до разрушения и сопоставляет результаты испытания образца с расчетной несущей способностью. Описывает в выводах характер разрушения образца с зарисовкой разрушения. Вычисляет величину коэффициента запаса, заложенного в расчетах по СП 16.13330.2017 [6].

4. Контрольные вопросы.

1. Какова расчетная несущая способность соединения?
2. Во сколько раз отличается расчетная несущая способность по металлу шва от несущей способности шва по границе сплавления?
3. По какому сечению произошло фактическое разрушение соединения?
4. Во сколько раз разрушающая нагрузка превысила расчетную и чем это объясняется?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 (2 ЧАСА)

Расчет соединения и установка высокопрочных болтов

1. Цель работы. Целью работы является изучение теоретических вопросов расчета соединений на высокопрочных болтах и решение практических вопросов, связанных с установкой болтов в соединении.

1.1. Теоретическая часть. При заданных условиях требуется рассчитать соединение на высокопрочных болтах и определить необходимый момент закручивания болтов.

1.2. Экспериментальная часть. В данной части лабораторной работы экспериментально определяется коэффициент закручивания высокопрочного болта.

2. Общая часть. Применение болтовых соединений обеспечивает простоту, надежность в работе и разборность конструкций. Однако широкое применение болтов нормальной и повышенной точности в несущих конструкциях из-за их невысокой несущей способности сдерживается, поскольку требуется установка большого количества болтов, что приводит к усложнению монтажных соединений и повышает трудоемкость. Поэтому в последнее время широкое распространение получают высокопрочные болты. Отличительной особенностью данных болтов является то, что они изготавливаются из высокопрочной стали и устанавливаются с контролируемым усилием натяжения. Большая сила натяжения болта плотно стягивает соединяемые элементы, создавая большие силы трения, которых достаточно для восприятия внешних сдвигающих усилий на соединение.

3. Расчет соединений на высокопрочных болтах.

Исходные данные: требуется прикрепить два швеллера [6] к листовой фасонке (рис.1). Крепление выполняется на высокопрочных болтах из стали 40X «селект». Действующее усилие: $N = 30\text{т}$. Диаметр болтов $d = 20\text{мм}$.

Решение. Определение количества болтов.

Несущая способность одного болта определяется для одной поверхности трения по формуле (п.14.3.1 [6]):

$$Q_{bh} = \frac{R_{bh} \cdot A_{bh} \cdot \mu}{\gamma_h}, \quad (1)$$

где R_{bh} – расчетное сопротивление растяжению болта; $A_{bh} = 2.45\text{см}^2$ – площадь сечения болта «нетто»; $\mu = 0.35$ – коэффициент трения при обработке поверхности контакта щетками; $\gamma_h = 1.35$ – коэффициент надежности.

Число болтов в соединении при двух плоскостях трения:

$$n = \frac{N}{2 \cdot \gamma_c \cdot Q_{bh} \cdot \gamma_b}. \quad (2)$$

где γ_b – коэффициент условий работы при числе болтов $n < 5$, $\gamma_b = 0.8$.

Расчетное сопротивление растяжению болта в формуле (1) равно:

$$R_{bh} = 0.7 \times R_{bun}, \quad (3)$$

где $R_{bun} = 11000 \text{ кг/см}^2$ – для стали 40Х «селект».

4. Определение коэффициента закручивания болта.

В общих технических требованиях согласно [3] на высокопрочные болты, гайки и шайбы указывается необходимость определения для каждой партии коэффициента закручивания:

$$K = \frac{M}{N \cdot d}, \quad (4)$$

где M – момент закручивания; N – усилие натяжения болта; d – диаметр болта.

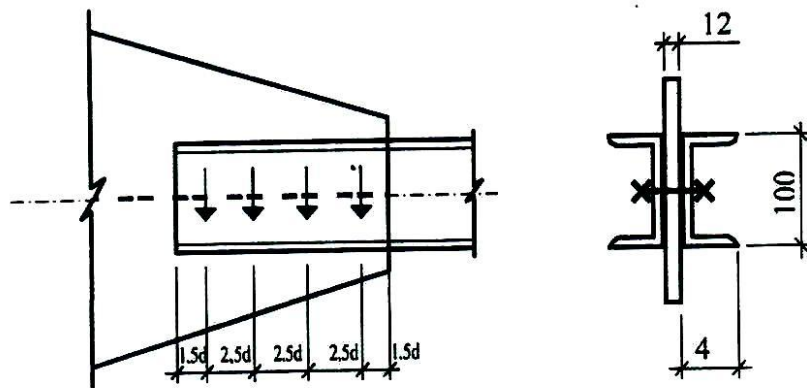


Рис.1. Соединение на высокопрочных болтах.

Определение указанного коэффициента закручивания предлагается выполнять на стенде, представленном на рисунке 2.

При помощи динамометрического ключа осуществляется закручивание гайки болта, при этом осуществляется фиксирование значения момента на динамометрическом ключе и измерение деформаций с последующим вычислением усилий натяжения болта. Результаты испытания записываются в таблицу 1.

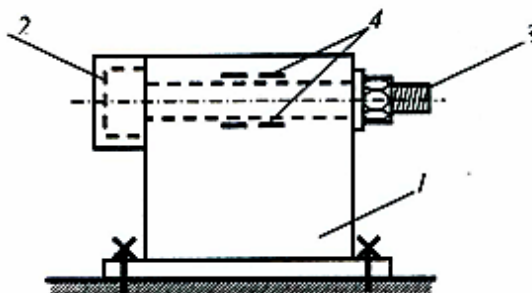


Рис.2. Схема стэнда для испытаний:

1 – коробчатый корпус с отверстиями для болта; 2 – фиксатор головки болта; 3 – болт с гайкой и шайбой; 4 – два тензодатчика, подключенные к измерителю деформаций АИД-4М.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента закручивания.

Значение момента	0	M_1	M_2	M_3
Показания тензорезисторов	C_1^0	C_1^1	C_1^2	C_1^3
	C_2^0	C_2^1	C_2^2	C_2^3
$\sigma_{cp} = \frac{21(C_1^i - C_1^0) + (C_2^i - C_2^0)}{2}$	0	σ_{cp}^1	σ_{cp}^2	σ_{cp}^3
$N = \sigma_{cp}^i \cdot A_{bn}$	0	N_1	N_2	N_3
A_{bn} - площадь сечения болта ($A_{bn}=3,14 \text{ см}^2$)				

Значение коэффициента закручивания:

$$K = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{(N_1 + N_2 + N_3) \cdot d}$$

5. Назначение момента на динамометрическом ключе для постановки запроектированных болтов.

Затяжка болтов в запроектированном соединении осуществляется с усилием (п.14.3.3 [6]):

$$P = R_{bh} \cdot A_{bh} = 0,7 \cdot R_{bun} \cdot A_{bh} = 0,7 \cdot 11000 \cdot 3,14 = 24178 \text{ кг.}$$

Момент при закручивании болта на динамометрическом ключе должен быть равен:

$$M = k \cdot P \cdot d = k \cdot 24178 \cdot 0,02 = 483,6 \text{ к.}$$

6. Контрольные вопросы.

1. Область применения высокопрочных болтов?
2. За счет чего происходит восприятие сдвигающих усилий в соединении на высокопрочных болтах?

3. От каких параметров зависит несущая способность высокопрочных болтов? Дайте развернутый ответ.

4. Для чего нужно определять момент при закручивании высокопрочных болтов динамометрическим ключом?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 (2 ЧАСА)

Расчет и испытание соединений на самосверлящихся винтах (ССВ)

1. Цель работы. Знакомство с расчетными формулами по определению прочности соединений на самосверлящихся винтах и экспериментальное определение фактической несущей способности соединения.

2. Опытные образцы соединения. Для исследования теоретической и фактической прочности соединения на самосверлящихся винтах изготавливается соединение тонкостенных элементов из стальных полос, приведенное на рис. 1.

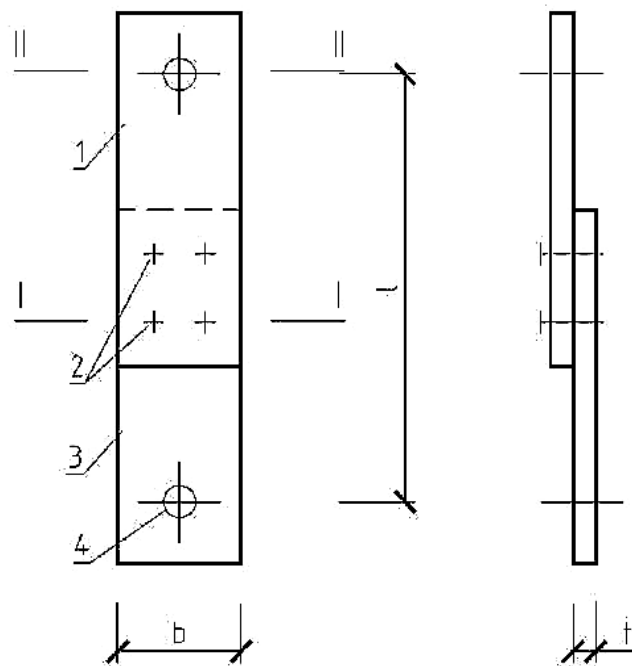


Рис. 1. Образец для испытания:

1 – верхняя стальная полоса; 2 – нижняя стальная полоса; 3 – самосверлящиеся винты; 4 – отверстия для установки образца на испытательном стенде.

Исследуемый образец соединения включает две стальные полосы, объединенные внахлест. Соединение стальных полос между собой осуществляется на самосверлящихся винтах. Диаметр и их количество принимается по фактическому исполнению соединения. Рекомендуется

монтаж соединения выполнять непосредственно перед испытанием образцов. При этом использовать заготовки стальных полос, комплект самосверлящихся винтов диаметром от 4.2 до 6.3 мм и шуруповерт. После монтажа соединения осуществляются замеры его параметров: толщина полос, количество самосверлящихся винтов и их диаметр.

3. Определение теоретической прочности соединения на ССВ.

Для соединения стальных конструкций используются самосверлящиеся самонарезающиеся винты (ССВ) диаметром от 4.2 до 6.3 мм, поставляемые фирмами «SFS» и «HILTI».

Указанные винты должны иметь временное сопротивление не менее 50 кН/см^2 , а твердость на поверхности 560HV (по Викерсу) и цинковое или кадмиевое покрытие толщиной не менее 10 мкм.

Предельное срезающее усилие, воспринимаемое одним ССВ из условия смятия основного металла, определяется по формуле (п.10.1.3 [5]):

$$N_b = \alpha \cdot \frac{R_{un}}{\gamma_m} \cdot d \cdot t, \quad (1)$$

где R_{un} – временное сопротивление стали; d – номинальный диаметр винта; t – толщина более тонкого из соединяемых элементов; γ_m – коэффициент безопасности основного металла; α – коэффициент, определяемый по формуле (табл. 10.1 [5]):

$$\alpha = 3,2 \sqrt{\frac{t}{d}} \leq 2,1, \quad (2)$$

Несущая способность соединения определяется по формуле:

$$[N_T] = 0,8 \cdot n \cdot N_b, \quad (3)$$

где 0,8 – коэффициент условия работы; n – число винтов в соединении.

При этом необходимо проверить и прочность соединяемых стальных полос по сечению I-I и II-II (рис. 1):

$$\sigma_I = \frac{N}{b \cdot t - (t \cdot d) \cdot n} \leq R_y \gamma_c; \quad (4)$$

$$\sigma_{II} = \frac{N}{b \cdot t - t \cdot D} \leq R_y \gamma_c, \quad (5)$$

где n – число винтов в одном поперечном сечении; R_y – расчетное сопротивление материала стальных полос; γ_c – коэффициент условия работы соединения; D – диаметр отверстия в месте крепления (сечение II-II).

4. Экспериментальные исследования.

Определение фактической прочности соединения осуществляется путем испытания образца разрушающей нагрузкой. Испытания соединения осуществляются на специальной установке, общий вид которой приведен на рис. 2.

Образец соединения при помощи цилиндрических шарниров

устанавливается на крепежных устройствах экспериментальной установки (рис. 2). Загружение образца выполняется мерным грузом этапами по $0,2[N_p]$, где $[N_p]$ – расчётная несущая способность соединения:

$$[N_p] = \frac{[N_T] \cdot a}{l}, \text{ [кГ]} \quad (6)$$

Усилие на образец с учетом собственной массы рычага:

$$F = \frac{P \cdot l}{a} + \frac{q \cdot l^2}{2a}, \quad (7)$$

где $q = 14,1 \text{ кг/м}$ – масса одного погонного метра рычага; $l = 212 \text{ см}$ – общая длина рычага; $a = 21 \text{ см}$ – расстояние от опоры рычага до оси образца.

Загружение ведется до разрушения образца. Разрушением образца является отсутствие стабилизации или разрывы в зоне установки винтов.

Экспериментальное значение несущей способности соединения при этом равно:

$$[N_э] = \frac{P \cdot l}{a} + \frac{q \cdot l^2}{2a}, \quad (8)$$

где P – суммарная масса прикладываемого груза (кг); q – масса рычага установки (кг/м).

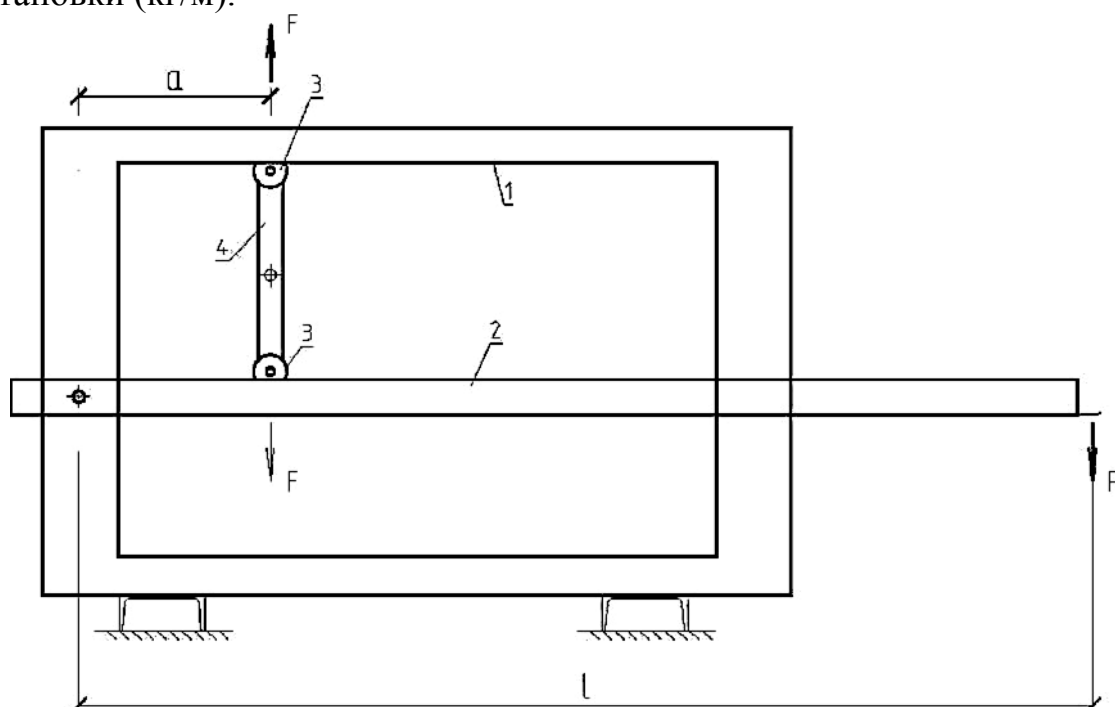


Рис. 2. Схема установки для испытания соединения:

1 – опорная рама; 2 – рычаг; 3 – крепежные устройства; 4 – образец соединения; P – масса прикладываемого груза; F – усилие на образец.

5. Сравнительная оценка результатов.

После проведения экспериментальных исследований выполняется сравнение фактической и теоретической несущей способности с вычислением коэффициента:

$$k = \frac{[N_э]}{[N_T]}, \quad (9)$$

6. Выводы.

Выводы должны содержать констатацию результатов по значению теоретической и практической несущей способности соединения.

7. Контрольные вопросы.

1. Область применения ССВ?
2. Почему прочность соединяемых полос необходимо проверять по двум сечениям?
3. Какие параметры определяют несущую способность ССВ? Дайте развернутый ответ.
4. Опишите характер разрушения испытываемого образца.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 (4 ЧАСА)

Расчет и испытание модели подкрановой балки

1. Цель работы. Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) модели подкрановой балки с использованием тензометрии.

2. Общие сведения.

2.1. Сведения о приборном оснащении лабораторной установки.

При экспериментальном исследовании НДС строительных конструкций или их моделей (лабораторных образцов) используются различные способы регистрации механических напряжений и деформаций в элементах этих конструкций. Прямое (непосредственное) измерение деформаций и напряжений в элементах конструкций крайне затруднительно, поэтому часто используются косвенные методы измерения. В настоящей работе используются косвенные методы измерения напряжений с датчиками, преобразующими механические деформации (удлинение или укорочение) в изменение электрического сопротивления. Такие датчики носят название тензодатчики или тензорезисторы. Они представляют собой подложку с наклеенной на нее проволокой из материала, имеющего высокое удельное сопротивление, например, нихрома, константана и др. Для увеличения чувствительности датчика проволока располагается по подложке «змейкой» (рис.1).

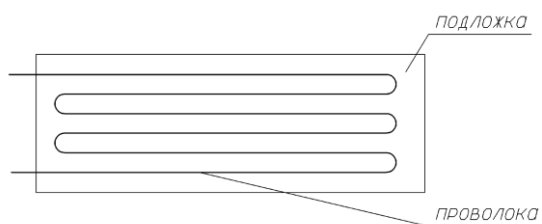


Рис.1. Схема тензодатчика.

Для дальнейшего повышения чувствительности всего измерительного прибора при регистрации полученного сигнала применяется способ измерения с использованием мостовой или полумостовой схемы. Мостовая схема измерения сопротивления представлена на рис. 2. Мост представляет собой соединенные последовательно резисторы (сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , R_a), образующие четыре плеча. Одна из диагоналей этого моста записывается постоянным или переменным током. В другую диагональ подключается регистрирующее устройство (И). Сопротивления моста подбираются так, что бы мост был сбалансирован, т.е. между точками «а» и «б» не было разности потенциалов, и ток через регистрирующее устройство (И) не протекал.

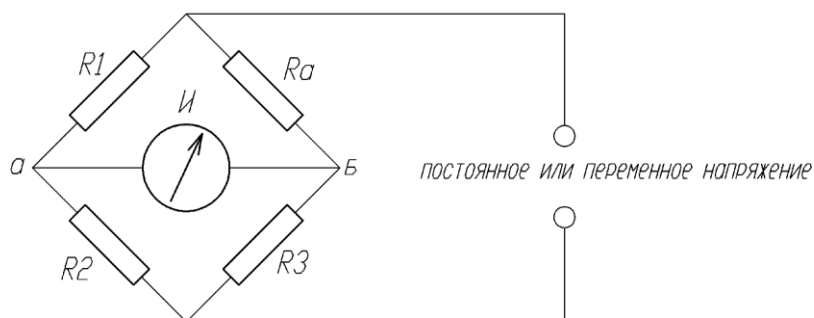


Рис.2. Мостовая схема подключения тензодатчика.

Тензодатчик (на схеме он обозначен R_a) изменяет свое сопротивление, происходит разбалансировка моста, и в регистрирующем устройстве отображается протекание тока. Непосредственная регистрация и отображение сигнала может выполняться аналоговым прибором, например, в простейшем случае стрелочным миллиамперметром или более чувствительным прибором (например, цифровым). Лабораторный комплекс, на котором проводится данная лабораторная работа, оснащен цифровым преобразователем (аналогово-цифровой преобразователь - АЦП), который преобразует аналоговый сигнал (изменение тока в измерительной диагонали моста) в последовательность цифровых значений. Эти цифровые данные затем обрабатываются вычислительным устройством на базе ноутбука и отображаются на экране монитора.

2.2. Сведения об исследуемой строительной конструкции.

Особенностью нагрузки для подкрановой балки является её подвижность, т.е. положение нагрузки на балке может изменяться. Кроме того, нагрузка передается на балку через колеса мостового крана, количество которых на одной стороне крана всегда больше единицы и расстояние между ними определено конструкцией концевых балок. Таким образом, нагрузку на подкрановую балку создают два и более связанных груза, перемещающихся вдоль подкрановой балки.

Модель подкрановой балки, входящей в состав стенда «Модель несущих конструкций промышленного здания», выполнена по неразрезной схеме и представляет собой двух пролетную балку с равными пролетами. Для неразрезных балок определение НДС требует раскрытия статической неопределимости. Такие расчеты выполняются с использованием различных методов (методом сил, методом перемещений, с использованием уравнений трех моментов, методом фокусов и т.д.). При ручных методах расчета неразрезных балок наиболее часто используют линии влияния соответствующих усилий или деформаций. Для такого расчета строится соответствующая линия влияния и по ней находятся необходимые усилия или деформаций путем умножения величин нагрузок на сумму ординат этой линии влияния в местах приложения нагрузок.

3. Устройство стенда.

Конструкция стенда «Модель несущих конструкций промышленного здания» представлена на рис. 3. Исследуемая конструкция – модель подкрановой балки (поз.3) входит в состав модуля «Подкрановая балка» стенда, и располагается на уступах двухступенчатых колонн (поз.6). Сечение подкрановой балки (рис. 4) – двутавр из алюминиевого сплава. Нагрузка создается моделью мостового крана (поз. 10) и передается на подкрановую балку через колеса этого крана (поз. 4). Для изменения нагрузки и моделирования поднимаемого мостовым краном груза используется система подвески (поз. 12) и набор стандартных грузов (поз. 13), укладываемых на подвесе. Кроме того, имеется модель грузовой тележки (поз. 11), при помощи которой можно изменять соотношение нагрузок от мостового крана на опорные колеса при перемещении грузовой тележки вдоль крановой балки (модели мостового крана).

Виды модели здания представлены на рис. 5 и 6.

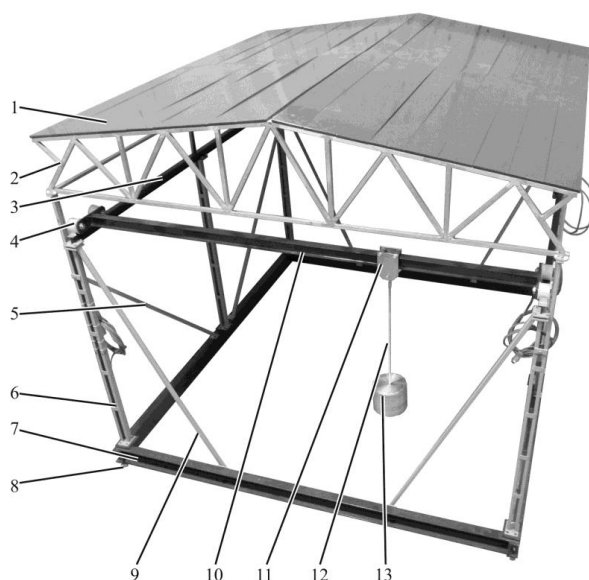


Рис. 3. Общий вид стенда «Модель несущих конструкций промышленного здания».

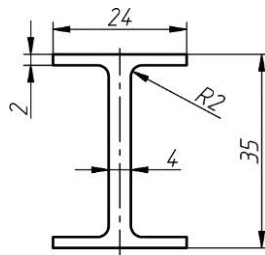


Рис. 4. Сечение модуля «Подкрановая балка».

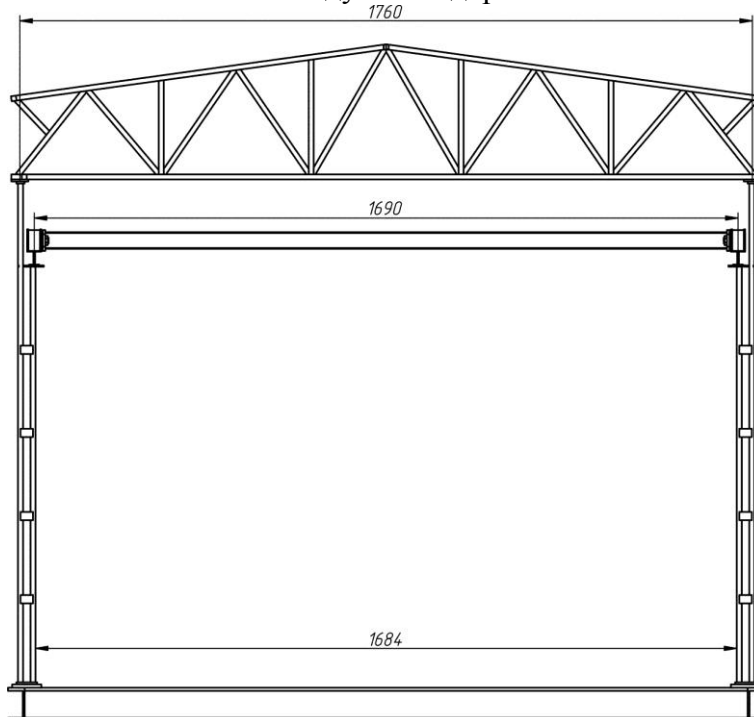


Рис. 5. Модель здания в сборе. Вид спереди.

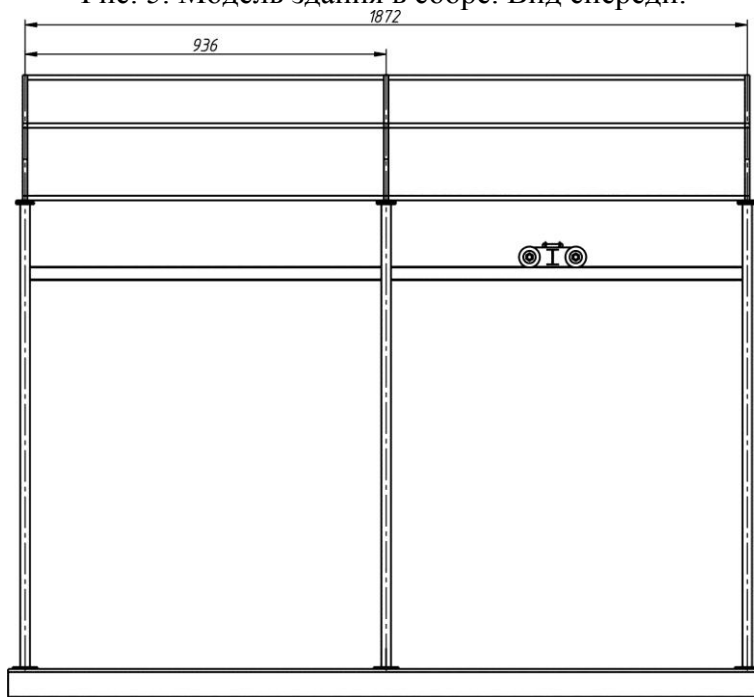


Рис. 6. Модель здания в сборе. Вид сбоку.

Для подключения тензодатчиков к ноутбуку предназначен измерительно-преобразовательный блок 14 с установленной в нем платой АЦП (рис. 7) и наборы кабелей.

На измерительно-преобразовательном блоке 14 установлены:

- разъем 15 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Крановая балка»;
- разъем 16 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Подкрановая балка»;
- светодиод 17 индицирующий включение питания измерительно-преобразовательного блока;
- тумблер 18 для включения питания измерительно-преобразовательного блока;
- разъем 19 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Перекрытие здания»;
- разъем 20 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Колонна здания».

Подсоединение платы АЦП, установленной внутри измерительно-преобразовательного блока 14, к ПЭВМ осуществляется посредством USB кабеля.

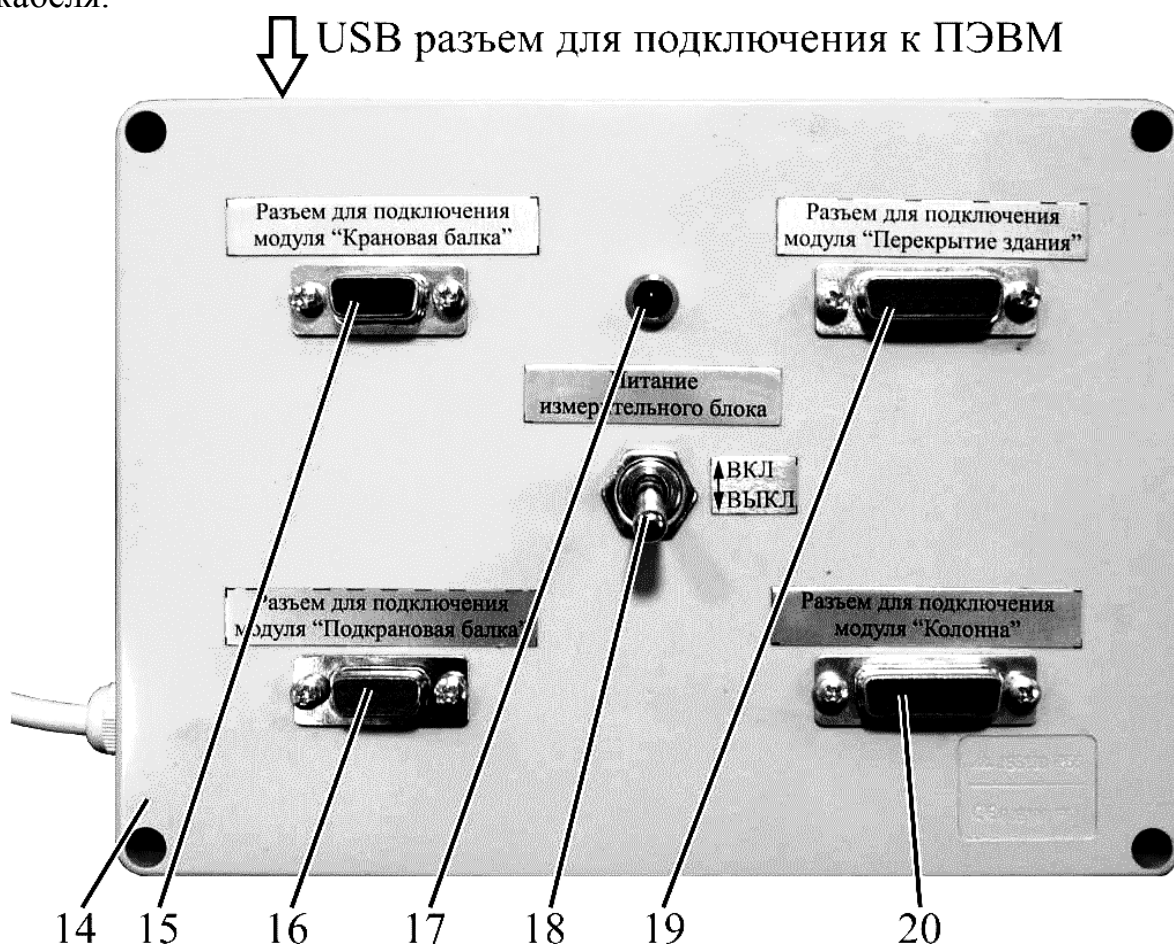


Рис. 7. Измерительно-преобразовательный блок.

4. Порядок выполнения.

В теоретической части.

1. Изучается материал лабораторной работы (пункты 1 (цель работы), 2 (общие сведения), 3 (устройство стенда)).

2. Выполняется статический расчет подкрановой балки с использованием линии влияния. Положение модели мостового крана выбирается либо по указанию преподавателя (в месте наибольшего изгибающего момента), либо определяется студентами с поиском этого положения.

3. Вычисляются напряжения в местах расположения датчиков.

В экспериментальной части.

1. Подвешиваются 4-е пригруза на модель мостового крана. Модель мостового крана перемещается по подкрановой балке с размещением в точках, для которых были вычислены усилия по линиям влияния.

2. Производится снятие показаний с датчиков, установленных на модели подкрановой балки с экрана монитора.

3. Выполняется обработка полученных экспериментальных данных, и вычисляются напряжения в сечении подкрановой балки.

4. Производится анализ напряжений, вычисленных теоретически и полученных экспериментально.

5. Формируются выводы по проведенному анализу НДС подкрановой балки.

Заключительная часть.

1. Лабораторная работа оформляется в рабочей тетради с кратким конспектированием теоретической части, расчетами и результатами выполнения эксперимента. Расчеты сопровождаются необходимыми рисунками, схемами и таблицами.

2. Защищается лабораторная работа. Защита лабораторной работы заключается в ответах на вопросы, которые приведены в разделе 7 данной лабораторной работы и, при необходимости, пояснениями по порядку проведения работы.

5. Теоретическая часть.

Статический расчет неразрезной двухпролетной подкрановой балки на подвижную нагрузку от мостового крана. Крановая нагрузка размещается в середине первого пролета двухпролетной неразрезной балки. Сечение, в котором будет определяться изгибающий момент, располагается в середине первого справа пролета и определяется положением тензодатчиков, наклеенных на модель подкрановой балки. Расчёт выполняется с использованием линий влияния.

Расчетная схема модели подкрановой балки представлена на рис. 8. Она имеет два пролета по 936мм, которые нагружены подвижной системой

из двух грузов P – два колеса модели мостового крана с расстоянием между осями 120мм. Величина груза P определяется положением модели грузовой тележки крана и количеством пригрузов размещаемых на подвесе. При использовании 4-х пригрузов и положении грузовой тележки в середине пролета крановой балки величина P будет равна весу одного пригруза. В лабораторной работе используются стандартные пригрузы весом 2.5 кгс, следовательно величина груза $P = 2,5$ кгс.

При проведении работы необходимо вычислить изгибающий момент в сечении 1 (рис. 8) используя линию влияния для изгибающего момента для пролета 1 (при нумерации пролетов слева) (рис.9, таблица 1).

Для нахождения изгибающего момента подсчитываем сумму ординат линии влияния под связанными грузами P и умножаем её на величину этих грузов. Систему грузов P размещаем так, что бы один груз располагался в середине пролета, а другой был расположен ближе к крайней опоре (рис. 8). Вычисляем сумму ординат линии влияния, находящихся под этими грузами. Затем, умножая полученную сумму ординат на величину груза P , находим значение изгибающего момента для первого слева пролета (в сечении 1). Так, например, для положения первого груза на расстоянии 234мм от левой опоры ордината линии влияния (см. таблицу 1) будет 89.578. В это время второй груз будет находиться на расстоянии 234мм + 120мм = 354 мм и ордината линии влияния под этим грузом будет 139.160. При отсутствии в таблице величины необходимого расстояния (координаты x) ординату вычисляем по линейной интерполяции.

Сумма ординат будет равна $\Sigma y = 89.578 + 139.160 = 228.738$, а величина изгибающего момента будет вычисляться как $M = \Sigma y \cdot P = 228.738 \cdot P$.

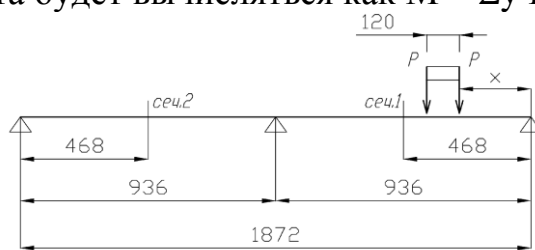


Рис. 8. Расчетная схема подкрановой балки.

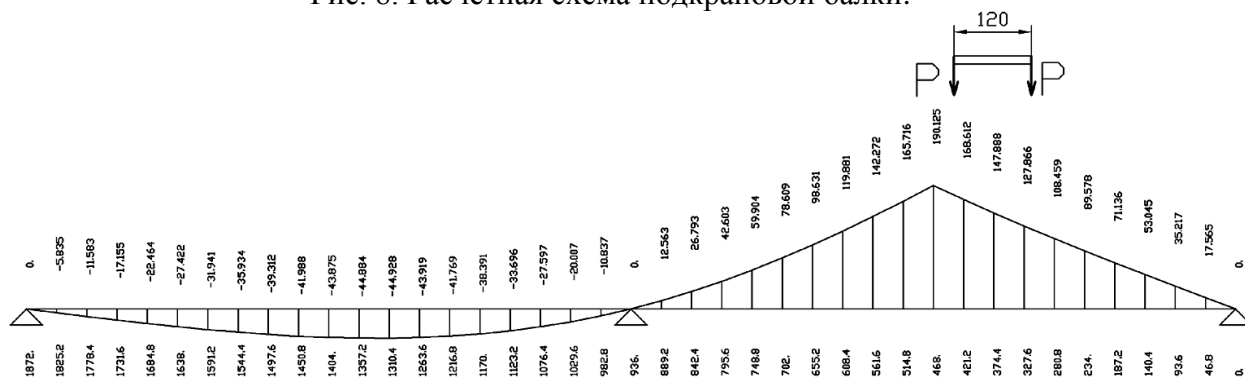


Рис. 9. Линия влияния изгибающего момента при расчете подкрановой балки.

Таблица 1. Таблица линии влияния двухпролетной балки с пролетами по 936мм для изгибающего момента в середине первого и второго пролетов.

Координата x (мм)	Ордината линии влияния	Координата x (мм)	Ордината линии влияния
Линия влияния для пролета 1		Линия влияния для пролета 2	
0	0	0	0
46.8	17.565	46.8	-10.837
93.6	35.217	93.6	-20.007
140.4	53.045	140.4	-27.597
187.2	71.136	187.2	-33.696
234	89.578	234	-38.391
280.8	108.459	280.8	-41.769
327.6	127.866	327.6	-43.919
374.4	147.888	374.4	-44.928
421.2	168.612	421.2	-44.884
468	190.125	468	-43.875
514.8	165.716	514.8	-41.988
561.6	142.272	561.6	-39.312
608.4	119.881	608.4	-35.934
655.2	98.631	655.2	-31.941
702	78.609	702	-27.422
748.8	59.904	748.8	-22.464
795.6	42.603	795.6	-17.155
842.4	26.793	842.4	-11.583
889.2	12.563	889.2	-5.835
936	0	936	0

Для определения напряжений в местах расположения тензодатчиков необходимо вычислить момент инерции двутаврового сечения балки и вычислить нормальные напряжения в соответствующих точках сечения.

При вычислении момента инерции двутаврового сечения пренебрегаем скруглениями в местах перехода стенки к полкам и вычисляем его как для сложного сечения, состоящего из трех прямоугольников (рис. 10).

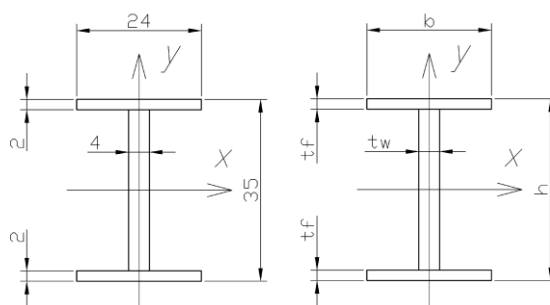


Рис. 10. Сечение подкрановой балки для вычисления геометрических характеристик.

$$J_x = \frac{tw \cdot (h - 2tf)^2}{12} + 2 \cdot \left(\frac{b \cdot tf^2}{12} + b \cdot tf \cdot \left(\frac{h - tf}{2} \right)^2 \right) = 3.61 \text{ см}^4, \quad (1)$$

Напряжения в точках, где установлены датчики, находим, используя соотношение:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{J_x}, \quad (2)$$

здесь M – изгибающий момент в сечении; J_x – момент инерции сечения; $y = 1.55 \text{ см}$ – расстояние от центра тяжести сечения до точки, в которой находится нормальное напряжение.

Положение датчиков в сечении подкрановой балки показано на рис. 11.

После вычисления напряжений в точках расположения датчиков заполняется таблица 2.

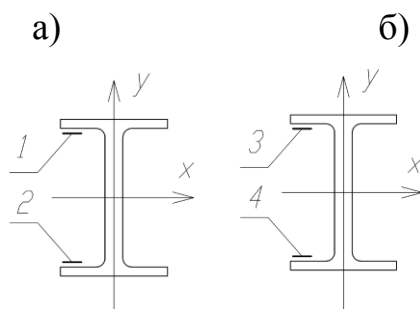


Рис. 11. Схема расположения датчиков по сечению подкрановой балки: а) размещение датчиков в сечении 1; б) размещение датчиков в сечении 2.

Таблица 2. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных напряжений в подкрановой балке.

№ датчика	Изгибающий момент (кгс*см)	Напряжения теоретические (кгс/см ²)	Показания датчиков	Напряжения по измерениям (кгс/см ²)	Процент ошибки
В положении мостового крана при максимальном изгибающем моменте (на расстоянии ____ мм от правой опоры)					
1					
2					
3					
4					
Произвольное положение мостового крана (на расстоянии ____ мм от правой опоры)					
1					

2					
3					
4					

6. Экспериментальная часть.

1. Включается питание измерительно-преобразовательного блока и в течение 15-20 минут прогреваются тензодатчики и усилители.

2. На компьютере запускается программа «МКПЗ измерения». При запуске программы на экране появляется окно, показанное на рисунке 12.

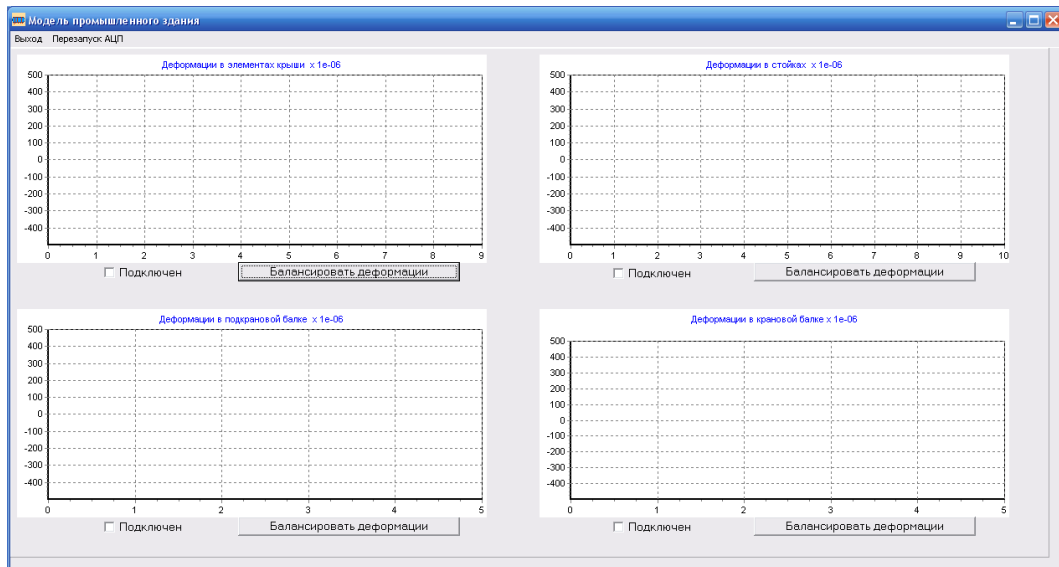


Рис. 12. Диалоговое окно программы при запуске.

3. Ставится галочка в поле «Подключен» под диаграммой «Деформации в подкрановой балке» - рис. 13.



Рис. 13. Диаграмма деформаций в подкрановой балке.

4. Производится балансировка сигнала с тензодатчиков, установленных на модуле «Подкрановая балка» нажатием на кнопку «Балансировать деформации» (рис. 14).



Рис. 14. Балансировка датчиков модуля «Подкрановая балка».

5. Контролируется выход датчиков и усилителей на стационарный тепловой режим, при этом после балансировки изменение показаний тензорезисторов на экране монитора не должны меняться более чем на 3 единицы в течение 5 минут. В противном случае проводится повторная балансировка, и ожидание в течение еще 5 минут.

6. Устанавливаются на подвесе (поз.12, рис. 3) четыре груза, грузовая тележка модели мостового крана располагается в середине крановой балки, и модель мостового крана передвигается по подкрановой балке в положение, для которого был вычислен изгибающий момент в пролете №1 в теоретической части работы.

7. Заносятся показания тензодатчиков в таблицу 2. Показания соответствуют относительным деформациям с учетом усиления измерительного комплекса в 10^6 (знак плюс соответствует растяжению, знак минус – сжатию в местах установки датчиков). Положение тензодатчиков на балке представлено на рис. 15.

8. Выполняется выход из программы, выбирая пункт верхнего меню «Выход», при этом появляется запрос на подтверждения выхода из программы. Нажатием на кнопку «ОК» подтверждаем выход, в противном случае нажимаем на кнопку «Отмена».

9. Выполняется пересчет показаний деформаций, записанных в таблицу 1, с учетом масштаба деформаций равного 10^{-6} (указан над диаграммой в диалоговом окне программы на ноутбуке), модуля упругости

для алюминия ($E=0.71 \cdot 10^6$ кгс/см²) и тарировочного коэффициента (коэффициента чувствительности) тензодатчиков $k=1.55$.

10. Выполняется сравнение теоретических значений напряжений в соответствующих точках сечения подкрановой балки с измеренными экспериментально. Вычисляются погрешности измерений в процентах:

$$\frac{\sigma_T - \sigma_{\text{э}}}{\sigma_T} \cdot 100\%.$$

11. Формулируются выводы по работе.

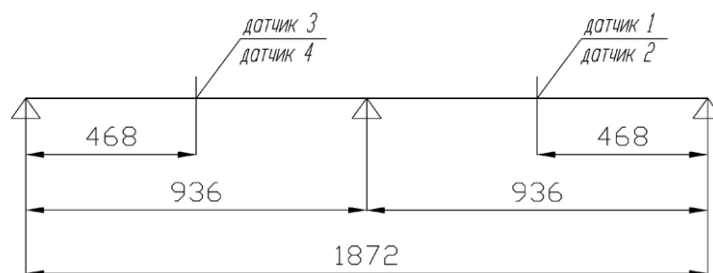


Рис. 15. Схема расположения датчиков на подкрановой балке.

7. Контрольные вопросы.

1. Как называются датчики, используемые в данной лабораторной работе?

2. Что измеряется датчиками, используемыми в данной лабораторной работе?

3. Как экспериментально определяются напряжения в строительных конструкциях?

4. В чем особенность нагрузок на подкрановую балку?

5. В чем заключаются особенности статического расчета неразрезных балок?

6. Какие методы используются при статическом расчете неразрезных балок?

7. Как вычисляются усилия и деформации с использованием линий влияния?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 (4 ЧАСА)

Расчет и испытание модели фермы покрытия здания

1. Цель работы. Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) модели фермы, при различных вариантах приложения временных нагрузок.

2. Общие сведения.

2.1. Сведения о приборном оснащении лабораторной установки.

При экспериментальном исследовании НДС используется тензометрический метод. Датчиками являются тензорезисторы. В качестве измерительного прибора при регистрации полученного сигнала от датчика применяется мостовая схема измерения сопротивления входящая в состав лабораторного комплекса, на котором проводится данная лабораторная работа. Комплекс оснащен цифровым преобразователем (аналогово-цифровой преобразователь – АЦП) и программным обеспечением для визуализации регистрируемых величин. Более подробно о приборном оснащении описано в лабораторной работе №9.

2.2. Сведения об исследуемой строительной конструкции.

Фермы покрытий зданий с точки зрения строительной механики являются статически определимыми системами. В таких конструкциях деформации и усилия (а, следовательно, и напряжения) в ее элементах зависят только от внешних нагрузок и топологии (взаимного расположения элементов в этой конструкции).

3. Устройство стенда.

Конструкция стенда «Модель несущих конструкций промышленного здания» представлена на рис. 1. Исследуемая конструкция – модель фермы (поз.2) входит в состав модуля «Перекрытие здания» модели каркаса промышленного здания, и располагается на колоннах (поз.6). Нагрузка моделируется грузами (поз.1), выполненными в форме полос. Основные размеры фермы представлены на рис. 2. Сечение всех элементов фермы – алюминиевая профильная труба 12x12x1,2мм.

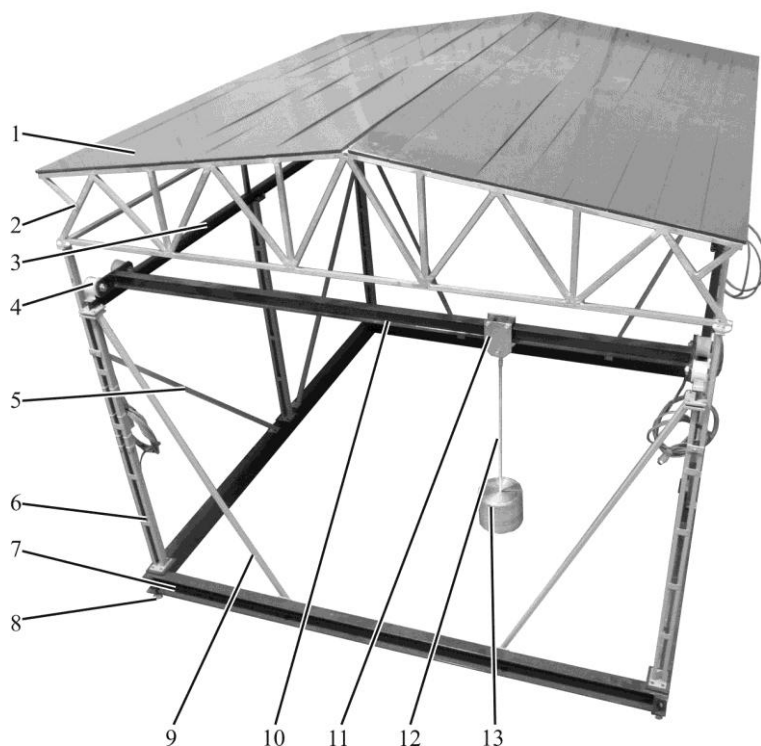


Рис. 1. Общий вид стенда «Модель несущих конструкций промышленного здания».

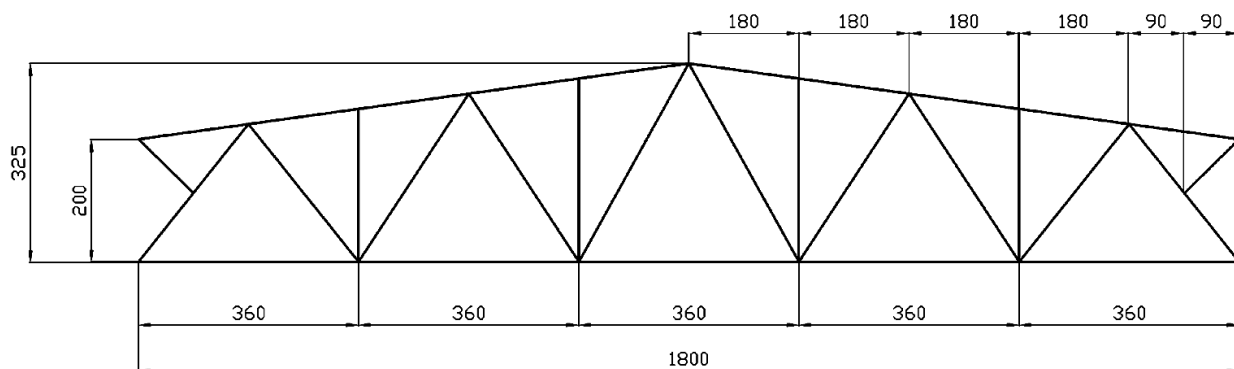


Рис. 2. Размеры несущей фермы (в мм) модуля «Перекрытие здания».

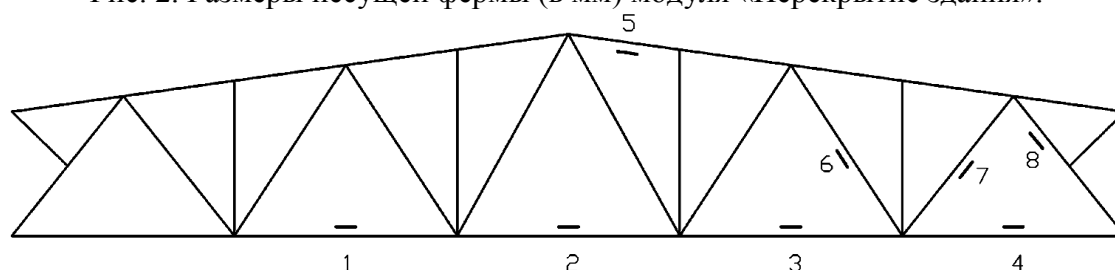


Рис. 3. Схема расположения датчиков на стержнях средней фермы.

Для подключения тензодатчиков к ПЭВМ (ноутбук) предназначен измерительно-преобразовательный блок 14 с установленной в нем платой АЦП (рис. 4).

На измерительно-преобразовательном блоке 14 установлены:

- разъем 15 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Крановая балка»;
- разъем 16 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Подкрановая балка»;
- светодиод 17 индицирующий включение питания измерительно-преобразовательного блока;
- тумблер 18 для включения питания измерительно преобразовательного блока;
- разъем 19 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Перекрытие здания»;
- разъем 20 для подключения тензорезисторов, установленных на модуле «Колонна здания».

Подсоединение платы АЦП, установленной внутри измерительно-преобразовательного блока 14, к ПЭВМ осуществляется посредством USB кабеля.

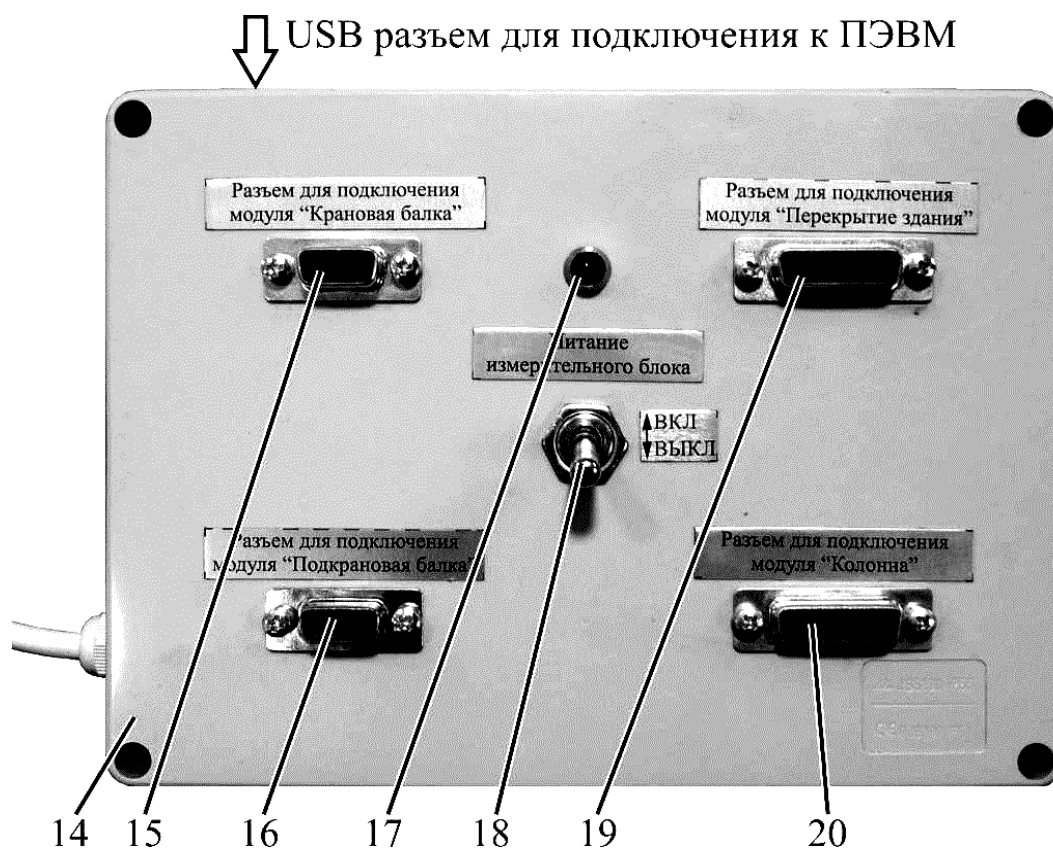


Рис. 4. Измерительно-преобразовательный блок.

4. Порядок выполнения.

Теоретическая часть.

1. Изучается материал лабораторной работы (пункты 1 (цель работы), 2 (общие сведения), 3 (устройство стенда)).

2. Выполняется статический расчет фермы. В расчете принимается постоянная нагрузка от собственного веса кровли, приложенная на всем пролете фермы.

3. Вычисляются напряжения в стержнях фермы.

Экспериментальная часть.

1. Выполняется загрузка модели покрытия полосовыми грузами, моделирующими постоянную нагрузку от собственного веса кровли, полностью или частично по указанию преподавателя.

2. Производится снятие показаний с датчиков, установленных на модели средней фермы, с экрана монитора.

3. Выполняется обработка полученных экспериментальных данных, и вычисляются напряжения в стержнях фермы.

4. Производится анализ напряжений в стержнях фермы, вычисленных теоретически и полученных экспериментально.

5. Формируются выводы по проведенному анализу НДС фермы.

Заключительная часть.

1. Лабораторная работа оформляется в рабочей тетради с кратким конспектированием теоретической части, расчетами и результатами выполнения эксперимента. Расчеты сопровождаются необходимыми рисунками, схемами и таблицами.

2. Защищается лабораторная работа. Защита лабораторной работы заключается в ответах на вопросы, которые приведены в разделе 5 данной лабораторной работы и, при необходимости, пояснениями по порядку проведения работы.

5. Теоретическая часть.

Статический расчет фермы на постоянную нагрузку от собственного веса покрытия выполняется с использованием методов механики (метод вырезания узлов, метод сечения и т.д.). Для выполнения статического расчета составляется расчетная схема фермы (рис. 5). Узловое соединение стержней фермы принимаются шарнирным. Нагрузка от полосовых грузов на верхний пояс ферм передается в виде распределенной нагрузки. Вес каждого груза составляет 5.8кгс, ширина полос 100мм. Распределенная нагрузка приводится к узловой. Представленная ферма имеет «шпренгели»- дополнительные элементы, образующие небольшую ферму, входящую в состав основной фермы. Эти шпренгели при ручном расчёте должны рассматриваться отдельно, выделенными из состава исходной фермы (рис. 6). Разделение на основную ферму и шпренгели представлены на рис. 7.

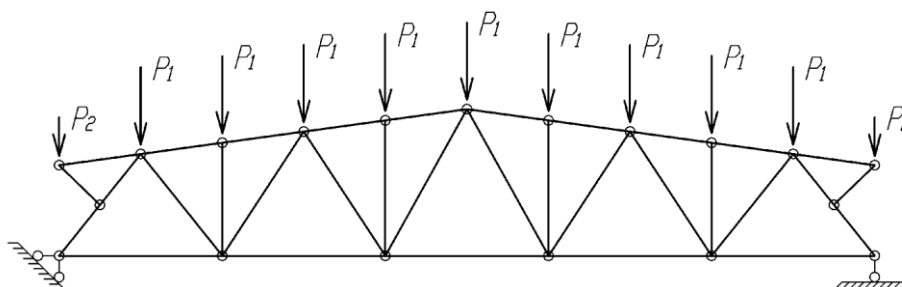


Рис. 5. Расчетная схема фермы с нагрузкой от собственного веса кровли.

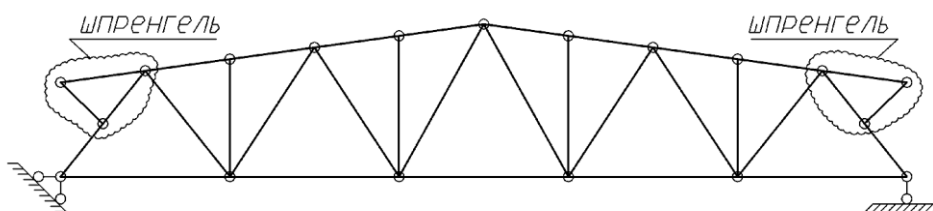


Рис. 6. Вычисление шпренгелей из расчетной схемы исходной фермы.

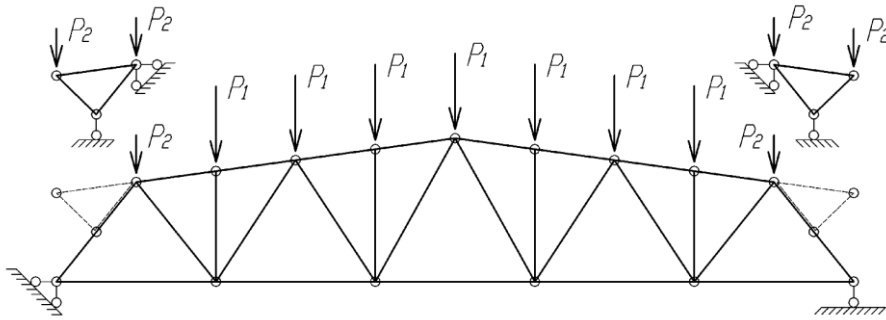


Рис. 7. Расчетная схема основной фермы и расчетные схемы шпренгелей с нагрузкой от собственного веса кровли.

Далее для основной фермы вычисляются опорные реакции R . Опоры заменяются этими реакциями и находятся усилия в стержнях. На рис.8 представлены возможные сечения и вырез узла для составления уравнений при нахождении усилий в стержнях основной фермы. Вычисляются усилия только в стержнях, в которых установлены датчики. Расположение датчиков в лабораторной модели фермы и их нумерация приведены на рис. 3. Нумерация стержней, на которых установлены датчики, приведена на рис. 8.

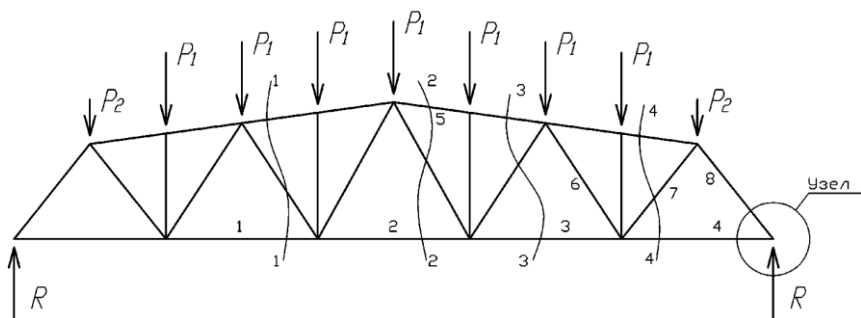


Рис. 8. Возможные сечения и вырез узла при статическом расчете основной фермы.

Рассмотрим способ сечений для нахождения усилия в стержне №1. Проводим сечение 1-1 (рис. 8 и 9).

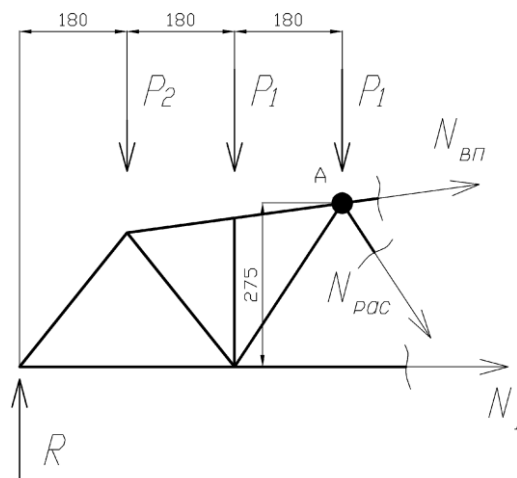


Рис. 9. К нахождению усилия в стержне №1.

Для нахождения усилия в стержне 1 (N_1) составляем уравнение моментов относительно точки «А»:

$$\Sigma M_A = 0; P_2 \cdot 2 \cdot 180 + P_1 \cdot 180 - R \cdot 3 \cdot 180 + N_1 \cdot 275 = 0.$$

Неизвестные усилия в стержнях верхнего пояса ($N_{\text{вп}}$) и в раскосе ($N_{\text{рас}}$) относительно этой точки не создают моментов, остаются только внешняя нагрузка, опорная реакция и неизвестное усилие в стержне №1 (N_1). Учитываем, что расстояние по горизонтали между узлами верхнего пояса одинаковы и составляют 180мм, а расстояние от нижнего пояса до точки «А» 275мм.

Из этого уравнения моментов находим неизвестное усилие:

$$N_1 = \frac{R \cdot 3 \cdot 180 - P_2 \cdot 2 \cdot 180 - P_1 \cdot 180}{275}.$$

Аналогично выполняем расчет по сечению 2-2 (рис. 10), при рассмотрении которого требуется найти только два неизвестных усилия N_2 и N_5 .

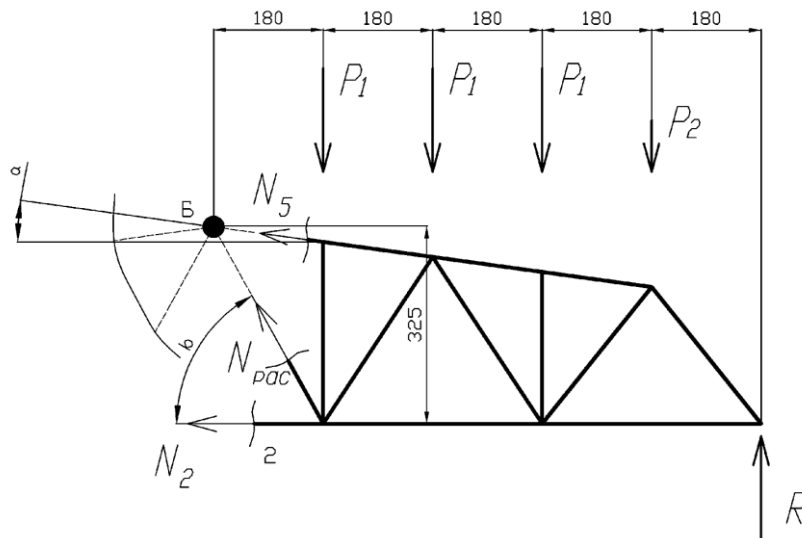


Рис. 10. К нахождению усилий в стержнях № 2 и 5.

Вначале записываем сумму моментов относительно точки «Б»:

$$\Sigma M_B = 0; R \cdot 5 \cdot 180 - P_2 \cdot 4 \cdot 180 - P_1 \cdot (3+2+1) \cdot 180 - N_2 \cdot 325 = 0.$$

Далее находим неизвестное усилие в стержне №2 (N_2):

$$N_2 = \frac{R \cdot 5 \cdot 180 - P_2 \cdot 4 \cdot 180 - P_1 \cdot 6 \cdot 180}{325}.$$

Затем составляем сумму проекций на ось X:

$$\Sigma X = 0; -N_5 \cdot \cos(a) - N_2 - N_{\text{рас}} \cdot \cos(b) = 0.$$

Выражаем неизвестное усилие $N_{\text{рас}}$:

$$N_{\text{рас}} \cdot \cos(b) = -N_5 \cdot \cos(a) - N_2;$$

$$N_{\text{рас}} = \frac{-N_5 \cdot \cos(a) - N_2}{\cos(b)}.$$

Далее составляем сумму проекций на ось Y:

$$\Sigma Y = 0; -3 \cdot P_1 - P_2 + R + N_5 \cdot \sin(a) + N_{\text{рас}} \cdot \sin(b) = 0.$$

Из которого находим неизвестное усилие N_5 , подставляя выражение для $N_{рас}$, найденное ранее:

$$-3 \cdot P_1 - P_2 + R + N_5 \cdot \sin(a) + \left(\frac{-N_5 \cdot \cos(a) - N_2}{\cos(b)} \right) \cdot \sin(b) = 0;$$

$$N_5 \cdot \left(\sin(b) \cdot \frac{\cos(a)}{\cos(b)} - \sin(a) \right) = R - 3 \cdot P_1 - P_2 - N_2 \cdot \frac{\sin(b)}{\cos(b)};$$

$$N_5 = \frac{R - 3 \cdot P_1 - P_2 - N_2 \cdot \frac{\sin(b)}{\cos(b)}}{\sin(b) \cdot \frac{\cos(a)}{\cos(b)} - \sin(a)}.$$

Рассмотрим способ вырезания узла для нахождения усилия в стержне №4 (N_4). Вырезаем узел 1 (рис. 11).

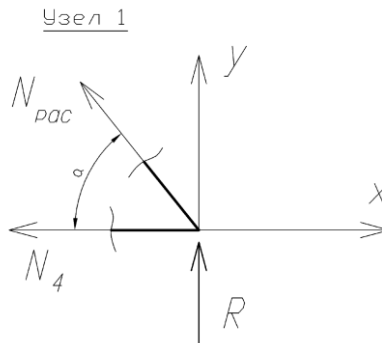


Рис. 11. К нахождению усилия в стержне №4.

Составляем сумму проекций на ось Y:

$$R + N_{рас} \cdot \sin(a) = 0,$$

и выражаем неизвестное $N_{рас}$:

$$N_{рас} = \frac{-R}{\sin(a)}.$$

Составляем сумму проекций на ось X:

$$-N_4 - N_{рас} \cdot \cos(a) = 0.$$

Подставляем выражение для $N_{рас}$ и получаем выражение для нахождения неизвестного N_4 :

$$N_4 = -N_{рас} \cdot \cos(a) = \frac{R}{\sin(a)} \cdot \cos(a).$$

Таким образом, находим усилия в стержнях 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 основной фермы.

Для получения усилия в стержне 8 исходной фермы (фермы со шпренгелями) необходимо учесть влияние шпренгеля на участок стержня основной фермы, входящего в состав шпренгеля. Для этого к полученному усилию в основной ферме необходимо добавить усилие, полученное из расчета шпренгеля.

Выполним расчет шпренгеля. Расчетная схема шпренгеля представлена на рис. 12. В начале определяем опорные реакции, в нашем

случае достаточно найти только реакцию в правой опоре ($R_{шпр.пр.}$), для чего составляем уравнение моментов относительно левой опоры.

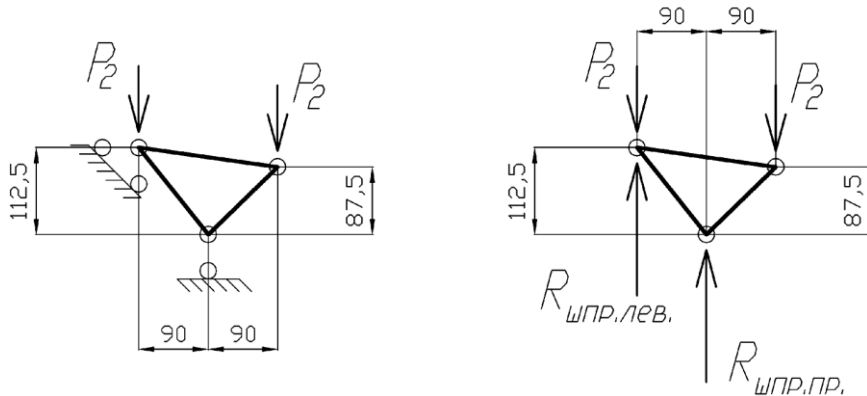


Рис. 12. Расчетная схема шпренгеля.

Для расчета усилий в элементах шпренгеля применим метод вырезания узлов. Вырежем правый опорный узел шпренгеля (рис. 13).

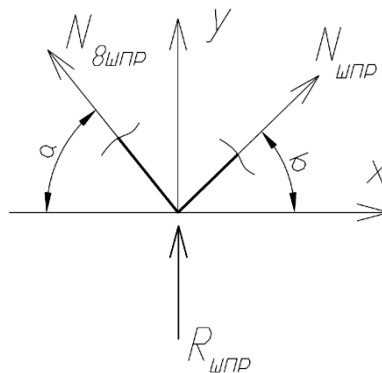


Рис. 13. К определению усилий в элементах шпренгеля.

Составим уравнение равновесия в проекциях на ось X:

$$\Sigma X = 0; -N_{8шпр} \cdot \cos(a) + N_{шпр} \cdot \cos(b) = 0.$$

Из которого выразим неизвестное усилие $N_{шпр}$:

$$N_{шпр} = N_{8шпр} \cdot \frac{\cos(a)}{\cos(b)}.$$

Затем запишем сумму проекций на ось Y:

$$\Sigma Y = 0; R_{шпр.пр.} + N_{8шпр} \cdot \sin(a) + N_{шпр} \cdot \sin(b) = 0.$$

Подставим в него выражение для $N_{шпр}$, найденное ранее:

$$R_{шпр.пр.} + N_{8шпр} \cdot \sin(a) + N_{8шпр} \cdot \sin(b) \cdot \frac{\cos(a)}{\cos(b)} = 0.$$

Из полученного выражения найдем неизвестное усилие $N_{8шпр}$:

$$N_{8шпр} = \frac{-R_{шпр.пр.}}{\sin(a) + \sin(b) \cdot \frac{\cos(a)}{\cos(b)}}.$$

Окончательно усилие в стержне 8 исходной фермы получим суммированием усилия в стержне 8 (N_8) основной фермы и усилия в стержне шпренгеля ($N_{8шпр}$).

При выполнении статического расчета фермы возможно использование готовых результатов от единичных нагрузок, приведенных в таблице 1.

При использовании таблицы 1 усилие в соответствующем стержне вычисляем следующим образом:

Узловая нагрузка $P_1 = 10.44\text{кгс}$, усилие в стержне с датчиком №1 при нагружении фермы на всем пролете равно $0.125 \cdot 10.44\text{кгс} = 1.305\text{кгс}$.

Для вычисления напряжений в стержнях находим площадь поперечного сечения стержней фермы. Сечение выполнено из алюминиевой профильной трубы с внешними размерами $12 \times 12\text{мм}$ и толщиной стенки 1.2мм (рис. 14). Площадь сечения $A = 51.84\text{мм}^2 = 0.5184\text{см}^2$.

Напряжения в стержне с датчиком №1 при нагружении фермы на всем пролете равно $1.305\text{кгс} / 0.5184\text{см}^2 = 2.517\text{кгс/см}^2$.

Таблица 1. Усилия в стержнях фермы от единичной узловой нагрузки.

№ стержня с датчиком	Коэффициенты при нагружении фермы			
	на четверти справа	на половине пролета	на 3/4 пролета	на всем пролете
1	0.007078	0.044248	0.108667	0.125
2	0.010091	0.063587	0.117084	0.127
3	0.016625	0.081045	0.118214	0.125
4	0.019857	0.04764	0.06257	0.065
5	-0.013069	-0.075342	-0.120979	- 0.130
6	0.007908	-0.016739	-0.034656	- 0.038
7	0.001759	0.038798	0.058691	0.062
8	-0.029189	-0.070748	-0.093072	- 0.097

Результаты расчетов (усилия и напряжения в стержнях) заносим в таблицу 2, которую будем дополнять результатами проведенного эксперимента.

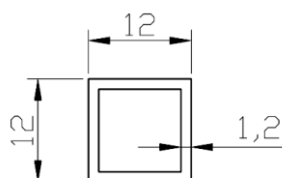


Рис. 14. Поперечное сечение стержней фермы.

Таблица 2. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных напряжений в стержнях фермы.

№ стержня	Усилие N (кгс)	Напряжения теоретические (кгс/см ²)	Показания датчиков	Напряжения по измерениям (кгс/см ²)	Процент ошибки
Нагрузка на четверти пролета справа					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
Нагрузка на половине пролета					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
Нагрузка на всем пролете					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

6. Экспериментальная часть.

1. На измерительно-преобразовательном блоке (рис. 4) подключается кабель от модуля «Перекрытие здания» к разъему для подключения модуля «Перекрытие здания» (поз. 19 на рис. 4).

2. Включается измерительный блок. Тумблер «Питание измерительного блока» (поз.19 на рис. 4) переводится в положение «ВКЛ». После включения питания измерительно-преобразовательного блока

необходимо выждать 15-20 минут для прогрева тензодатчиков и усилителей.

3. На ноутбуке запускается программа «МКПЗ измерения». При запуске программы на экране появляется окно, показанное на рис. 15. В диалоговом окне программы (рис. 15) расположено четыре графических поля, в которых отображаются текущие значения относительных деформаций, определяемые тензорезисторами.

4. Производится балансировка сигнала с тензодатчиков, установленных на модуле «Перекрытие здания». Для этого под диаграммой «Деформации в элементах крыши» в поле «подключен» нажатием левой кнопки на мышке установить галочку и нажать на кнопку «Балансировать деформации». Этим мы исключаем влияние собственного веса самой фермы.

5. Далее контролируется выход датчиков и усилителей на стационарный тепловой режим: после балансировки изменение показаний тензорезисторов по программе не должны меняться более чем на 3 единицы в течение 5 минут. В противном случае провести повторную балансировку и выждать еще 5 минут.

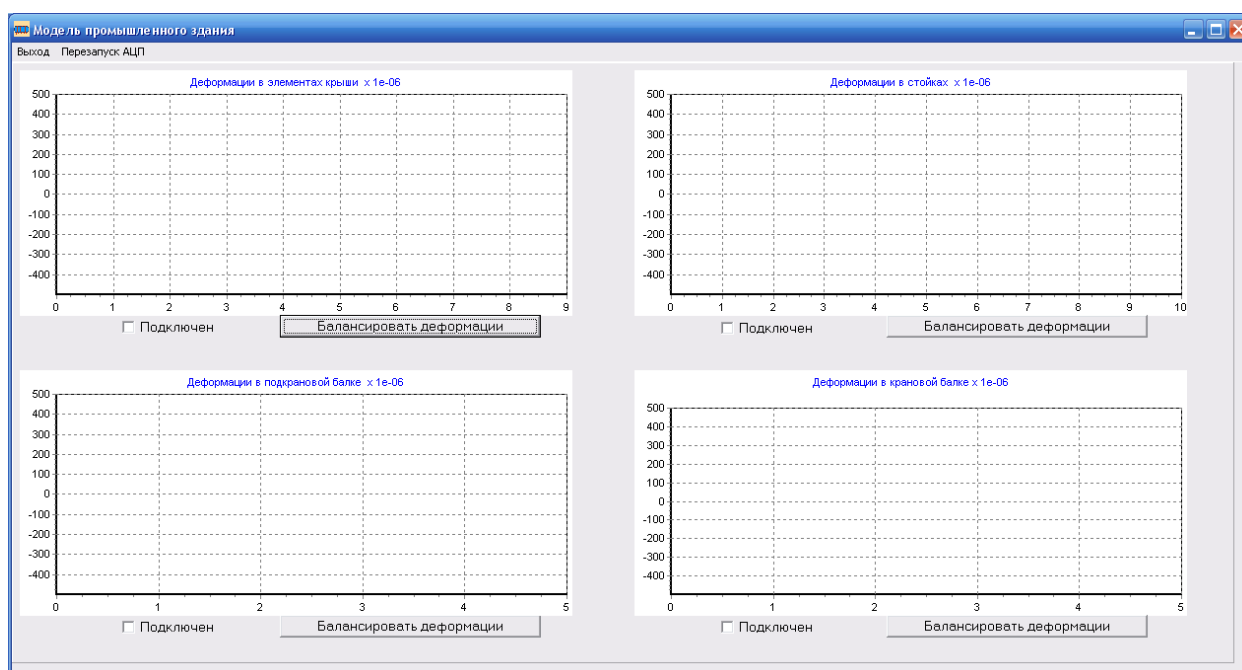


Рис. 15. Диалоговое окно программы «МКПЗ измерения» при ее запуске.

6. Выполняется загрузка модели покрытия грузами, моделирующими нагрузку – устанавливаются полосы начиная с правого края фермы (рис. 1). При укладке грузов необходимо располагать грузы так, чтобы упоры, установленные на грузах, оказывались между несущими фермами, кроме того, грузы следует укладывать отверстием к крайней ферме.

7. Заносятся показания тензодатчиков в таблицу 1. Показания соответствуют относительным деформациям с учетом усиления измерительного комплекса в 10^6 (знак плюс соответствует удлинению, знак минус – укорочению соответствующего стержня).

8. Выходят из программы выбирая пункт верхнего меню «Выход» при этом появляется запрос на подтверждения выхода из программы. Нажатием на кнопку «ОК» подтверждаем выход, в противном случае нажимаем на кнопку «Отмена».

9. Выполняется пересчет показаний деформаций записанных в таблицу 1 с учетом масштаба деформаций, равного 10^{-6} (указан над диаграммой в диалоговом окне программы на ноутбуке), модуля упругости для алюминия ($E=0.71 \cdot 10^6$ кгс/см²) и тарировочного коэффициента (коэффициента чувствительности) тензодатчиков $k=1.55$.

10. Выполняется сравнение теоретических значений напряжений в стержнях фермы с экспериментально измеренными. Вычисляются погрешности измерений в процентах:

$$\xi = \frac{\sigma_T - \sigma_{\text{э}}}{\sigma_T} \cdot 100\%.$$

11. Формулируются выводы по работе.

7. Контрольные вопросы.

1. На чем основан принцип регистрации деформаций при использовании тензометрического датчика?

2. Как устроен тензорезистор?

3. Какие существуют способы регистрации сигналов от тензодатчиков?

4. Какое устройство используется для преобразование аналогового сигнала от тензодатчика в цифровой вид?

5. Как полученные показания деформаций переводят в напряжения?

6. Почему чаще всего применяют косвенные способы измерения напряжений и деформаций в строительных конструкциях?

7. Что определяется (вычисляется) при статическом расчете ферм?

8. Какие методы механики используются при ручном методе статического расчета ферм?

9. Как находят усилия в стержнях ферм при наличии шпренгелей?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 (4 ЧАСА)

Изучение действительной пространственной работы каркаса промышленного здания

1. Цель работы. Изучение действительной пространственной работы каркаса промышленного здания при нежёсткой и жёсткой кровле на действие сосредоточенных горизонтальных нагрузок.

2. Задачи работы.

2.1. Теоретическое и экспериментальное определение значений коэффициента пространственной работы модели каркаса при нежёсткой кровле и сравнение их между собой.

2.2. Теоретическое и экспериментальное определение значений коэффициента пространственной работы модели каркаса при жёсткой кровле и сравнение их между собой.

3. Общие положения. Сосредоточенная горизонтальная нагрузка P от мостовых кранов или другого оборудования, действующая на какую-либо отдельно стоящую поперечную раму каркаса, смещает её ригель в горизонтальном направлении на величину Δ (рис. 1).

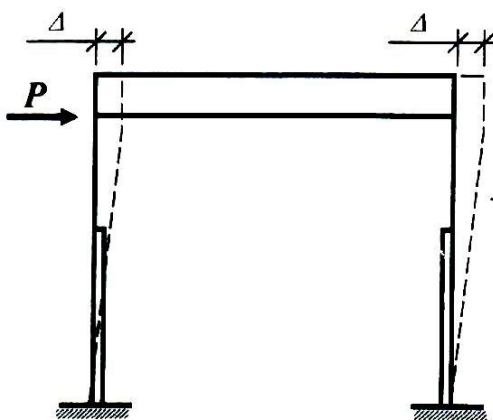


Рис. 1 Схема рамы

В пространственном каркасе все рамы связаны между собой конструкциями кровельного ограждения (железобетонные плиты, стальной профилированный настил и др.), а также специальной системой связей. В таком каркасе сосредоточенная нагрузка P , благодаря наличию связей, воспринимается всеми рамами. Вследствие этого перемещение отдельной рамы, к которой приложена нагрузка P , будет меньше и равно Δ_{np} (рис. 2).

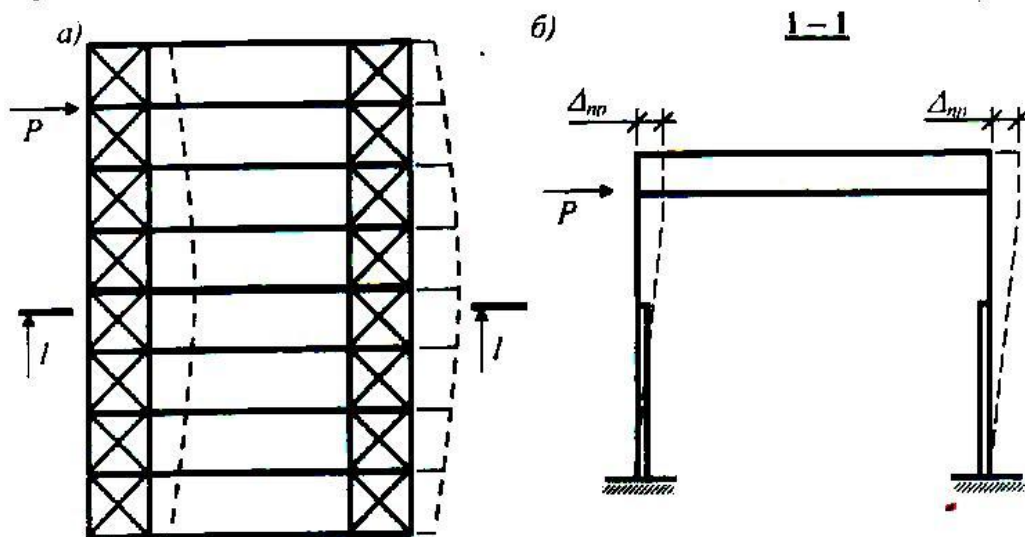


Рис.2. Схема перемещений рам в пространственном каркасе:
а) план каркаса; б) разрез 1-1.

Отношение:

$$\alpha_{np} = \frac{\Delta_{np}}{\Delta} . \quad (1)$$

называется коэффициентом пространственной работы каркаса. Он характеризует степень снижения нагрузки, действующей на отдельную раму, за счёт перераспределения её на соседние рамы, т.е.:

$$R_{np} = \alpha_{np} \cdot P, \quad (2)$$

где R_{np} – нагрузка, действующая на отдельную раму в пространственном каркасе.

В зависимости от конструкции кровельного ограждения различают два способа пространственной работы каркаса:

а) при лёгкой кровле, например, из стального профилированного настила по прогонам, когда пространственная работа каркаса обеспечивается только за счёт крестовых горизонтальных связей (рис. 2);

б) при жёсткой кровле из крупноразмерных железобетонных плит, когда пространственная работа каркаса обеспечивается жёстким диском, образованным из этих плит.

4. Описание лабораторной установки.

Лабораторная установка представляет собой модель температурного блока каркаса (рис. 3) из пяти поперечных рам K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 . Ступенчатые колонны жёстко закреплены в основании и жёстко сопряжены с ригелями, выполненными из пластин прямоугольного сечения. Горизонтальные продольные связи для лёгкой кровли выполнены из стальных пластин, которые прикрепляются к верхним концам колонн на болтах. Жёсткий диск, моделирующий жёсткую кровлю, выполнен в виде рамки с диагональными распорками, крепящейся также к верхним концам колонн на болтах.

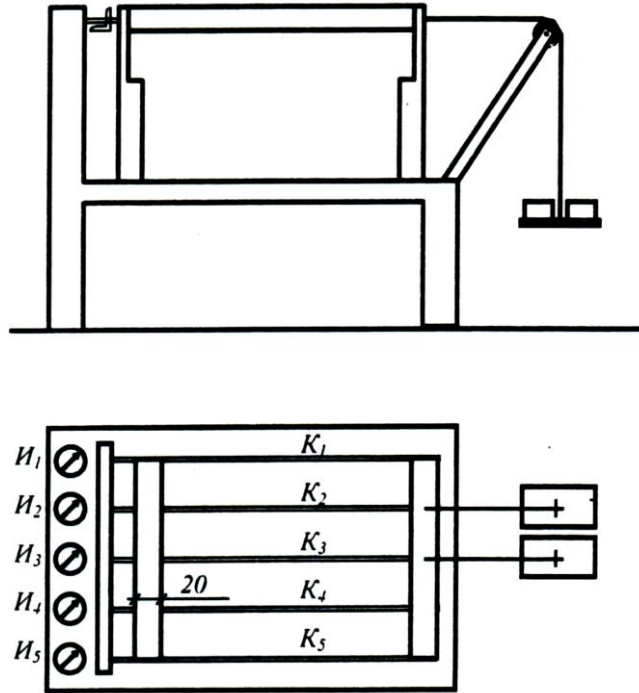


Рис. 3. Схема лабораторной установки с моделью каркаса.

На раме лабораторной установки размещены индикаторы часового типа I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 для измерения перемещений верхних концов колонн под нагрузкой. Нагружение осуществляется с помощью гибких тросов, пропущенных через блоки. К тросам подвешены платформы для установки грузов.

5. Определение коэффициента пространственной работы каркаса при легкой кровле.

5.1. Теоретическое определение коэффициента пространственной работы.

Сосредоточенная горизонтальная нагрузка P , действующая на пространственный каркас, делится на две части:

$$P = R_{np} + R_{от}, \quad (3)$$

где R_{np} – часть нагрузки, воспринимаемая рассматриваемой рамой; $R_{от}$ – часть нагрузки, воспринимаемая всеми другими рамами.

Значение $R_{от}$ определяется формулой:

$$R_{от} = \alpha \cdot P, \quad (4)$$

где α – коэффициент, зависящий от высоты и жесткости колонн, от жесткости связей и шага рам.

Подставив выражения (2) и (4) в формулу (3), получим:

$$P = \alpha_{np} \cdot P + \alpha \cdot P, \quad (5)$$

Откуда:

$$\alpha_{np} = 1 - \alpha, \quad (6)$$

Коэффициент α определяется по таблице 1 в зависимости от параметра β :

$$\beta = \frac{B^3}{h^3} \cdot \frac{d \sum J_1}{\sum J_{ГФ}}, \quad (7)$$

где B – шаг колонн в продольном направлении; h – высота колонн; $\sum J_{ГФ}$ – суммарный момент инерции связей (для испытываемой модели каркаса связями служат пластины, для которых: $\sum J_{ГФ} = 2tb^3/12$, t – толщина; b – ширина пластины); $\sum J_1$ – суммарный момент инерции колонн, входящих в состав рамы (для испытываемой модели: $\sum J_1 = 2b_k h_k^3/12$, b_k – ширина, h_k – высота сечения нижней части колонны); d – коэффициент приведения момента инерции колонны переменного сечения, который при жестком сопряжении колонны с ригелем определяется по формуле:

$$d = K_R/12, \quad (8)$$

где K_R – коэффициент реакции при смещении верха колонны на $\Delta = 1$ см, равный $K_R = 5,493$ [7, С. 297].

Таблица 1

β	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
α	0,77	0,73	0,71	0,69	0,67	0,62	0,58	0,55	0,48

5.2. Экспериментальное определение коэффициента пространственной работы каркаса при легкой кровле.

5.2.1. При отсоединенных горизонтальных связях (пластинах) установить стрелку индикатора I_3 на ноль.

5.2.2. Поэтапно загружая раму K_3 сосредоточенной нагрузкой P , определить для каждого этапа перемещение Δ_3 верхнего конца колонны по индикатору I_3 . Произвести 3 этапа загрузки $P=5$ кг, $P=10$ кг, $P=15$ кг.

5.2.3. Установить горизонтальные связи (пластины).

5.2.4. Установить стрелки всех индикаторов I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 на ноль.

5.2.5. Поэтапно загружая раму K_3 теми же нагрузками, определить перемещение $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$. Результаты измерений записать в таблицу 2.

5.2.6. Для последнего этапа загрузки каркаса с установленными связями построить эпюру перемещений верхних концов колонн (рис. 4).

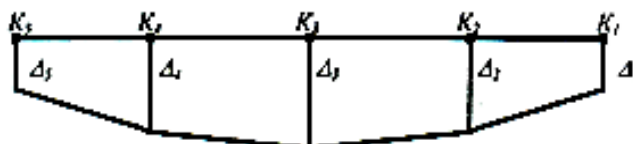


Рис. 4. Эпюра перемещений верхних концов колонн каркаса при легкой кровле.

5.2.7. Для каждого этапа загрузки определить коэффициент пространственной работы:

$$\alpha_{np} = \frac{\Delta_3^{np}}{\Delta_3}, \quad (9)$$

где $\Delta_3^{\text{пр}}$ – перемещение верхнего конца колонны рамы K_3 каркаса с установленными связями; Δ_3 – то же без связей (отдельно стоящая рама).

5.2.8. Определить среднее значение $\alpha_{\text{пр}}$ по трем этапам загрузки:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{пр}1} + \alpha_{\text{пр}2} + \alpha_{\text{пр}3}}{3}, \quad (10)$$

Сравнить теоретическое и экспериментальное значение $\alpha_{\text{пр}}$:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{\text{пр}}^{\text{теор}} - \alpha_{\text{пр}}^{\text{эксп}}}{\alpha_{\text{пр}}^{\text{эксп}}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Таблица 2. Результаты испытаний модели каркаса с легкой кровлей.

Номер индикатора		И ₁	И ₂	И ₃	И ₄	И ₅
Перемещение верхних концов колонн (мм)		Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
Горизонтальные связи отсутствуют	P=5 кг	-	-		-	-
	P=10 кг	-	-		-	-
	P=15 кг	-	-		-	-
Установлены горизонтальные связи (пластины)	P=5 кг					
	P=10 кг					
	P=15 кг					

6. Определение коэффициента пространственной работы каркаса при жесткой кровле

6.1. Теоретическое определение коэффициента пространственной работы.

При жесткой кровле коэффициент пространственной работы каркаса определяется для несимметричного нагружения, когда сосредоточенная нагрузка приложена со смещением от центра ко второй от торца раме (рис. 5). В этом случае каркас испытывает одновременно поступательное и вращательное движения, и перемещение верхнего конца колонны второй рамы будет равно:

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta_n + \Delta_{\text{в}}, \quad (12)$$

где Δ_n – перемещения от поступательного движения; $\Delta_{\text{в}}$ – перемещения от вращательного движения.

Реакция в рассматриваемой раме от поступательного перемещения Δ_n равна:

$$R_n = \frac{P}{n}, \quad (13)$$

где n – количество рам.

Реакция от вращательного перемещения $\Delta_{\text{в}}$ определяется формулой:

$$R_{\text{в}} = \frac{P \cdot h_2^2}{2 \cdot \sum h_i^2}, \quad (14)$$

где h_i – расстояние между рамами, попарно симметричными относительно

центра каркаса (рис. 5).

Таким образом, полная реакция R_{np} , соответствующая перемещению Δ_{np} , будет равна:

$$R_{np} = \left(\frac{1}{n} + \frac{h_2^2}{2 \cdot \sum h_i^2} \right) \cdot P, \quad (15)$$

Сравнив последнюю формулу с приведенной выше формулой (2), находим:

$$\alpha_{np} = \frac{1}{n} + \frac{h_2^2}{2 \cdot \sum h_i^2}. \quad (16)$$

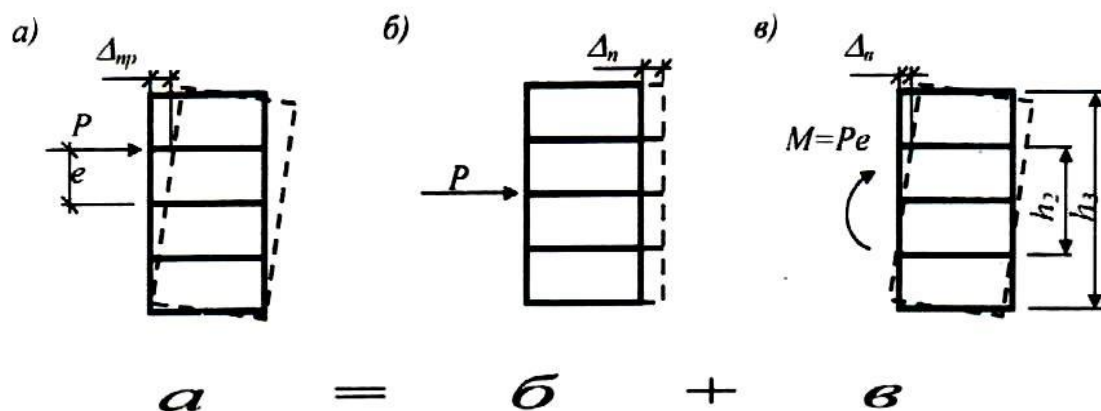


Рис. 5. Схема перемещений верхних концов колонн каркаса при жесткой кровле.

6.2. Экспериментальное определение коэффициента пространственной работы при жесткой кровле.

6.2.1. При отсоединенных горизонтальных связях (жестком диске) установить стрелку индикатора I_2 на ноль.

6.2.2. Поэтапно загружая раму K_2 сосредоточенной нагрузкой $P=5\text{кг}$, $P=10\text{кг}$, $P=15\text{кг}$, определить для каждого этапа перемещение Δ_2 верхнего конца колонны по индикатору I_2 . Результаты записать в таблицу 3.

6.2.3. Установить горизонтальные связи (жесткий диск).

6.2.4. Установить стрелки всех индикаторов I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 на ноль.

6.2.5. Поэтапно загружая раму K_2 теми же нагрузками, определить перемещение $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$. Результаты измерений записать в таблицу 3.

6.2.6. Для последнего этапа загрузки каркаса с установленными связями построить эпюру перемещений верхних концов колонн (рис. 6).

На эпюре выделить:

- перемещения от поступательного движения:

$$\Delta_{ип} = \frac{\sum \Delta_i}{5}, \quad (17)$$

- перемещения от вращательного движения:

$$\Delta_{ив} = \Delta_i - \Delta_{ип}. \quad (18)$$

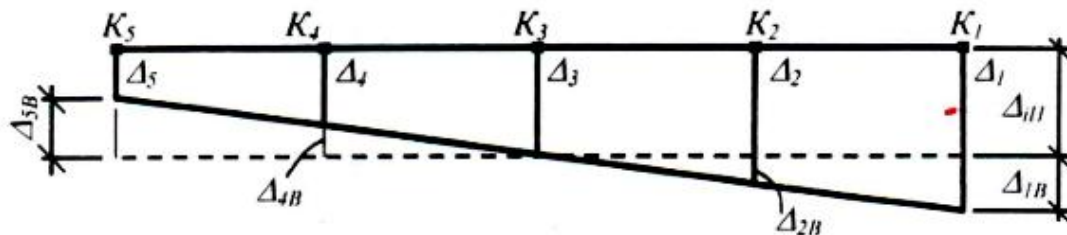


Рис. 6. Эпюра перемещений верхних концов колонн каркаса при жесткой кровле.

6.2.7. Для каждого этапа загрузки определить коэффициент пространственной работы:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\Delta_2^{\text{пр}}}{\Delta_2}, \quad (19)$$

где $\Delta_2^{\text{пр}}$ – перемещение верхнего конца колонны рамы K_2 каркаса с установленными жестким диском; Δ_2 – то же, без жесткого диска.

6.2.8. Определить среднее значение $\alpha_{\text{пр}}$ по трем этапам загрузки:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{пр}1} + \alpha_{\text{пр}2} + \alpha_{\text{пр}3}}{3}, \quad (20)$$

6.2.9. Сравнить теоретическое и экспериментальное значение $\alpha_{\text{пр}}$:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{\text{пр}}^{\text{теор}} - \alpha_{\text{пр}}^{\text{эксп}}}{\alpha_{\text{пр}}^{\text{эксп}}} \cdot 100\%, \quad (21)$$

Таблица 3. Результаты испытаний модели каркаса с жесткой кровлей.

Номер индикатора		И ₁	И ₂	И ₃	И ₄	И ₅
Перемещение верхних концов колонн (мм)		Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5
Горизонтальные связи отсутствуют	P=5 кг	-		-	-	-
	P=10 кг	-		-	-	-
	P=15 кг	-		-	-	-
Установлены горизонтальные связи (пластины)	P=5 кг					
	P=10 кг					
	P=15 кг					

7. Выводы по лабораторной работе.

8. Контрольные вопросы.

- 8.1. В чем сущность коэффициента пространственной работы каркаса?
- 8.2. Какое принципиальное отличие между коэффициентами пространственной работы каркаса при легкой и при жесткой кровле?
- 8.3. При каких нагрузках учитывается пространственная работа каркаса?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9467-75*. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы (с Изменением N 1).- М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2005. -7 с.
2. ГОСТ 8509-93 Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. – Введ. 1997-01-01. – Минск: Украин. науч.-исслед. институтом металлов, 1993.- 8 с.
3. ГОСТ Р 52643-2006 Болты и гайки высокопрочные и шайбы для металлических конструкций. Общие технические условия (с Изменением N 1). - М.: ЗАО “ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова”, 2006.- 20 с.
4. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. - Минск: ЦНИИСК им В.А. Кучеренко, 2015.- 37 с.
5. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования.- Введ. 2017-06-04. - М.: ЗАО “ ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова”, 2016.- 124 с.
6. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Введ. 2017-08-28. –М.: ЦНИИСК им В.А. Кучеренко, 2017.- 148 с.
7. Беленя Е.И. и др. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов/ Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Г.С. Ведеников и др.; под общ. Ред. Е.И. Беленя.-6-е изд., перераб. и доп.- М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.
8. Сварка и резка в промышленном строительстве/ под ред. Малышева Б.Д. Т.1, Т.2. -М.: Стройиздат, 1989.
9. Серенко А.Н., Крумбольдт Н.Н., Багрянский К.В. Расчет сварных соединений и конструкций. - М.: Высшая школа, 1977.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

к лабораторным работам по курсу

«Металлические конструкции, включая сварку»

для студентов направления подготовки 08.03.01 и 08.04.01
«Строительство», специальности 08.05.01 «Строительство уникальных
зданий и сооружений» по специализации «Строительство высотных и
большепролётных зданий и сооружений»

Составители: В.С. Агафонкин, М.А. Дымолазов, А.Э. Фахрутдинов,
М.А. Салахутдинов, Л.Р. Гимранов