

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический
университет им. Д.И.Менделеева»

Новомосковский институт (филиал)

Б.П. Сафонов

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО КРЭО

Учебное пособие

Новомосковск 2021

УДК 66.02(075.8)
ББК 35.11:35.514
С217

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор А.В. Подколзин
(ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт)
А.А.Орабио
(АО «НАК АЗОТ», г. Новомосковск)

Сафонов Б.П.

С217 Лабораторно-практические работы по КРЭО. Учебное пособие./
ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт (филиал);
Новомосковск, 2021. – 59с.

ISBN 978-5-7237-1509

Учебное пособие содержит задания, варианты исходных данных, примеры выполнения и необходимые справочные сведения для выполнения 8 лабораторно-практических работ по дисциплине «Конструирование и расчёт элементов оборудования».

Работы 1 – 4, 7, 8 выполняются с использованием программы *Excel*. В пособии представлены расчётные формулы, рассмотрено пошаговое заполнение расчётных таблиц *Excel*, рассмотрено построение иллюстрационных диаграмм и гистограмм.

Работа 5 посвящена исследованию размещения теплообменных труб теплообменника с помощью камеральной разметки трубной решётки. Работа 6 выполняется по данным, полученным студентами при выполнении курсовой работы по КРЭО.

Представленные в приложениях справочные сведения позволяют выполнять лабораторно-практические работы без привлечения дополнительной учебной и справочной литературы. Работы 1 – 5, 7, 8 содержат 20 вариантов исходных данных. Учебное пособие апробировано при выполнении работ в условиях дистанционного проведения учебного процесса.

Учебное пособие предназначено для бакалавров направленности «Машины и аппараты химических производств», оно также может быть полезно бакалаврам других инженерных профилей при выполнении учебных исследований с использованием программы *Excel*.

Табл. 33. Рис. 29. Библиогр. список 7 назв.

УДК 66.02(075.8)
ББК 35.11:35.514

ISBN 978-5-7237-1509

© Сафонов Б.П.
© ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева,
Новомосковский институт (филиал);

1. Содержание работ и порядок выполнения
Работа № 1. Исследование несущей способности балок при изгибе.
Анализ экономичности балок

Задание. Выполнить исследование несущей способности балок, работающих при изгибе. Одна балка изготовлена из фасонного проката (двутавр ГОСТ 8239–89, швеллер ГОСТ 8240–72), вторая балка имеет кольцевое сечение. Балки рассматриваются равновеликие (имеют одинаковую площадь поперечного сечения). Проанализировать экономичность балок при изгибе. Исследование и анализ выполнить для расположения изгибающей нагрузки в заданной плоскости.

Таблица 1.1. Исходные данные для исследования*

Вариант	Исходные данные		Дополнительные данные проката ⁽³⁾		
	Вид проката ⁽¹⁾	Плоскость приложения нагрузки ⁽²⁾	Площадь сечения проката F, см ²	Момент сопротивления W ⁽⁴⁾ , см ³	Высота профиля ⁽⁵⁾ , см
1.xx	_____	_____	_____	_____	_____
<p>* см. таблицу В 1</p> <p>1. Двутавр или швеллер.</p> <p>2. Плоскость приложения изгибающей нагрузки (ZOY вертикальная, ZOХ – горизонтальная).</p> <p>3. Дополнительные данные проката выбираются из таблиц ГОСТ на сортамент прокатных профилей см. Таблицы В 2, В 3.</p> <p>4. Для вертикальной плоскости ZOY – W_x; для горизонтальной плоскости ZOХ – W_y.</p> <p>5. Высота профиля: для вертикальной плоскости YOZ – h; для горизонтальной плоскости XOZ – b.</p>					

1.1. Расчётные формулы

Площадь сечения кольца с известным отношением внутреннего и наружного диаметров

$$c=d/D: F=\pi \cdot D^2 \cdot (1-c^2)/4 \quad (1.1)$$

Наружный диаметр кольца при $c=d/D$, выраженный через площадь сечения

$$D = 2 \cdot [F/\pi \cdot (1-c^2)]^{0.5} \quad (1.2)$$

Осевой момент сопротивления кольца при $c=d/D$

$$W = \pi \cdot D^3 \cdot (1-c^4)/32 \quad (1.3)$$

Коэффициент экономичности при изгибе для балки кольцевого сечения α_k

$$\alpha_k = W/(F \cdot D) \quad (1.4)$$

Оформление расчётной таблицы. Используем стиль ссылок R1C1.

Строка R1 → Идентификационная: Исследование несущей способности балки при изгибе ***Студент вариант 1.xx***

Строка R2 → Двутавр (C1 – C3); Расчёт-кольцо (C4 – C10); Двутавр (C11); Кольцо(C12); Двутавр (C13); Кольцо (C14).

Строка R3 → Обозначение содержания столбцов

Ячейка R3C1 → F, см²

Ячейка R3C2 → W_x или W_y, см³

Ячейка R3C3 → h или b, см

Ячейка R3C4 → c=d/D

Ячейка R3C5 → c²

Ячейка R3C6 → 3,1415*(1- c²)

Ячейка R3C7 → D, см

Ячейка R3C8 → c⁴

Ячейка R3C9 → 3,1415*(1- c⁴)

Ячейка R3C10 → W, см³

Ячейка R3C11 → W_x или W_y, см³

Ячейка R3C12 → W, см³

Ячейка R3C13 → α=W_x/F*h или α=W_y/F*b

Ячейка R3C14 → α=W/F*D

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C1 – Строка R4 → F = 12 см² = const

Столбец C2 – Строка R4 → W_x = 39,7см³ = const

Столбец C3 – Строка R4 → h = 10 см = const.

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец C4 - Строки R4- R41 → переменная c = d/D; строка R4 c=0,05;

строки R5- R41 с шагом 0,025 → =R[-1]C+0,025

Столбец C5 - Строки R4- R41 → c² → =СТЕПЕНЬ(RC[-1];2)

Столбец C6 - Строки R4- R41 → 3,1415*(1- c²) → =3,1415*(1-RC[-1])

Столбец C7 - Строки R4- R41 → D → = 2*КОРЕНЬ(12/RC[-1]) см. формулу D = 2*[F/π*(1-c²)]^{0.5}

Столбец C8 - Строки R4- R41 → c⁴ → =СТЕПЕНЬ(RC[-4];4)

Столбец C9 - Строки R4- R41 → 3,1415*(1- c⁴) → =(3,1415*(1-RC[-1]))/32

Столбец C10 - Строки R4- R41 → W → =RC[-1]*СТЕПЕНЬ(RC[-3];3) см. формулу W = π*D³*(1-c⁴)/32

Сравнение несущей способности балок из прокатного профиля и кольцевого сечения

Столбец C11 – Строки R4- R41 → W_x или W_y → W_x = 39,7 см³

Столбец C12 – Строки R4 - R41 → W кольца → =RC[-3]*СТЕПЕНЬ(RC[-5];3)

Сравнение экономичности балок при изгибе

Столбец C13 – Строки R4 - R41 → α для балки из прокатного профиля → =39,7/(12*10)

Столбец С14– Строки R4 - R41 → α для балки кольцевого сечения → $\alpha = RC[-4]/(12*RC[-7])$

1.2.2 Построение иллюстрационных диаграмм

Выполняется с помощью программы Мастер диаграмм. Иллюстрационные диаграммы, представленные на рис. 1.2, 1.3, являются точечными диаграммами со значениями, соединенными отрезками баз маркеров. Для построения диаграммы рис. 1.2 использованы данные столбцов расчётной таблицы С4, С11, С12 (см. рис. 1.1) , для построения диаграммы рис. 1.3 использованы данные столбцов расчётной таблицы С4, С13, С14. (см. рис. 1.1).

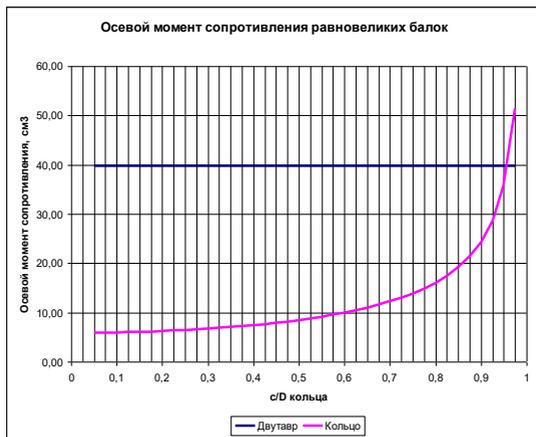


Рис. 1.2. Зависимость осевого момента сопротивления балки от величины d/D

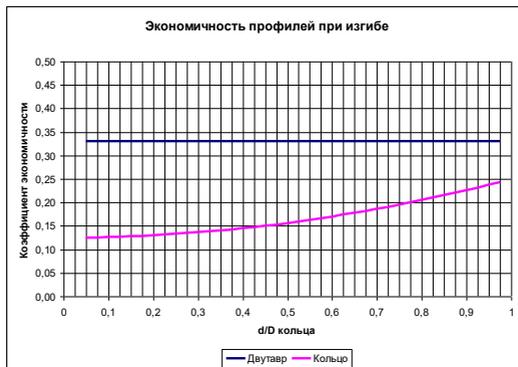


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента экономичности балки от величины d/D

1.2.3. Выводы

1. При размещении изгибающей нагрузки в плоскости _____ (указать плоскость расположения изгибающей нагрузки) балка с кольцевым сечением при $c = d/D =$ _____ (указать значение d/D , при котором балки имеют равные значения осевого момента сопротивления) обладают равной несущей способностью с балкой, выполненной из _____ (указать вид проката и его номер).

2. Указывается область значений d/D , при которых балка из проката более экономична по сравнению с равновеликой балкой кольцевого сечения.

Работа № 2. Исследование напряжённого состояния в стенке цилиндрической тонкостенной обечайки

Задание: исследовать напряжённое состояние в окрестности точки измерения напряжений в стенке тонкостенной обечайки.

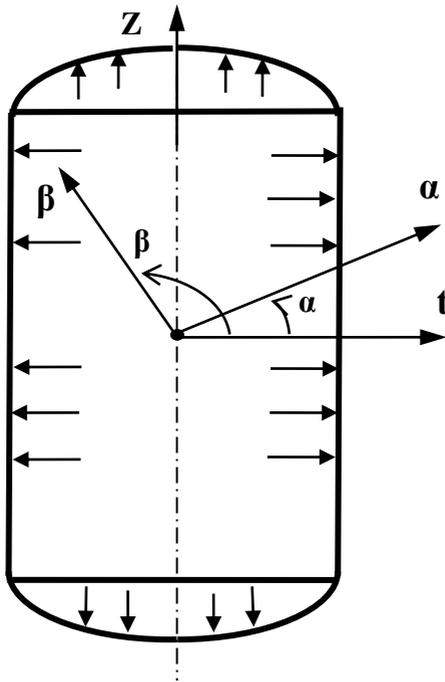


Рис. 2.1. Схема размещения тензодатчиков при измерении напряжений в стенке обечайки: t – касательная ось; z – продольная ось; α, β – оси размещения тензодатчиков ($\beta = \alpha + 90$);

Таблица 2.1.

Исходные данные для исследования*

Вариант	α	β	σ_α	σ_β
		град		МПа

2.хх	_____	_____	_____	_____
* см. таблицу В4				

2.1. Расчётные формулы

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\beta} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \beta + \sigma_2 \cdot \sin^2 \beta \quad (2.2),$$

здесь $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta}$ – напряжения на площадках в точке измерения; σ_1, σ_2 – главные напряжения в точке измерения ($\sigma_1 = \sigma_k$ – кольцевое напряжение, действующее в направлении оси «t»; $\sigma_1 = \sigma_m$ – меридиональное напряжение, действующее в направлении оси «z»).

$$\sigma_{\gamma} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \gamma + \sigma_2 \cdot \sin^2 \gamma \quad (2.3)$$

$$\tau_{\gamma} = 0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin 2\gamma \quad (2.4)$$

здесь $\sigma_{\gamma}, \tau_{\gamma}$ – нормальное и касательное напряжение на произвольной площадке, соответственно.

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{II}} = \sigma_1 - \mu \cdot \sigma_2 \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{III}} = \sigma_1 \quad (2.6)$$

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{IV}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (2.7),$$

здесь $\sigma_{\text{расч}}^{\text{II}}, \sigma_{\text{расч}}^{\text{III}}, \sigma_{\text{расч}}^{\text{IV}}$ – расчётные напряжения в точке измерения по II, III, IV теории прочности, соответственно; $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона. Перевод градусной меры измерения углов γ (град) в радианную γ (рад)

$$\gamma \text{ (рад)} = \gamma \text{ (град)} \cdot 3,1416/180 \quad (2.8)$$

2.2. Выполнение работы

2.2.1. Вычисление главных напряжений в точке измерения

Исходными данными для вычисления главных напряжений являются заданные величины напряжений $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta}$ (см. табл. 2.1), возникающие под углами α и β к оси t (см. рис. 2.1). Величина главных напряжений σ_1 и σ_2 определяется из совместного решения уравнений (2.1, 2.2) исключением одного из неизвестных.

2.2.2. Исследование напряжённого состояния в стенке оболочки

Исследование проводим с использованием программы Excel. С этой целью заполняем расчётную таблицу Excel (рис. 2.2).

Оформление расчётной таблицы. Используем стиль ссылок R1C1.

Строка R1 → Идентификационная: Исследование напряжённого состояния в стенке цилиндрической обечайки Студент вариант 2хх.

Строка R2 → Дано (C1; C2); Расчёт (C3 – C13).

Строка R3 → Обозначение содержания столбцов

Ячейка R3C1 → σ_1 , МПа

Ячейка R3C2 → σ_2 , МПа

Ячейка R3C3 → α , град

Ячейка R3C4 → α , рад

Ячейка R3C5 → $\cos\alpha$

Ячейка R3C6 → $\sin\alpha$

Ячейка R3C7 → $\sin 2\alpha$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Исследование напряженного состояния в стенке цилиндрической толстостенной оболочки Студент вариант 2.хх															
2	Дано															
3	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	α , град	α , рад	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$	$\sin 2\alpha$	σ_1 , град	σ_2 , МПа	σ , МПа	II теория	III теория	IV теория			
4	40	20	0	0	1,00	0,00	0,00	40,00	0	34	34	40	34,6			
5	40	20	10	0,17453	0,98	0,17	0,34	39,40	3	40						
6	40	20	20	0,34906	0,94	0,34	0,64	37,66	6	38						
7	40	20	30	0,52358	0,87	0,50	0,87	35,00	9	36						
8	40	20	40	0,69811	0,77	0,64	0,98	31,74	10	33						
9	40	20	50	0,87264	0,64	0,77	0,98	28,26	10	30						
10	40	20	60	1,04717	0,50	0,87	0,87	25,00	9	26						
11	40	20	70	1,22169	0,34	0,94	0,64	22,34	6	23						
12	40	20	80	1,39622	0,17	0,98	0,34	20,00	3	21						
13	40	20	90	1,57075	0,00	1,00	0,00	20,00	0	20						
14	40	20	100	1,74528	-0,17	0,98	-0,34	20,00	-3	21						
15	40	20	110	1,91981	-0,34	0,94	-0,64	22,34	-6	23						
16	40	20	120	2,09433	-0,50	0,87	-0,87	25,00	-9	26						
17	40	20	130	2,26886	-0,64	0,77	-0,98	28,26	-10	30						
18	40	20	140	2,44339	-0,77	0,64	-0,98	31,74	-10	33						
19	40	20	150	2,61792	-0,87	0,50	-0,87	35,00	-9	36						
20	40	20	160	2,79244	-0,94	0,34	-0,64	37,66	-6	38						
21	40	20	170	2,96697	-0,98	0,17	-0,34	39,40	-3	40						
22	40	20	180	3,1415	-1,00	0,00	0,00	40,00	0	40						

Рис. 2.2 Работа №2. Скриншот расчётной таблицы (цветом выделены исходные данные для расчёта главных напряжений)

Ячейка R3C8 → σ_α , МПа

Ячейка R3C9 → τ_α , МПа

Ячейка R3C10 → r_α , МПа

Ячейка R3C11 → σ (II), МПа

Ячейка R3C12 → σ (III), МПа

Ячейка R3C13 → σ (IV), МПа

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C1 - Строки R4- R22 → значение σ_1 (постоянная величина)

Столбец C2 - Строки R4- R22 → значение σ_2 (постоянная величина)

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец C3 - Строки R4- R22 → переменная $\alpha = 0 \dots 180$ град с шагом 10 град:
 $=R[-1]C+10$.

Столбец C4 - Строки R4- R22 → переменная $\alpha = 0 \dots 3,1415$ рад с шагом 0,17453 рад:
 $=RC[-1]*3,1415/180$

Столбец C5 - Строки R4- R22 → $=\text{COS}(RC[-1])$

Столбец C6 - Строки R4- R22 → $=\text{SIN}(RC[-2])$

Столбец C7 - Строки R4- R22 → $=\text{SIN}(2*RC[-3])$

Столбец C8 - Строки R4- R22 → $\sigma_\alpha = \sigma_1 \cdot \cos^2\alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2\alpha$
 $=RC[-7]*\text{СТЕПЕНЬ}(RC[-3];2)+RC[-6]*\text{СТЕПЕНЬ}(RC[-2];2)$

Столбец C9 - Строки R4- R22 → $\tau_\alpha = 0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin 2\alpha$ ⇒ $(RC[-8]-RC[-7])*0,5*RC[-2]$

Столбец C10 - Строки R4- R22 $\rightarrow p_{\alpha} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \tau_{\alpha}^2} \rightarrow = \text{КОРЕНЬ}(\text{RC}[-2]*\text{RC}[-2]+\text{RC}[-1]*\text{RC}[-1])$

Столбец C11 - Строка R4 $\rightarrow \sigma(\text{II}) = \sigma_1 - \mu \cdot \sigma_2 \rightarrow = \text{RC}[-10]-0,3*\text{RC}[-9]$

Столбец C12 - Строка R4 $\rightarrow \sigma(\text{III}) = \sigma_1 \rightarrow = \text{RC}[-11]$

Столбец C13 - Строка R4 $\rightarrow \sigma(\text{IV}) = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \rightarrow = \text{КОРЕНЬ}((\text{RC}[-12]*\text{RC}[-12]+\text{RC}[-11]*\text{RC}[-11]-\text{RC}[-12]*\text{RC}[-11]))$

2.3. Построение иллюстрационной диаграммы и гистограммы

Иллюстрационная диаграмма (рис. 2.3) строится с использованием программы Мастер диаграмм. Выбрана точечная диаграмма со значениями, соединенными отрезками баз маркеров. Для построения задействованы данные столбцов C3, C8, C9.



Рис. 2.3. Зависимость напряжений от угла наклона площадки

Иллюстрационная гистограмма (рис. 2.4) строится с использованием программы Мастер диаграмм. Выбрана обычная гистограмма, отображающая значения различных категорий. Для построения задействован массив R3C11-R4C13.

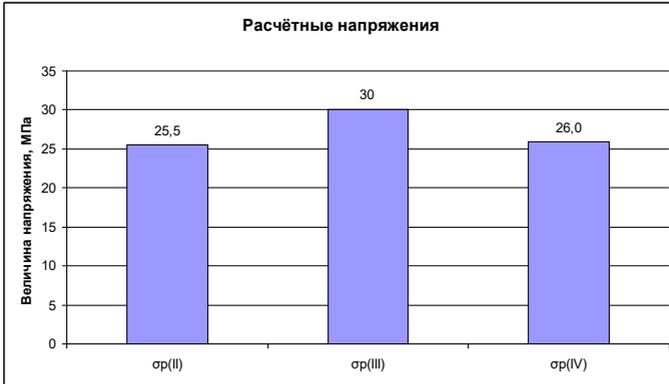


Рис. 2.4. Гистограмма расчётных напряжений в точке измерения
Работа №3. Оптимизация размеров корпуса цельносварного стального аппарата, работающего под внутренним давлением

Задание. Определить оптимальные размеры (диаметр, высота) корпуса стального цельносварного аппарата заданного объёма с эллиптическими неотбортованными днищами. Оптимизацию выполнить из условий: а) минимума массы аппарата; б) минимума боковой поверхности аппарата. Проанализировать полученный результат.

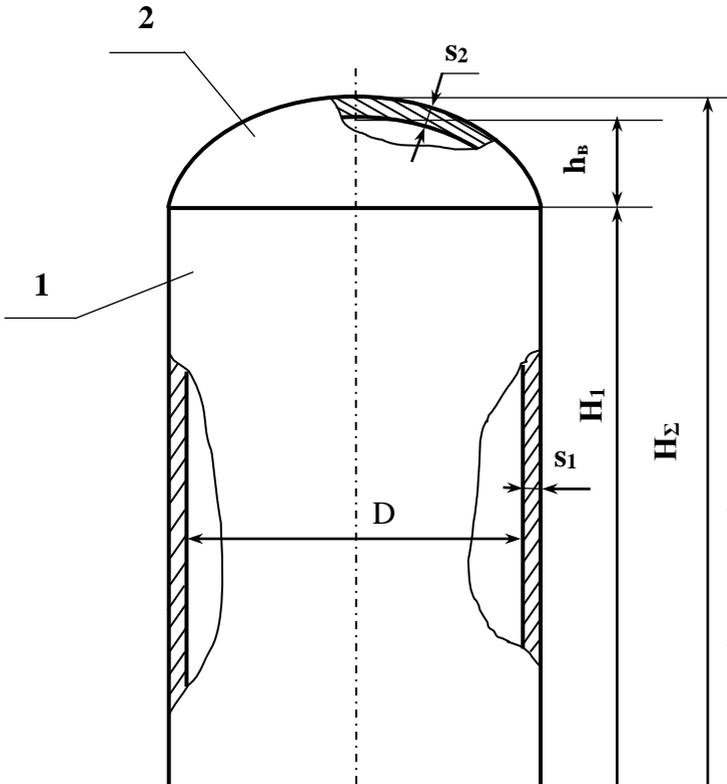


Рис. 3. 1. Эскиз аппарата: 1 – обечайка; 2 – днище; D – внутренний диаметр аппарата; s_1, s_2 – толщина стенки обечайки, днища, соответственно; h_b – внутренняя высота выпуклой части днища; H_1 – высота (осевой размер) обечайки; H_Σ – общая высота (осевой размер)

Таблица 3.1. Исходные данные для исследования*

Вариант	V	ρ	Сталь	t
	м ³	МПа		град С
3.хх	_____	_____	_____	_____
* см. таблицу В5				

3.1. Расчётные формулы

Допускаемое напряжение материала при заданной температуре в аппарате t определяется линейной интерполяцией данных таблицы П1

$$[\sigma]_t = [\sigma]_{t1} - \frac{([\sigma]_{t1} - [\sigma]_{t2})}{(t_2 - t_1)} \cdot (t - t_1), \text{ МПа} \quad (3.1)$$

здесь $[\sigma]_{t1}$, $[\sigma]_{t2}$ – табличные значения напряжений в интервале температур ($t_1 - t_2$), включающем заданное значение температуры в аппарате t).

Масса аппарата

$$m = V_m \cdot \rho, \text{ кг} \quad (3.2)$$

здесь V_m – объём металла корпуса, м³; ρ – плотность стали, кг/м³ (принимается $\rho = 7850$ кг/м³).

Площадь поверхности цилиндрической обечайки

$$A_1 = 4 \cdot V/D - 1,05 \cdot D^2, \text{ м}^2 \quad (3.3)$$

Площадь поверхности выпуклой части эллиптического днища

$$A_2 = 1,24 \cdot D^2, \text{ м}^2 \quad (3.4)$$

здесь V – объём полости аппарата (заданная величина, постоянная при исследовании), м; D – диаметр аппарата (переменная величина), м.

Вспомогательный безразмерный коэффициент для расчёта толщины стенки аппарата

$$k_s = \rho / (2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p) \quad (3.5)$$

здесь p – давление в аппарате (заданная величина), МПа; $\varphi = 1$ – коэффициент прочности сварного шва;

Толщина стенки цилиндрической обечайки (принимая: $s_1=s_2=s$)
 $s=k_s \cdot D+c$, м (3.6)

При известной плотности металла, толщине стенки и площади боковой поверхности элементов аппарата, масса аппарата (см. 3.2) равна

$$m=7850 \cdot s \cdot (A_1+2A_2), \text{ кг}$$

Высота (длина) цилиндрической части аппарата (при известном объёма и диаметре)

$$H_1 = (4 \cdot V/\pi \cdot D^2) - D/3, \text{ м} \quad (3.7)$$

Внутренняя высота выпуклой части эллиптической днища

$$h_b = 0,25 \cdot D, \text{ м} \quad (3.8)$$

Общая высота (длина) аппарата

$$H_2 = H_1 + 2 \cdot (h_b + s), \text{ м} \quad (3.9)$$

Формулы численного дифференцирования функции оптимизации F

Первая производная $\rightarrow dF/dD = (F_{i+1}-F_i)/(D_{i+1}-D_i)$ (3.10)

Вторая производная $\rightarrow d^2F/dD^2 = (dF/dD_{i+1} - dF/dD_i)/(D_{i+1}-D_i)$ (3.11)

3.2. Выполнение работы

3.2.1. Оптимизация массы аппарата

Исследование проводим с использованием программы Excel. С этой целью заполняем расчётную таблицу Excel на листе «масса» (рис. 3.2). Используем стиль ссылок R1C1.

Оформление расчётной таблицы листа «масса»

Строка R1 \rightarrow Идентификационная: Оптимизация массы аппарата *Студент вариант 3.xx*.

Строка R2 \rightarrow Данные (C1 – C5); Переменная (C6); Площадь поверхности (C7, C8); масса (C9-C11); Оптимизация (C12-C13); высота (C14-C16).

Строка R3 \rightarrow Обозначение содержания столбцов

Ячейка R3C1 \rightarrow V	Ячейка R3C9 $\rightarrow k_s=p/(2\varphi[\sigma]-p)$
Ячейка R3C2 \rightarrow p	Ячейка R3C10 $\rightarrow s_1=s_2=k_s D+c$
Ячейка R3C3 \rightarrow c	Ячейка R3C11 $\rightarrow m=7850 \cdot s \cdot (A_1+2A_2)$
Ячейка R3C4 \rightarrow φ	Ячейка R3C12 $\rightarrow dm/dD$
Ячейка R3C5 \rightarrow $[\sigma]$	Ячейка R3C13 $\rightarrow d^2m/dD^2$
Ячейка R3C6 \rightarrow D	Ячейка R3C14 \rightarrow $H_1=(4 \cdot V/3,1416 \cdot D^2)-D/3$
Ячейка R3C7 $\rightarrow A_1=(4V/D)-1,05D^2$	Ячейка R3C15 $\rightarrow h_b=0,25 \cdot D$
Ячейка R3C8 $\rightarrow A_2=1,24D^2$	Ячейка R3C16 $\rightarrow H_2=H_1+2 \cdot (h_b+s)$

Microsoft Excel - криз-из-3-пример расчета

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

Введите поиск:

R3C7 = X√X A1=(4V/D)-1.05D2

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Оптимизация массы аппарата *Строчки скрыты 3.хх*

2	Данные					Переменная	Площадь поверхности		Масса		Оптимизация		Высота			
3	V	p	c	f	[c]	D	$A_1=(4V/D)-1.05D^2$	$A_2=1.24D^2$	$m_1=2[c]f$	$m_2=2[c]Dm=7850*(A_1+A_2)$	d_{mD}	$d_{f^2mD^2}$	$H_1=(4*V/3.1416*D^3)/3$	$H_2=(H_1+2*(H_1+3))$		
4	м³	МПа	м			МПа	м²	м²	кг	кг	мм	мм²	м	м		
5	50	1	0,001	1	107,2		666,57	0,11	0,004672997	0,0024	12572	14929	74895	707,25	0,08	707,408
6						0,30	571,30	0,15	0,004672997	0,0026	11926	11164	49990	539,21	0,09	539,752
7						1,45	135,72	2,61	0,004672997	0,0078	8603	346	1426	29,85	0,36	30,536
8						1,5	130,97	2,79	0,004672997	0,0080	8585	275	1354	27,79	0,38	28,560
9						1,55	126,51	2,96	0,004672997	0,0082	8572	207	1283	25,96	0,39	26,713
10						1,6	122,31	3,17	0,004672997	0,0085	8561	143	1241	24,33	0,40	25,122
11						1,65	118,35	3,38	0,004672997	0,0087	8554	87	1197	22,83	0,41	23,676
12						1,7	114,61	3,59	0,004672997	0,0089	8550	27	1160	21,44	0,42	22,340
13						1,75	111,07	3,80	0,004672997	0,0092	8549	-37	1128	20,28	0,44	21,080
14						1,8	107,71	4,02	0,004672997	0,0094	8551	-94	1101	19,05	0,45	19,868
15						1,85	104,51	4,24	0,004672997	0,0096	8556	-149	1079	17,98	0,46	18,926
16						1,9	101,47	4,48	0,004672997	0,0099	8563	-203	1060	17,00	0,48	17,971
17						1,95	98,57	4,72	0,004672997	0,0101	8573	-256	1045	16,09	0,49	17,007
18						2	95,80	4,96	0,004672997	0,0103	8586	-308	1032	15,25	0,50	16,269
19						2,05	93,15	5,21	0,004672997	0,0106	8601	-359	1023	14,47	0,51	15,511
20						2,1	90,61	5,47	0,004672997	0,0108	8619	-411	1015	13,74	0,52	14,807
21						2,15	88,17	5,73	0,004672997	0,0110	8640	-461	1010	13,06	0,54	14,153
22						2,2	85,89	6,00	0,004672997	0,0113	8663	-512	1006	12,42	0,55	13,542
23						2,25	83,67	6,28	0,004672997	0,0115	8689	-562	1005	11,83	0,56	12,973
24						2,3	81,40	6,56	0,004672997	0,0117	8717	-612	1004	11,27	0,58	12,441
25						2,35	79,31	6,85	0,004672997	0,0120	8747	-663	1005	10,74	0,59	11,943
26						2,4	77,29	7,14	0,004672997	0,0122	8780	-715	1007	10,25	0,60	11,477
27						2,45	75,33	7,44	0,004672997	0,0124	8816	-763	1007	9,79	0,61	11,039
28						2,5	73,44	7,75	0,004672997	0,0127	8854			9,35	0,63	10,628

МКСА

Network Connection
Доступ к Интернету

10:08 03.12.2018

Рис. 3.2. Работа №3. Скриншот листа «масса» расчётной таблицы (строки 7-27 скрыты; цветом выделены параметры аппарата оптимальной массы $m \rightarrow \min$).

Строка R4 → Размерность величин

Ячейка R4C1 → m^3	Ячейка R4C9 → —
Ячейка R4C2 → МПа	Ячейка R4C10 → м
Ячейка R4C3 → м	Ячейка R3C11 → кг
Ячейка R4C4 → —	Ячейка R4C12 → —
Ячейка R4C5 → МПа	Ячейка R4C13 → —
Ячейка R4C6 → м	Ячейка R4C14 → м
Ячейка R4C7 → m^2	Ячейка R4C15 → м
Ячейка R4C8 → m^2	Ячейка R4C16 → м

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C1 – Строка R5 → $50 \text{ м}^3 = \text{const}$

Столбец C2 – Строка R5 → $1 \text{ МПа} = \text{const}$

Столбец C3 – Строка R5 → $0,001 \text{ м} = \text{const}$

Столбец C4 – Строка R5 → $1 = \text{const}$

Столбец C5 – Строка R5 → $107,2 \text{ МПа}$

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец C6 - Строки R5- R49 → переменная D; строка R5 $D=0,3$; строки R6- R49 с шагом $0,05 \rightarrow =R[-1]C+0,05$

Столбец C7 - Строки R5- R49 → $=4*50/RC[-1]-1,05*RC[-1]*RC[-1] \rightarrow (50=\text{const})$

Столбец C8 - Строки R5- R49 → $=1,24*RC[-2]*RC[-2]$

Столбец C9 - Строки R5- R49 → $=1/(2*1*107,5-1) \rightarrow (1=const; 1=const; 107,5=const)$

Столбец C10 - Строки R5- R49 → $RC[-1]*RC[-4]+0,001 \rightarrow (0,001=const)$

Столбец C11 - Строки R5- R49 → $=7850*(RC[-4]*RC[-1]+2*RC[-3]*RC[-1]) \rightarrow (7850=const)$

Расчёты по нахождению параметров аппарата оптимальной массы → численное дифференцирование

Столбец C12 - Строки R5- R48 → $=(RC[-1]-R[1]C[-1])/(R[1]C[-6]-RC[-6])$

Столбец C13 - Строки R5- R47 → $=(RC[-1]-R[1]C[-1])/(R[1]C[-7]-RC[-7])$

Определение высоты аппарата

Столбец C14 - Строки R4 - R49 → $=4*50/(3,1416*СТЕПЕНЬ(RC[-8];2))-RC[-8]/3 \rightarrow (50=const)$

Столбец C15 - Строки R4 - R49 → $=0,25*RC[-9]$

Столбец C16 - Строки R4 - R49 → $=RC[-2]+2*(RC[-1]+RC[-6])$

3.2.2. Оптимизация поверхности аппарата

Исследование проводим с использованием программы Excel. С этой целью заполняем расчётную таблицу Excel на листе «поверхность» (рис. 3.3).

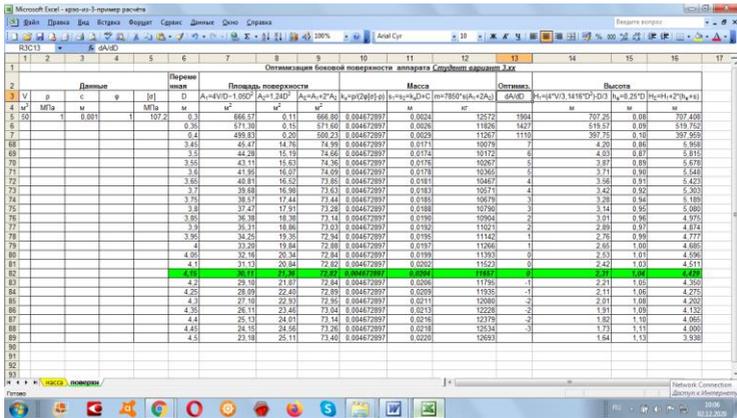


Рис. 3.3. Работа №3. Скриншот листа «поверхность» расчётной таблицы (строки 8-67 скрыты; цветом выделены параметры аппарата оптимальной боковой поверхности $A \rightarrow \min$).

Оформление расчётной таблицы листа «поверхность»

Строка R1 → Идентификационная: Оптимизация боковой поверхности аппарата **Студент вариант 3.хх**.

Строка R2 → Данные (C1 – C5); Переменная (C6); Площадь поверхности (C7- C9); масса (C10-C12); Оптимизация (C13); высота (C14-C16).

Строка R3 → Обозначение содержания столбцов

Ячейка R3C1 → V	Ячейка R3C9 → $A_2 = A_1 + 2 * A_2$
Ячейка R3C2 → p	Ячейка R3C10 → $k_s = p / (2\phi[\sigma] - p)$

Ячейка R3C3 → c	Ячейка R3C11 → $s_1=s_2=k_s D+c$
Ячейка R3C4 → φ	Ячейка R3C12 → $m=7850*s(A_1+2A_2)$
Ячейка R3C5 → [σ]	Ячейка R3C13 → dA/dD
Ячейка R3C6 → D	Ячейка R3C14 → $H_1=(4*V/3,1416*D^2)-D/3$
Ячейка R3C7 → $A_1=(4V/D)-1,05D^2$	Ячейка R3C15 → $h_b=0,25*D$
Ячейка R3C8 → $A_2=1,24D^2$	Ячейка R3C16 → $H_\Sigma=H_1+2*(h_b+s)$

Строка R4 → Размерность величин

Ячейка R4C1 → м ³	Ячейка R4C9 → м ²
Ячейка R4C2 → МПа	Ячейка R4C10 → —
Ячейка R4C3 → м	Ячейка R3C11 → м
Ячейка R4C4 → —	Ячейка R4C12 → кг
Ячейка R4C5 → МПа	Ячейка R4C13 → —
Ячейка R4C6 → м	Ячейка R4C14 → м
Ячейка R4C7 → м ²	Ячейка R4C15 → м
Ячейка R4C8 → м ²	Ячейка R4C16 → м

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C1 – Строка R5 → $50 \text{ м}^3 = \text{const}$

Столбец C2 – Строка R5 → $1 \text{ МПа} = \text{const}$

Столбец C3 – Строка R5 → $0,001 \text{ м} = \text{const}$

Столбец C4 – Строка R5 → $1 = \text{const}$

Столбец C5 – Строка R5 → $107,2 \text{ МПа}$

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец C6 – Строки R5- R89 → переменная D; строка R5 D =0,3; строки R6- R49 с шагом 0,05 → $=R[-1]C+0,05$

Столбец C7 – Строки R5- R89 → $=4*50/RC[-1]-1,05*RC[-1]*RC[-1] \rightarrow (50=\text{const})$

Столбец C8 – Строки R5- R89 → $=1,24*RC[-2]*RC[-2]$

Столбец C9 – Строки R5- R89 → $=RC[-2]+2*RC[-1]$

Столбец C10 – Строки R5- R89 → $=1/(2*1*107,5-1) \rightarrow (1=\text{const}; 1=\text{const}; 107,5=\text{const})$

Столбец C11 – Строки R5- R89 → $RC[-1]*RC[-4]+0,001 \rightarrow (0,001=\text{const})$

Столбец C12 – Строки R5- R89 → $=7850*(RC[-4]*RC[-1]+2*RC[-3]*RC[-1]) \rightarrow (7850=\text{const})$

Расчёты по нахождению параметров аппарата оптимальной боковой поверхности → численное дифференцирование

Столбец C13 – Строки R5- R88 → $=(RC[-1]-R[1]C[-1])/(R[1]C[-6]-RC[-6])$

Определение высоты аппарата

Столбец C14 – Строки R4 – R89 → $=4*50/(3,1416*СТЕПЕНЬ(RC[-8];2))-RC[-8]/3 \rightarrow (50=\text{const})$

Столбец C15 – Строки R4 – R89 → $=0,25*RC[-9]$

Столбец C16 – Строки R4 – R89 → $=RC[-2]+2*(RC[-1]+RC[-6])$

3.2.3. Результаты исследования

Параметры аппарата с оптимальной массой определяем из анализа расчётной таблицы рис. 3.2. Минимальную массу будет иметь аппарат, диаметр которого, соответствует выполнению условий $dm/dD=0$; $d^2m/dD^2>0$. В столбце №11 отыскиваем строку Rxx, где dm/dD меняет знак с «+» на «-».

Выделяем жирным курсивом параметры аппарата в строке Rxx: $D = \mathbf{xx}$ м; $s = \mathbf{xx}$ мм; $A_{\Sigma} = A_1 + 2 \cdot A_2 = \mathbf{xx} + 2 \cdot \mathbf{xx} = \mathbf{xx}$ м²; $m = \mathbf{xx}$ кг; $H_1 = \mathbf{xx}$ м; $h_B = \mathbf{xx}$ м; $H_{\Sigma} = \mathbf{xx}$ м.

Параметры аппарата с оптимальной боковой поверхностью определяем из анализа расчётной таблицы рис. 3.3. Минимальную боковую поверхность будет иметь аппарат, диаметр которого, соответствует выполнению условия $dA/dD=0$. В столбце №9 отыскиваем строку Ryy, в которой dA/dD меняет знак с «+» на «-». Для принятых исходных данных это имеет место при $D = \mathbf{yy}$ м (см. рис. 3.3).

Выделяем жирным курсивом параметры аппарата в строке Ryy: $D = \mathbf{yy}$ м; $s = \mathbf{yy}$ мм; $A_{\Sigma} = \mathbf{yy}$ м²; $m = \mathbf{yy}$ кг; $H_1 = \mathbf{yy}$ м; $h_B = \mathbf{yy}$ м; $H_{\Sigma} = \mathbf{yy}$ м.

Работа №4. Исследование напряжённого состояния в стенке толстостенного сосуда

Задание. Полый стальной цилиндр с днищами, имеющий внутренний диаметр D_2 и толщину стенки s , нагружен внутренним давлением p_2 , равномерно распределённым по объёму сосуда.

Для заданных условий:

1. Построить распределение радиальных σ_r и окружных σ_t напряжений по толщине стенки цилиндра.
2. Определить величину наибольшего расчётного напряжения в стенке цилиндра по теории наибольших касательных напряжений σ_{III} и по энергетической теории прочности σ_{IV} . Проанализировать полученный результат.

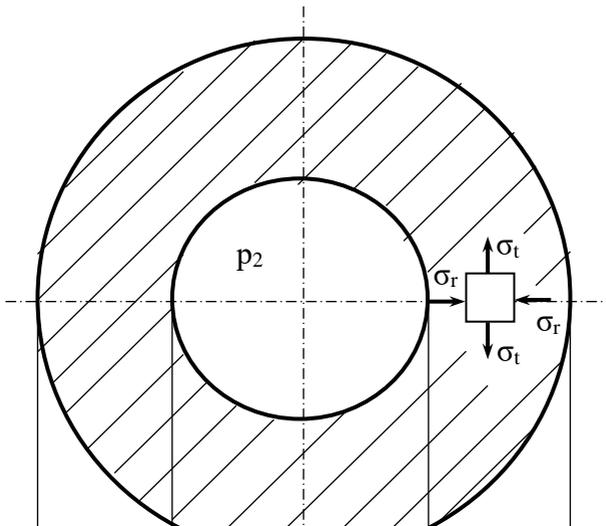


Рис. 4.1. Сечение аппарата высокого давления (схема)

Таблица 4.1. Исходные данные для исследования*

Вариант	D, мм	s, мм	p, МПа
4.xx	_____	_____	_____

* см. таблицу В 6

4.1. Расчётные формулы

Вспомогательный множитель

$$k = p_2 \cdot r_2^2 / (r_1^2 - r_2^2), \text{ МПа} \quad (4.1)$$

Радиальное напряжение

$$\sigma_r = k \cdot (1 - r_1^2 / r^2), \text{ МПа} \quad (4.2)$$

Окружное напряжение

$$\sigma_t = k \cdot (1 + r_1^2 / r^2), \text{ МПа} \quad (4.3)$$

Эквивалентное напряжение по III теории прочности

$$\sigma_{\text{экр}}^{\text{III}} = \sigma_t - \sigma_r, \text{ МПа} \quad (4.4)$$

Эквивалентное напряжение по IV теории прочности

$$\sigma_{\text{экр}}^{\text{IV}} = (\sigma_t^2 + \sigma_r^2 - \sigma_t \cdot \sigma_r)^{0.5}, \text{ МПа} \quad (4.5)$$

4.2. Выполнение работы

4.2.1. Исследование напряжённого состояния в стенке толстостенного сосуда

Исследование проводим с использованием программы Excel. С этой целью заполняем расчётную таблицу Excel (рис. 4.2). Используем стиль ссылок R1C1.

Microsoft Excel - кро-из-4-пример расчёта

Исследование напряжённого состояния в стенке толстостенного сосуда **Студент Вариант 4.хх**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2	Данные			Перем.	Расчёт												
3	D ₂ , мм	s, мм	p ₂ , МПа	r ₁ , мм	r ₂ =D ₂ /2, мм	r ₁ +r ₂ , мм	k=p ₂ *r ₂ ² /(r ₁ ² -r ₂ ²), МПа	σ _r (k*(1+r ₁ ² /r ²)), МПа	σ _t (k*(1+r ₂ ² /r ²)), МПа	σ _θ , МПа	σ _{IV} , МПа						
4	180	30	90	90	90	180	45	-35	125	160	166						
5				91	90	120	45	-33	123	157	143						
6				92			45	-32	122	153	140						
7				93			45	-30	120	150	137						
8				94			45	-28	118	147	135						
9				95			45	-27	117	144	132						
10				96			45	-26	116	141	130						
11				97			45	-24	114	138	127						
12				98			45	-22	112	135	125						
13				99			45	-21	111	132	123						
14				100			45	-20	110	130	121						
15				101			45	-19	109	127	119						
16				102			45	-17	107	124	117						
17				103			45	-16	106	122	115						
18				104			45	-15	105	120	113						
19				105			45	-14	104	118	111						
20				106			45	-13	103	115	110						
21				107			45	-12	102	113	108						
22				108			45	-11	101	111	106						
23				109			45	-10	100	109	105						
24				110			45	-9	99	107	103						
25				111			45	-8	98	104	102						
26				112			45	-7	97	103	100						
27				113			45	-6	96	101	99						
28				114			45	-5	95	100	97						
29				115			45	-4	94	98	95						
30				116			45	-3	93	96	95						
31				117			45	-2	92	95	94						
32				118			45	-2	92	93	92						
33				119			45	-1	91	92	91						
34				120			45	0	90	90	90						

Рис. 4.2. Работа №4. Скриншот расчётной таблицы

Оформление расчётной таблицы

Строка R1 → Идентификационная: Исследование напряжённого состояния в стенке толстостенного сосуда **Студент Вариант 4.хх**.

Строка R2 → Данные (C1 – C3); Переменная (C4); Расчёт (C5-C11).

Строка R3 → Обозначение содержания столбцов, размерность величин

Ячейка R3C1 → D ₂ , мм	Ячейка R3C7 → $k=p_2*r_2^2/(r_1^2-r_2^2)$, МПа
Ячейка R3C2 → s, мм	Ячейка R3C8 → $\sigma_r=k(1-r_1^2/r^2)$, МПа
Ячейка R3C3 → p ₂ , МПа	Ячейка R3C9 → $\sigma_t=k(1+r_1^2/r^2)$, МПа
Ячейка R3C4 → r, мм	Ячейка R3C10 → σ _{III} , МПа
Ячейка R3C5 → r ₂ =D ₂ /2, мм	Ячейка R3C11 → σ _{IV} , МПа
Ячейка R3C6 → r ₁ =r ₂ +s, мм	

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C1 – Строка R4 → 180 = const

Столбец C2 – Строка R4 → 30 = const

Столбец C3 – Строка R4 → 35 = const

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец C4 – Строки R4- R34 → переменная r; строка R4 → r = 90; строки R5- R34 с шагом 1 → =R[-1]C+1

Столбец C5 – Строка R4 → =RC[-4]/2

Столбец C6 – Строка R4 → =RC[-1]+RC[-4]

Столбец C7 - Строки R4- R34 → =35*90*90/(120*120-90*90) → (35=const; 90=const; 120=const)

Столбец C8 - Строки R4- R34 → =RC[-1]*(1-120*120/(RC[-4]*RC[-4])) → (120=const)

Столбец C9 - Строки R4- R34 =RC[-2]*(1+120*120/(RC[-5]*RC[-5])) → (120=const)

Столбец C10 - Строки R4- R34 $\rightarrow =RC[-1]-RC[-2]$

Столбец C11 - Строки R4- R34 $\rightarrow =КОРЕНЬ(RC[-2]*RC[-2]+RC[-3]*RC[-3]-RC[-2]*RC[-3])$

4.2.2. Построение иллюстрационных диаграмм

Иллюстрационная диаграмма на рис. 4.3. строится с помощью программы Мастер диаграмм. Принята точечная диаграмма со значениями, соединенными отрезками баз маркеров. При построении используются данные столбцов C4, C8, C9 расчётной таблицы (рис. 4.2).

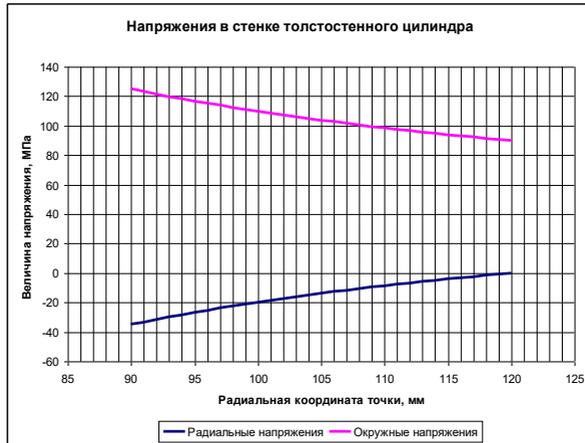


Рис. 4.3. Зависимость напряжения в стенке цилиндра от координаты точки

Иллюстрационная диаграмма на рис. 4.4. строится с помощью программы Мастер диаграмм. Принята точечная диаграмма со значениями, соединенными отрезками баз маркеров. При построении используются данные столбцов C4, C10, C11 расчётной таблицы (рис. 4.2).

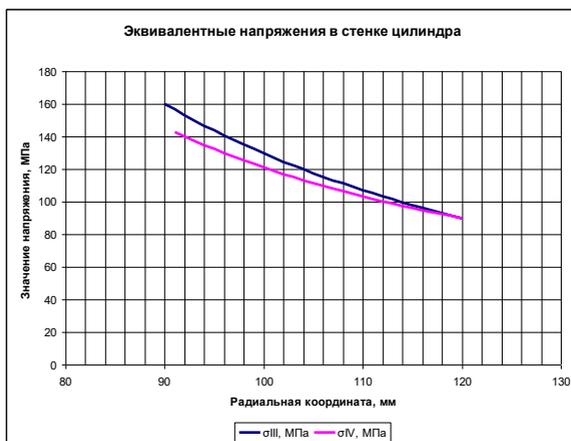


Рис. 4.4. Зависимость эквивалентного напряжения в стенке цилиндра от координаты точки

4.2.3. Выводы:

1. Наиболее нагруженными являются металл (указать координату нагруженной точки) (рис. 4.3).
2. Сопоставить значения эквивалентных напряжений (рис. 4.4).

Работа № 5. Исследование размещения отверстий под трубы в трубной решётке кожухотрубчатого теплообменника

Задание. Изучить схемы размещения отверстий под трубы в трубной решётке по треугольнику и квадрату; освоить камеральную разметку трубной решётки при размещении отверстий под трубы; составить таблицы индексов

отверстий; выполнить схемы размещения отверстий на трубной решётке; сравнить компактность размещения отверстий по треугольнику и квадрату.

Материалы и инструменты: миллиметровая бумага формата А3 (2 листа), чертёжные принадлежности (циркули, линейка, карандаши, ластик), инженерный калькулятор.

Таблица 5.1. Исходные данные для исследования*

Вариант	$D_H \times S_K$, мм	d_H , мм
5.xx	_____	_____
* см. таблицу В 7		

5.1. Расчётные формулы

Для использования камеральной разметки трубной решётки при размещении отверстий под трубы, на поверхности трубной решётки формируем сетку в системе координат XOY (рис. 5.1). Начало координат сетки находится на окружности диаметром D (после уточнения в процессе расчёта – диаметром D')

$$D = D_B - (d_H + 14), \text{ мм} \quad (5.1)$$

Предварительно выбираем шаг размещения трубных отверстий $t_{отв}$ (таблица П2). Параметры сетки размещения отверстий t_x , t_y представлены в в таблицах П3, П4. Дальнейшие расчёты проводим в зависимости от размещения труб на трубной решётке (треугольное или квадратное).

Число отверстий на большой диагонали шестиугольника (см. рис. 5.1 а)

$$b = D/t_{отв} + 1 \quad (5.2 \text{ а})$$

Число отверстий на большой диагонали квадрата (см. рис. 5.1 б)

$$b = D/(2 \cdot t_x) + 1 \quad (5.2 \text{ б})$$

Для квадратного размещения принимаем «b» целым (в меньшую сторону) $b \rightarrow b'$

Число отверстий на большой стороне шестиугольника отверстий

$$a = (b + 1)/2 \quad (5.3)$$

Для треугольного размещения принимаем «a» целым (в меньшую сторону) $a \rightarrow a'$

После уточнения «a» для треугольного размещения отверстий, уточняем «b»:

$$b' = 2 \cdot a' - 1 \quad (5.4)$$

Уточняем величину $D \rightarrow D'$:

$$\text{треугольное размещение } D' = t_{отв} \cdot (b' - 1) \quad (5.5)$$

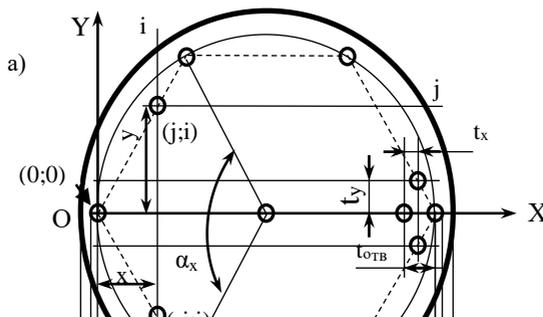


Рис. 5.1. Координатная сетка размещения отверстий в трубных решётках теплообменников по треугольнику (а) и квадрату (б): $D_{в}$ - внутренний диаметр аппарата; D_0 - диаметр предельной окружности, за которой располагают отверстия под трубы; D (D' - диаметр, размещения центров периферийных отверстий; D' - тоже после уточнения; $t_{отв}$, - шаг размещения трубных отверстий; t_x , t_y - шаг сетки в поперечном и продольном направлениях.

$$\text{квадратное размещение } D' = 2 \cdot t_x \cdot (b' - 1) \quad (5.6)$$

Трубная решётка обозначается символом - « $D' \times d_H$ мм».

Компактность размещения отверстий в трубной решётке характеризуется величиной площади трубной решётки $f_{тр}$, приходящейся на одну трубу

$$\text{треугольное размещение } f_{тр} = 0,866 \cdot t_{отв}^2 \quad (5.7 \text{ а})$$

квадратное размещение $f_{\text{тр}} = t_{\text{отв}}^2$

(5.7 б)

5.2. Заполнение таблиц индексов отверстий

Для заполнения таблиц индексов отверстий необходимо в заготовке таблицы заполнить ячейки значений координат поперечных рядов x_i и продольных рядов y_j . Значения координат рядов x_i , y_j представлены в таблицах ПЗ, П4 приложения. При заполнении таблиц обратите внимание на следующее: количество поперечных рядов определяется условием u_{max} не более $0,5 \cdot D'$; количество поперечных рядов определяется условием $x_{\text{max}} = D'$. После заполнения таблиц проверяем значения a' и b' , ранее вычислим.

Таблица 5.2 Координаты рядов и индексы отверстий для трубной решётки « $D'-d_n$ мм» (треугольное размещение)

Прод. ряды		Поперечные ряды; координата ряда x_i (мм)												
Ряды	y_j , мм	i_0	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9	i_{10}	i_{11}	i_{12}
		0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
j_3	y_3	—	—	—	3;3	—	3;5	—	3;7	—	3;9	—	—	—
j_2	y_2	—	—	2;2	—	2;4	—	2;6	—	2;8	—	2;10	—	—
j_1	y_1	—	1;1	—	1;3	—	1;5	—	1;7	—	1;9	—	1;11	—
j_0	0	0;0	—	0;2	—	0;4	—	0;6	—	0;8	—	0;10	—	0;12
j_{-1}	y_{-1}	—	-1; 1	—	-1; 3	—	-1; 5	—	-1; 7	—	-1; 9	—	-1; 11	—
j_{-2}	y_{-2}	—	—	-2; 2	—	-2; 4	—	-2; 6	—	-2; 8	—	-2; 10	—	—
j_{-3}	y_{-3}	—	—	—	-3; 3	—	-3; 5	—	-3; 7	—	-3; 9	—	—	—

Примечание: **Жирным шрифтам** выделены отверстия, расположенные на большом шестиугольнике отверстий.

Таблица 5.3 Координаты рядов и индексы отверстий для трубной решётки « $D'-d_n$ мм» (квадратное размещение)

Прод. ряды		Поперечные ряды; координата ряда x_i								
Ряды	y_j	i_0	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8
		0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
j_4	y_4	—	—	—	—	4;4	—	—	—	—
j_3	y_3	—	—	—	3;3	—	3;5	—	—	—
j_2	y_2	—	—	2;2	—	2;4	—	2;6	—	—
j_1	y_1	—	1;1	—	1;3	—	1;5	—	1;7	—
j_0	0	0;0	—	0;2	—	0;4	—	0;6	—	0;8
j_{-1}	y_{-1}	—	-1; 1	—	-1; 3	—	-1; 5	—	-1; 7	—
j_{-2}	y_{-2}	—	—	-2; 2	—	-2; 4	—	-2; 6	—	—
j_{-3}	y_{-3}	—	—	—	-3; 3	—	-3; 5	—	—	—
j_{-4}	y_{-4}	—	—	—	—	-4;4	—	—	—	—

Примечание: **Жирным шрифтам** выделены отверстия, расположенные на большом квадрате отверстий.

5.3. Выполнение схем размещения отверстий

Схемы размещения отверстий выполняем на листах миллиметровой или белой бумаги соответствующего формата. Формат выбирается таким образом, чтобы схема была выполнена, по возможности, в натуральную величину. В случае выполнения схемы с уменьшением допускается выбирать произвольный масштаб (1:1,2; 1:1,3 и т.д.). Приветствуется построение схем с помощью графического редактора.

Выполнение схем начинается с построения окружности размещения периферийных отверстий диаметром D' (рис. 5.2, 5.3). Затем проводим линии продольных и поперечных рядов в соответствии с координатами рядов, соответственно, x_i и y_j , указанными в таблицах индексов отверстий. Отверстия размещаются в соответствующих узлах сетки (на рисунках 5.2, 5.3 узлы сетки, где размещены отверстия, отмечены жирным крестиком). Сначала отмечаем отверстия в количестве b' штук, размещённые на большой диагонали шестиугольника отверстий (рис. 5.2) и большой диагонали квадрата отверстий (рис. 5.3), затем остальные по принципу «через ряд».

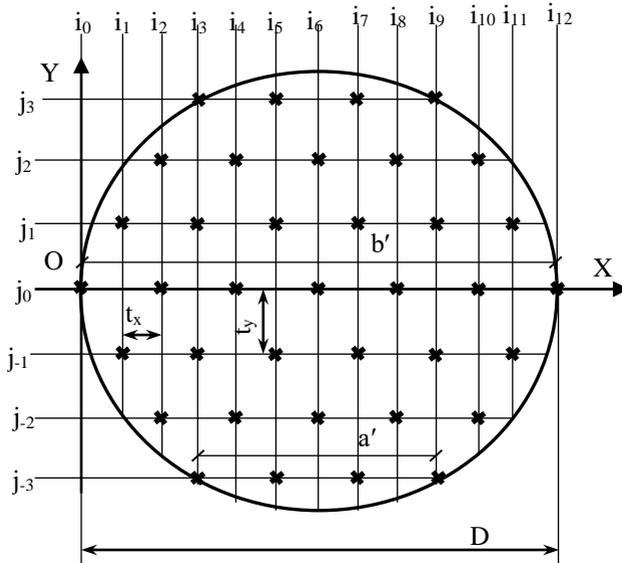


Рис. 5.2. Схема треугольного размещения отверстий в трубной решётке теплообменника

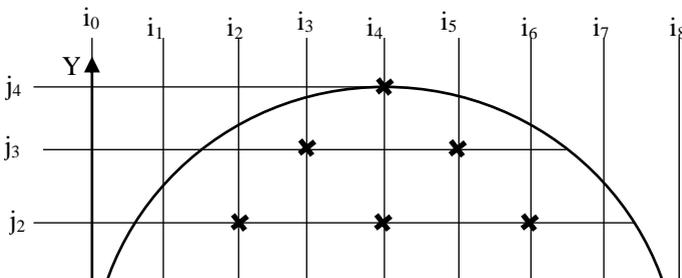


Рис. 5.3. Схема квадратного размещения отверстий в трубной решётке теплообменника

5.4. Сравнение компактности трубных пучков при треугольном и квадратном размещении

Компактность трубных пучков оцениваем по площади трубной решётки, приходящейся на одну трубу (см. формулы 5.7 а, 5.7 б).

Работа № 6. Компоновка теплообменного аппарата

Задание. Изучить конструкцию кожухотрубчатого теплообменника; выбрать полуфабрикатов для изготовления элементов аппарата; выполнить расчёт

массы аппарата при монтаже и гидравлическом испытании; определить габаритные размеры теплообменника.

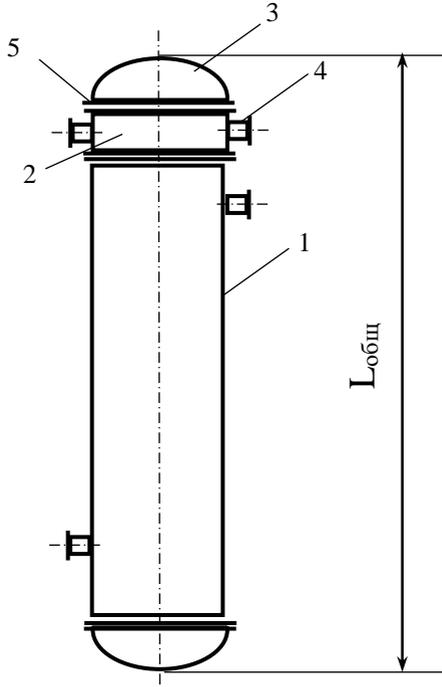


Рис. 6.1. Кожухотрубчатый теплообменник (схема): 1 – кожух; 2 – распределительная камера; 3 – эллиптическое днище (2 шт.); 4 – штуцер (4 шт.); 5 – фланец (6 шт.) (трубные решётки на схеме не показаны).

Таблица 6.1. Исходные данные для компоновки теплообменного аппарата*

№ п/п	Наименование параметра, обозначение	Значение	Размерность
1.	Диаметр аппарата, D_B	xx	м
2.	Толщина стенки кожуха, s_1	xx	мм
3.	Теплообменные трубы, $d_{н} \times s_T$	xx	мм
4.	Число теплообменных труб, $n_{зтр.}$	xx	—
5.	Длина теплообменных труб, $l_{тр}$	xx	м
6.	Толщина стенки распределительной камеры, s_2	xx	мм
7.	Патрубок штуцера, $d_{ш} \times s_{ш}$	xx×xx	мм
8.	Ширина укрепляющего накладного	xx	мм

№ п/п	Наименование параметра, обозначение	Значение	Размерность
	кольца, $b_{н.к.}$		
9.	Толщина эллиптического днища, s_3	xx	мм
10.	Толщина трубной решётки, s_5	xx	мм
11.	Общая высота фланцев, H_{ϕ}	xx	м
12.	Марка стали	xx	—

* исходные данные выбираются в соответствии с параметрами теплообменника курсовой работы по КРЭО после выполнения соответствующих конструктивных (п. 4) и прочностных (п.п. 2, 6-11) расчётов.

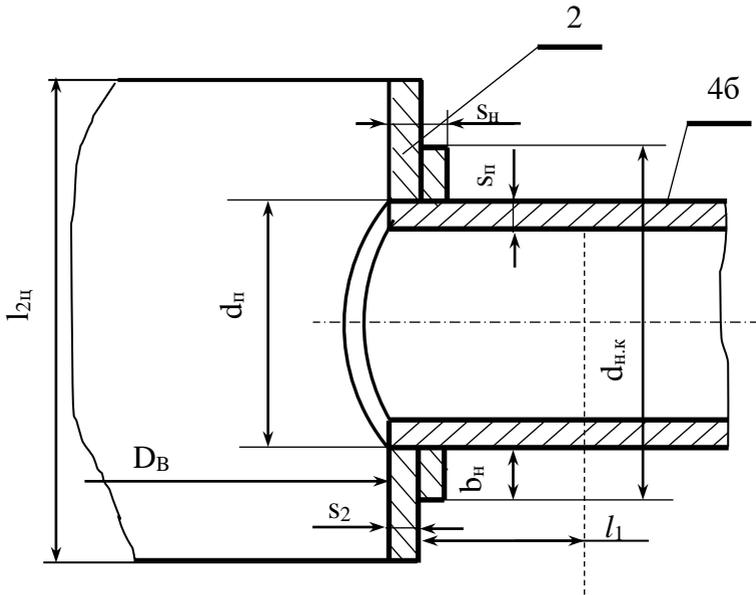


Рис. 6.2. . Схема укрепления отверстия под патрубок штуцера в обечайке распределительной камеры: 2 – обечайка распределительной камеры; 4 б – штуцер ввода среды в трубное пространство; $D_{в}$ – внутренний диаметр аппарата; $l_{2ц}$ – длина обечайки распределительной камеры; s_2 – толщина стенки распределительной камеры; $d_{н}$ – наружный диаметр патрубка; $s_{п}$ – толщина стенки патрубка; l_1 – расчётная длина патрубка, участвующая в укреплении; $b_{н}$ – ширина накладного кольца; $d_{н.к}$ – наружный диаметр накладного кольца; $s_{н}$ – толщина накладного кольца

6.1. Расчётные формулы

6.1.1. Выбор полуфабрикатов для изготовления элементов аппарата

6.1.1.1. Обечайка кожуха: $D_1 = D_B = xx$ мм; $s_1 = xx$ мм (табл.6.1); погонная масса стального листа $m_{п.л} = xx$ кг/м² (табл. П4); сталь xx (табл. 6.1).

Длину обечайки кожуха определяем конструктивно

$$l_{1ц} = l_{тр} - 2 \cdot H_{\phi} \quad (6.1)$$

здесь $H_{\phi} = xx$ м (табл. 6.1)

Обечайка кожуха изготовлена из листовой стали толщиной $s_1 = xx$ мм по ГОСТ 19903–74.

6.1.1.2. Обечайка распределительной камеры: $D_2 = D_B = xx$ мм; $s_2 = xx$ мм (табл. 6.1); $m_{п.л} = xx$ кг/м² (табл.П4); сталь xx.

Длину обечайки распределительной камеры определяем конструктивно

$$l_{2ц} = d_{н.к} + 200 \quad (6.2)$$

здесь $d_{н.к} = d_{п} + 2 \cdot b_{н.к}$ накладного кольца (см. рис. 6.2)

Обечайка распределительной камеры изготовлена из листовой стали толщиной $s_2 = xx$ мм по ГОСТ 19903–74.

Патрубки штуцеров изготовлены из стальной бесшовной горячедеформированной трубы $xx \times xx$ мм (табл. 6.1) по ГОСТ 8732–78.

6.1.1.3. Эллиптическое днище (2 шт.) по ГОСТ 6533–78; $D_3 = xx$ м; $s_3 = xx$ мм; сталь xx (табл. 6.1); высота борта $h_{борта} = xx$ мм; внутренняя высота выпуклой части $h_B = xx$ мм; объём полости $V_{дн} = xx$ м³; масса $m_{дн} = xx$ кг (табл. П5).

6.1.1.4. Фланцы монометаллические с втулкой приварные встык по ГОСТ 28759.3–90. Сталь xx (табл. 6.1).

Осевой габаритный размер фланца $H_{\phi} = xx$ м (табл. П6); масса фланца $m_{\phi} = xx$ кг (табл. П7).

6.1.1.5. Трубная решётка – 2 шт. Сталь 16ГС. $D_5 = D_B = xx$ м; $s_5 = xx$ мм (табл. 6.1); $m_{п.л} = xx$ кг/м² (табл. 6.4).

6.1.1.6. Теплообменные трубы. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные по ГОСТ 8734–78. Сталь 20. $d_{н \times ст} = xx \times xx$ мм; $l_{тр} = xx$ м; $n_{з.тр} = xx$ шт. (табл. 6.1); $m_{п.тр} = xx$ кг/м (табл.6.8).

6.2.2. Расчёт объёма внутренних полостей и массы элементов аппарата

6.2.2.1. Кожух (состоит из цилиндрической обечайки и двух аппаратных фланцев)

Объём внутренней полости кожуха

$$V_1 = 0,785 \cdot D_1^2 \cdot (l_{тр} - 2 \cdot s_5), \text{ м}^3 \quad (6.3)$$

Масса кожуха

$$m_1 = \pi \cdot D_{1ср} \cdot l_1 \cdot m_{п.л} + 2 \cdot m_{\phi}, \text{ кг} \quad (6.4)$$

6.2.2.2. Распределительная камера (состоит из цилиндрической обечайки и двух аппаратных фланцев)

Объём внутренней полости распределительной камеры

$$V_2 = 0,785 \cdot D_2^2 \cdot (l_{2ц} + 2 \cdot H_{\phi}), \text{ м}^3 \quad (6.5)$$

Масса распределительной камеры

$$m_2 = \pi \cdot D_{2cp} \cdot l_{2ц} \cdot m_{2пл} + 2 \cdot m_{ф}, \text{ кг} \quad (6.6)$$

6.2.2.3. Днище (состоит из эллиптической части и аппаратного фланца)

Объём внутренней полости днища

$$V_3 = V_{дн} + 0,785 \cdot D_3^2 \cdot H_{ф}, \text{ м}^3 \quad (6.7)$$

Масса днища

$$m_3 = m_{дн} + m_{ф}, \text{ кг} \quad (6.8)$$

6.2.2.4. Трубная решётка

Масса трубной решётки (с учётом наличия отверстий для размещения теплообменных труб)

$$m_5 = 0,785 \cdot (D_B^2 - d_{н^2} \cdot n_T) \cdot m_{пл}, \text{ кг} \quad (6.9)$$

6.2.2.5. Теплообменные трубы

Масса труб

$$m_{тр} = n_{z,тр} \cdot l_{тр} \cdot m_{пт}, \text{ кг} \quad (6.10)$$

6.2.2.6. Уточняем объём внутренней полости кожуха

$$V_1 = 8,913 - V_{м.тр}, \text{ м}^3 \quad (6.11)$$

здесь $V_{м.тр} = m_{тр}/7850, \text{ м}^3$ – объём металла теплообменных труб

6.2.3. Расчёт габаритных размеров аппарата и массы его при монтаже и при гидравлическом испытании

6.2.3.1. Высота кожуха

$$l_1 = l_{тр}, \text{ мм} \quad (6.12)$$

6.2.3.2. Высота распределительной камеры

$$l_2 = l_{2ц} + 2 \cdot H_{ф}, \text{ мм} \quad (6.13)$$

6.2.3.3. Высота днища

$$l_3 = h_B + h_{борта} + H_{ф} + s_3, \text{ мм} \quad (6.14)$$

6.2.3.4. Габаритная высота аппарата (без опор)

$$L = l_1 + l_2 + 2 \cdot l_3, \text{ мм} \quad (6.15)$$

6.2.3.5. Габаритный диаметр аппарата (по фланцам)

$$D = D_{1ф}, \text{ мм}$$

6.2.3.6. Монтажная масса аппарата

$$M_m = m_1 + m_2 + 2 \cdot m_3 + 2 \cdot m_5 + m_{тр}, \text{ кг} \quad (6.16)$$

6.2.3.7. Объём внутренней полости аппарата

$$V_{в.п} = V_1 + V_2 + 2 \cdot V_{дн}, \text{ м}^3 \quad (6.17)$$

6.2.3.8. Масса аппарата при гидравлическом испытании

$$M_{г.и.} = M_m + \rho_{ср} \cdot V_{в.п}, \text{ кг} \quad (6.18)$$

здесь $\rho_{ср} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность среды для проведения гидравлических испытаний.

6.3. Сводные данные по аппарату

Габаритная высота $L = \text{xx мм}$; габаритный диаметр $D = \text{xx мм}$; монтажная масса $M_m = \text{xx кг}$; масса при гидравлическом испытании $M_{г.и.} = \text{xx кг}$.

Работа № 7. Исследование критической скорости вала мешалки при разной компоновке

Задание. Исследовать критическую скорость вала мешалки разной компоновки. Проанализировать полученный результат.

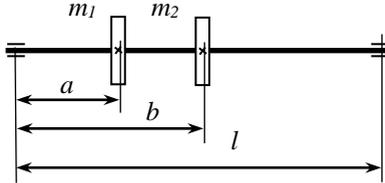


Рис. 7.1. Расчётная схема вала мешалки однопролётного исполнения

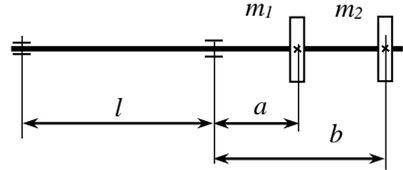


Рис. 7.2. Расчётная схема вала мешалки консольного исполнения

Таблица 7.1		Исходные данные для исследования*				
Вариант	d	l	m ₁	m ₂	a	b
	мм	м	кг		м	
7.xx	_____	_____	_____	_____	_____	_____

*см. таблицу В 9

Пояснения: d – диаметр вала; l – расстояние между опорами; m₁, m₂ – масса мешалок; рис. 7.1: a – расстояние от левой опоры до мешалки №1; b – расстояние от левой опоры до мешалки №2; рис. 7.2: a – расстояние от опоры до мешалки №1; b – от левой опоры до мешалки №2.

7.1. Расчётные формулы

7.1.1. Предварительные расчёты

Момент инерции вала $I_x = 0,05 \cdot d^4$, м⁴.

Вспомогательный коэффициент: $A = E \cdot I_x$, Н·м²

7.1.2. Коэффициенты влияния δ_{ij} для однопролётного вала (рис. 7.1, табл. П11)

$$\delta_{11} = a^2 \cdot (l-a)^2 / 3A \cdot l; \delta_{22} = b^2 \cdot (l-b)^2 / 3A \cdot l; \delta_{12} = \delta_{21} = a \cdot (l-b) \cdot (2 \cdot b \cdot l - a^2 - b^2) / 6A \cdot l$$

7.1.3. Коэффициенты влияния δ_{ij} для консольного вала (рис. 7.2, табл. П12)

$$\delta_{11} = a^2 \cdot (a+l) / 3A; \delta_{22} = b^2 \cdot (b+l) / 3A$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = a \cdot (2 \cdot l \cdot b + 3ab - a^2) / 6A$$

7.1.4. Сила тяжести мешалок (дисков)

$$Q_1 = m_1 \cdot g; Q_2 = m_2 \cdot g$$

7.1.5. Статические прогибы вала в сечениях размещения мешалок

$$f_1 = \delta_{11} \cdot Q_1 + \delta_{12} \cdot Q_2 + \delta_{13} \cdot Q_3$$

$$f_2 = \delta_{21} \cdot Q_1 + \delta_{22} \cdot Q_2 + \delta_{23} \cdot Q_3$$

7.2. Выполнение работы

7.2.1. Расчёт вала мешалки однопролётного исполнения

Исследование проводим с использованием программы Excel. С этой целью заполняем расчётную таблицу Excel на листе «однопролётный» (рис. 7.3).

Расчёт вала однопролётного исполнения. Скорости вращений Т.х.х.																
Данные						Предварительные			Коэффициенты влияния			Донкерли		Прогиб		Релея
d	l	m ₁	m ₂	a	b	I _x	ΔE ₁	δ ₁₁	δ ₁₂	ω _Д	f ₁	f ₂	ω _Р	ω _П		
мм	м	кг	кг	м	м	м ⁴	Н·м ²	ммН	ммН	с ⁻¹	мм	мм	с ⁻¹	с ⁻¹		
35	1,5	1,1	3,3	1,039	1,385	2,35718E-07	46907,92	1,63128E-06	1,20181E-07	3,276E-07	671,9074	2,88512E-05	7,66155E-06	715,7907		

Рис. 7.3. Работа №7. Скриншот расчётной таблицы листа «однопролётный»

Оформление расчётной таблицы листа «однопролётный»

Строка R1 → Идентификационная: Расчёт вала однопролётного исполнения.

Студент вариант 7.х.х.

Строка R2 → Данные (C1 – C6); Предварительные расчёты (C7, C8);

Коэффициенты влияния (C9 – C11); скорость по Донкерли (C12); статические прогибы (C13, C14); скорость по Релею (C15)

Строка R3 → Обозначение содержания столбцов

Ячейка R3C1 → d	Ячейка R3C9 → δ ₁₁
Ячейка R3C2 → l	Ячейка R3C10 → δ ₂₂
Ячейка R3C3 → m ₁	Ячейка R3C11 → δ ₁₂
Ячейка R3C4 → m ₂	Ячейка R3C12 → ω(Д)
Ячейка R3C5 → a	Ячейка R3C13 → f ₁
Ячейка R3C6 → b	Ячейка R3C14 → f ₂
Ячейка R3C7 → I _x	Ячейка R3C15 → ω(Р)
Ячейка R3C8 → A = E · I _x	

Строка R4 → Размерность величин

Ячейка R4C1 → мм	Ячейка R4C9 → м/Н
------------------	-------------------

Ячейка R4C2 → м	Ячейка R4C10 → м/Н
Ячейка R4C3 → кг	Ячейка R3C11 → м/Н
Ячейка R4C4 → кг	Ячейка R4C12 → с ⁻¹
Ячейка R4C5 → м	Ячейка R4C13 → м
Ячейка R4C6 → м	Ячейка R4C14 → м
Ячейка R4C7 → м ⁴	Ячейка R4C15 → с ⁻¹
Ячейка R4C8 → Н·м ²	

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец С1 – Строка R5 → 35 мм = const

Столбец С2 – Строка R5 → 1,5 м = const

Столбец С3 – Строка R5 → 1,1 кг = const

Столбец С4 – Строка R5 → 3,5 кг = const

Столбец С5 – Строка R5 → 1,039 м = const

Столбец С6 – Строка R5 → 1,385 м = const

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец С7 – Строка R5 → =0,05*3,1416*СТЕПЕНЬ(RC[-6]/1000;4)

Столбец С8 – Строка R5 → =199000000000*RC[-1]

Столбец С9 – Строка R5 → =RC[-4]*RC[-4]*СТЕПЕНЬ(RC[-7]-RC[-4];2)/(3*RC[-1])

Столбец С10 – Строка R5 → =RC[-4]*RC[-4]*СТЕПЕНЬ(RC[-8]-RC[-4];2)/(3*RC[-2]*RC[-8])

Столбец С11 – Строка R5 → =RC[-6]*(RC[-9]-RC[-5])*(2*RC[-5]*RC[-9]-RC[-6]*RC[-6]-RC[-5]*RC[-5])/(6*RC[-3]*RC[-9])

Столбец С12 – Строка R5 → =1/КОРЕНЬ(RC[-3]*RC[-9]+RC[-2]*RC[-8])

Столбец С13 – Строка R5 → =RC[-10]*9,81*RC[-4]+RC[-9]*9,81*RC[-2]

Столбец С14 – Строка R5 → =RC[-11]*9,81*RC[-3]+RC[-10]*9,81*RC[-4]

Столбец С15 – Строка R5 → =КОРЕНЬ(9,81*(RC[-12]*RC[-2]+RC[-11]*RC[-1])/(RC[-12]*RC[-2]*RC[-2]+RC[-11]*RC[-1]*RC[-1]))

7.2.2. Расчёт вала мешалки консольного исполнения

Исследование проводим с использованием программы Excel. С этой целью заполняем расчётную таблицу Excel на листе «однопролётный» (рис. 7.4).

Оформление расчётной таблицы листа «консольный»

Строка R1 → Идентификационная: Расчёт вала консольного исполнения.

Студент вариант 7.хх.

Строка R2 → Данные (С1 – С6); Предварительные расчёты (С7, С8);

Коэффициенты влияния (С9 – С11); скорость по Донкерли (С12); статические прогибы (С13, С14); скорость по Релею (С15)

Строка R3 → Обозначение содержания столбцов

Ячейка R3C1 → d	Ячейка R3C9 → δ ₁₁
Ячейка R3C2 → l	Ячейка R3C10 → δ ₂₂

Ячейка R3C3 → m_1	Ячейка R3C11 → δ_{12}
Ячейка R3C4 → m_2	Ячейка R3C12 → $\omega(D)$
Ячейка R3C5 → a	Ячейка R3C13 → f_1
Ячейка R3C6 → b	Ячейка R3C14 → f_2
Ячейка R3C7 → I_x	Ячейка R3C15 → $\omega(P)$
Ячейка R3C8 → $A=E \cdot I_x$	

Строка R4 → Размерность величин

Ячейка R4C1 → мм	Ячейка R4C9 → м/Н
Ячейка R4C2 → м	Ячейка R4C10 → м/Н
Ячейка R4C3 → кг	Ячейка R3C11 → м/Н
Ячейка R4C4 → кг	Ячейка R4C12 → c^{-1}
Ячейка R4C5 → м	Ячейка R4C13 → м
Ячейка R4C6 → м	Ячейка R4C14 → м
Ячейка R4C7 → m^4	Ячейка R4C15 → c^{-1}
Ячейка R4C8 → $H \cdot m^2$	

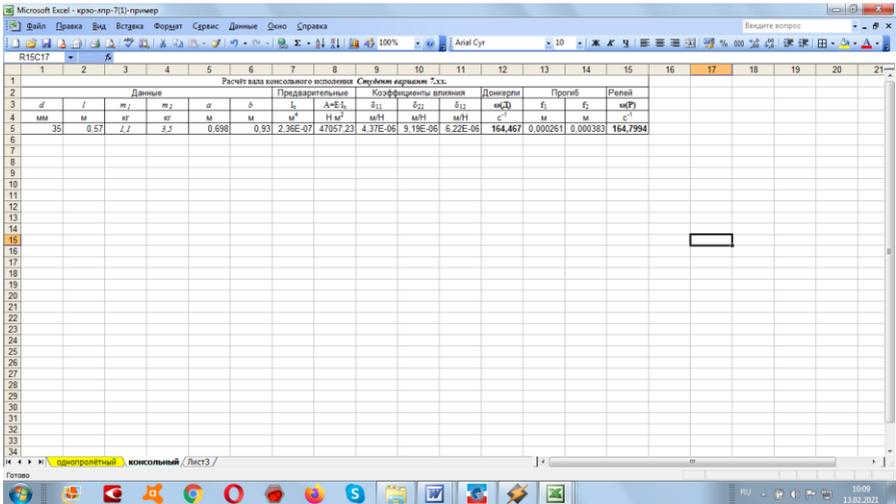


Рис. 7.4. Работа №7. Скриншот расчётной таблицы листа «консольный»

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C1 – Строка R5 → 35 мм = const

Столбец C2 – Строка R5 → 1,5 м = const

Столбец C3 – Строка R5 → 1,1 кг = const

Столбец C4 – Строка R5 → 3,5 кг = const

Столбец C5 – Строка R5 → 1,039 м = const

Столбец C6 – Строка R5 → 1,385 м = const

Расчёты с помощью редактора формул f_x (= в командной строке)

Столбец C7 – Строка R5 → =0,05*3,1416*СТЕПЕНЬ(RC[-6]/1000;4)

Столбец C8 – Строка R5 → =199000000000*RC[-1]

Столбец C9 – Строка R5 → =RC[-4]*RC[-4]*(RC[-7]+RC[-4])/(3*RC[-1])

Столбец C10 – Строка R5 → =RC[-4]*RC[-4]*(RC[-8]+RC[-4])/(3*RC[-2])

Столбец C11 – Строка R5 → =RC[-6]*(2*RC[-9]*RC[-5]+3*RC[-6]*RC[-5]-RC[-6]*RC[-6])/(6*RC[-3])

Столбец C12 – Строка R5 → =1/КОРЕНЬ(RC[-3]*RC[-9]+RC[-2]*RC[-8])

Столбец C13 – Строка R5 → =RC[-10]*9,81*RC[-4]+RC[-9]*9,81*RC[-2]

Столбец C14 – Строка R5 → =RC[-11]*9,81*RC[-3]+RC[-10]*9,81*RC[-4]

Столбец C15 – Строка R5 → =КОРЕНЬ(9,81*(RC[-12]*RC[-2]+RC[-11]*RC[-1])/(RC[-12]*RC[-2]*RC[-2]+RC[-11]*RC[-1]*RC[-1]))

7.3. Результаты исследования

Сравнить критическую скорость вала мешалки однопролётного и консольного исполнения и объяснить полученный результат.

Работа № 8. Исследование напряжённого состояния быстровращающегося диска

Задание. Исследовать распределение радиальных и окружных напряжений быстровращающегося диска; построить эпюры радиальных σ_r и окружных σ_t напряжений в направлении, перпендикулярном оси вращения диска; определить предельную частоту вращения диска из заданного материала.

Таблица 8.1 Исходные данные для исследования*

Вариант	D ₁	D ₂	ω	σ_{r1}	σ_{r2}	Сталь
	мм		с ⁻¹	МПа		
8.хх	_____	_____	_____	_____	_____	_____
*см. таблицу В 10						
Пояснения: D ₁ – диаметр отверстия; D ₂ – наружный диаметр диска; ω – угловая скорость диска; σ_{r1} – радиальные напряжения на посадочной поверхности диска; σ_{r2} – радиальные напряжения на наружной поверхности диска						

8.1. Расчётные формулы

Радиальное σ_r и окружное σ_t напряжения (МПа)

$$\sigma_r = \alpha_r \cdot \sigma_{r1} + \alpha_t \cdot \sigma_{t1} + \alpha_c \cdot T \quad (8.1)$$

$$\sigma_t = \beta_r \cdot \sigma_{r1} + \beta_t \cdot \sigma_{t1} + \beta_c \cdot T, \quad (8.2)$$

Расчётные коэффициенты $\alpha_r, \alpha_t, \alpha_c, \beta_r, \beta_t, \beta_c$

$$\alpha_r = \beta_t = (1+x^2)/2 \quad (8.3)$$

$$\alpha_t = \beta_r = (1-x^2)/2 \quad (8.4)$$

$$\alpha_c = -2,74 \cdot (3,3 - 2,6 \cdot x^2 - 0,7 \cdot x^4) \quad (8.5)$$

$$\beta_c = -2,74 \cdot (1,9 - 2,6 \cdot x^2 + 0,7 \cdot x^4) \quad (8.6)$$

здесь x – относительная координата исследуемой точки $x = R_1/r$

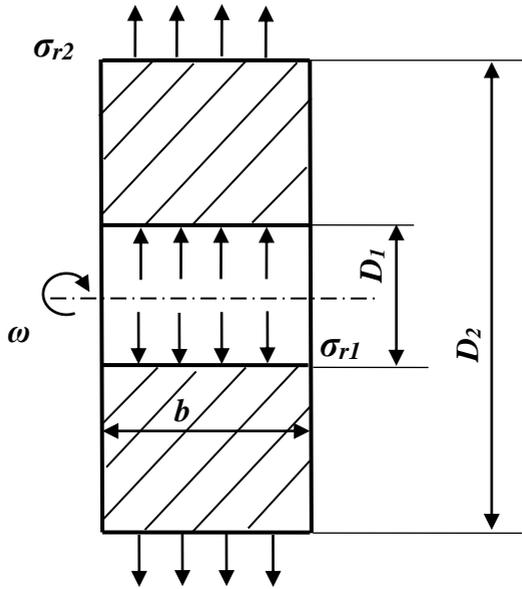


Рис. 8.1. Расчётная схема диска постоянной толщины

Частота вращения диска n

$$n = 30 \cdot \omega / \pi, \text{ c}^{-1} \quad (8.7)$$

Вспомогательная величина T

$$T = (2 \cdot r)^2 \cdot (n/1000)^2, \text{ МПа} \quad (8.8)$$

Величина окружного напряжения при $x = R_2$

$$\sigma_{t1} = [\sigma_{r2} - \alpha_r(R_2) \cdot \sigma_{r1} - \alpha_c(R_2) \cdot T(R_2)] / \alpha_t(R_2), \text{ МПа} \quad (8.9)$$

здесь $\alpha_r(R_2)$, $\alpha_c(R_2)$, $T(R_2)$, $\alpha_t(R_2)$ – значения соответствующих расчётных коэффициентов и вспомогательной величины при $x = R_2$

Предельная угловая скорость диска

$$\omega_{np} = [3 \cdot \sigma_T / \rho \cdot (R_2^2 + R_2 \cdot R_1 + R_1^2)]^{0.5}, \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_T}{\rho \cdot (R_2^2 + R \cdot R_1 + R_1^2)}} \quad (8.10)$$

здесь σ_T – предел текучести материала диска, Па; ρ – плотность материала диска, кг/м^3 (таблица П 13).

8.2. Выполнение работы

Исследование проводим с использованием программы *Excel*. Для этого формируем расчётные таблицы. Используем стиль ссылок R1C1. Книга *Excel* работы №8 содержит 5 листов: «радиальные напряжения», «окружные напряжения», «сводный», «сводный(2)», «рисунок».

8.2.1. Расчётная таблица «радиальные напряжения» (рис. 8.2)

Оформление расчётной таблицы «радиальные напряжения»

Строка R1 → Идентификационная: Расчёт диска. Студент вариант 8.хх.

Строка R2 → Обозначение величин, размерности: C1 – г, м; C2 – x; C3 – α_1 ; C4 – α_2 ; C5 – α_3 ; C6 – T, МПа; C7 – $\alpha_r \cdot \sigma_{r1}$; C8 – $\alpha_r \cdot \sigma_{t1}$; C9 – $\alpha_c \cdot T$, МПа; C10 – σ_r , МПа.

Заполнение столбцов таблицы расчётной таблицы

Столбец C1 → переменная г с шагом 0,01 м (количество строк в столбце зависит от размеров диска ($R_1=0,5 \cdot D_1 \dots R_2=0,5 \cdot D_2$ и выбранного шага); ячейка R3C1 → $R_1 = -RC[-1]C+0,01$

Столбец C2 → относительная переменная x: $= R_1/RC[-1]$

Столбец C3 → расчётный коэффициент α_r : $=(1+RC[-1]*RC[-1])/2$

Столбец C4 → расчётный коэффициент α_c : $=(1-RC[-2]*RC[-2])/2$

г, м	x	α_r	α_c	T, МПа	$\alpha_r \cdot \sigma_{r1}$	$\alpha_r \cdot \sigma_{t1}$	$\alpha_c \cdot T$, МПа	σ_r , МПа	
0.15	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.00000000	-0.0000	0.0000	-0.0000	
0.16	0.9375	0.9396	0.0601	-0.2991	0.654611448	-4.6373	7.3863	-0.7179	1.7311
0.17	0.8750	0.8819	0.1197	-0.7333	0.604602686	-4.4642	13.7417	-1.5367	7.1661
0.18	0.8125	0.8472	0.1528	-1.0680	0.738430652	-4.2561	18.1332	-2.3407	11.5564
0.19	0.7500	0.8118	0.1884	-1.3600	0.827171644	-4.0521	22.2111	-3.1272	15.7238
0.20	0.7000	0.7819	0.2168	-1.4271	0.917643044	-3.8621	25.3631	-3.8868	19.6925
0.21	0.7423	0.7551	0.2444	-0.8000	1.005084262	-3.7752	29.0969	-4.5100	20.3584
0.22	0.6818	0.7248	0.2674	-0.3174	1.100909078	-3.6602	31.7669	-5.0172	22.0710
0.23	0.6522	0.7127	0.2877	-0.4660	1.205447192	-3.6103	34.1037	-5.4100	23.7192
0.24	0.6296	0.6983	0.304	-0.5660	1.312760978	-3.5462	36.2634	-5.7426	24.8447
0.25	0.6000	0.6800	0.3000	-0.2200	1.42444225	-3.4500	37.8800	-6.0725	25.7087
0.26	0.5769	0.6644	0.3104	-0.4344	1.540471738	-3.3251	38.6526	-6.3653	26.1101
0.27	0.5564	0.6543	0.3457	-0.4600	1.661489444	-3.2748	41.0286	-11.9863	26.0008
0.28	0.5357	0.6416	0.3604	-0.8196	1.786031348	-3.2418	42.7416	-12.5107	26.0711
0.29	0.5172	0.6333	0.3664	-0.9560	1.914724320	-3.1668	43.4870	-13.4147	26.0843
0.30	0.5000	0.6262	0.3750	-1.1411	2.05119684	-3.1262	44.5988	-14.6270	26.7350
0.31	0.4839	0.6171	0.3676	-0.9596	2.195522444	-3.0601	46.4050	-15.9002	26.4448
0.32	0.4688	0.6099	0.3991	-1.3841	2.332888192	-3.0493	46.3053	-17.2132	26.0232
0.33	0.4544	0.6031	0.3961	-0.8862	2.474481718	-3.0162	47.0936	-18.0644	26.4117
0.34	0.4412	0.5971	0.4207	-1.5827	2.634848386	-2.9866	47.7843	-19.3779	24.8798
0.35	0.4286	0.5916	0.4262	-0.6888	2.797950671	-2.9555	48.4434	-21.4106	24.8116
0.36	0.4167	0.5864	0.4152	-1.7474	2.963723465	-2.9340	49.0420	-22.8836	23.2244
0.37	0.4054	0.5820	0.4178	-1.0178	3.132089388	-2.9146	49.5744	-24.8171	22.6515
0.38	0.3947	0.5779	0.4201	-1.6842	3.303131574	-2.8959	50.0380	-26.5811	21.5174
0.39	0.3846	0.5740	0.4260	-1.8402	3.48522966	-2.8688	50.5462	-27.5450	20.1107
0.40	0.3750	0.5703	0.4291	-1.8001	3.668157116	-2.8516	50.9998	-29.0908	19.8072
0.41	0.3659	0.5669	0.4311	-0.8041	3.831179878	-2.8344	51.4817	-30.8967	17.7100
0.42	0.3571	0.5636	0.4362	-0.7001	4.002436662	-2.8193	51.9762	-32.7372	16.8034
0.43	0.3488	0.5608	0.4390	-0.1467	4.214289952	-2.8042	52.3735	-34.3108	14.9881
0.44	0.3409	0.5581	0.4418	-0.1891	4.417621574	-2.7902	52.6880	-36.7028	13.2844
0.45	0.3333	0.5558	0.4444	-0.2268	4.615192838	-2.7778	52.7111	-37.9681	12.0052

Рис. 8.2. Работ №8. Скриншот листа «радиальные напряжения» расчётной таблицы

Столбец C5 → расчётный коэффициент α_c :
 $= -2,74*(3,3-2,6*СТЕПЕНЬ(RC[-3];2))-0,7*СТЕПЕНЬ(RC[-3];4)$

Столбец C6 → вспомогательная величина T:
 $=СТЕПЕНЬ(2*RC[-5];2)*СТЕПЕНЬ(0,001*n;2)$

Столбец C7 → $\alpha_r \cdot \sigma_{r1} = RC[-4]*\sigma_{r1}$

Столбец C8 → $\alpha_r \cdot \sigma_{t1} = RC[-4]*\sigma_{t1}$

Столбец C9 → $\alpha_c \cdot T = RC[-4]*RC[-3]$

Столбец C10 → $\sigma_r := RC[-3]+RC[-2]+RC[-1]$

Проверка: $r = R_1 \rightarrow \sigma_r = \sigma_{r1}$; $r = R_2 \rightarrow \sigma_r = \sigma_{r2}$

8.2.2. Расчётная таблица «окружные напряжения» (рис. 8.3).

Оформление расчётной таблицы «Окружные напряжения»

Строка R1 → Идентификационная: Расчёт диска. Студент вариант 8.хх.

Строка R2 → Обозначение величин, размерности: C1 – r, м; C2 – x; C3 – β_i ; C4 – β_r ; C5 – β_c ; C6 – T, МПа; C7 – $\beta_r \cdot \sigma_{r1}$; C8 – $\beta_r \cdot \sigma_{r1}$; C9 – $\beta_c \cdot T$, МПа; C10 – σ_r , МПа.

Заполнение столбцов расчётной таблицы

Столбец C2 → переменная r с шагом 0,01 м (количество строк в столбце зависит от размеров диска ($R_1=0,5 \cdot D_1 \dots R_2=0,5 \cdot D_2$ и выбранного шага);

ячейка R3C1 → $R_1 := RC[-1]C+0,01$

Столбец C2 → относительная переменная x: $x = R_1/RC[-1]$

Столбец C3 → расчётный коэффициент $\beta_i := (1+RC[-1]*RC[-1])/2$

Столбец C4 → расчётный коэффициент $\beta_r := (1-RC[-2]*RC[-2])/2$

Столбец C5 → расчётный коэффициент $\beta_c := -2,74*(1,9-2,6*СТЕПЕНЬ(RC[-3];2)+0,7*СТЕПЕНЬ(RC[-3];4))$

Столбец C6 → вспомогательная величина T: $T := СТЕПЕНЬ(2*RC[-5];2)*СТЕПЕНЬ(0,001;n;2)$

Столбец C7 → $\beta_r \cdot \sigma_{r1} := RC[-3]*\sigma_{r1}$

Столбец C8 → $\beta_r \cdot \sigma_{r1} := RC[-5]*\sigma_{r1}$

Столбец C9 → $\beta_c \cdot T := RC[-4]*RC[-3]$

Столбец C10 → $\sigma_r := RC[-3]+RC[-2]+RC[-1]$

Проверка: $r = R_1 \rightarrow \sigma_r = \sigma_{r1}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.01	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
0.10	0.001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
0.16	0.0016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016	0.00016
0.17	0.0017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017
0.18	0.0018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018
0.19	0.0019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019
0.2	0.002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
0.21	0.0021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021
0.22	0.0022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022	0.00022
0.23	0.0023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023
0.24	0.0024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024
0.25	0.0025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
0.26	0.0026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026	0.00026
0.27	0.0027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027	0.00027
0.28	0.0028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028
0.29	0.0029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029	0.00029
0.3	0.003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
0.31	0.0031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031
0.32	0.0032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032	0.00032
0.33	0.0033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033	0.00033
0.34	0.0034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034

Рис.8.3. Работ №8. Скриншот листа «окружные напряжения» расчётной таблицы

8.2.3. Расчётная таблица листа «сводный» (рис. 8.4, 8.5)

Данная расчётная таблица получена копированием информации листов «Радиальные напряжения» и «Окружные напряжения» и перенесением её на лист «сводный» (рис. 8.4). Объединение информации о действующих в диске напряжениях на одном листе вызвано необходимостью построения эпюры напряжений $\sigma_r(r)$, $\sigma_t(r)$. После формирования листа «Сводный» фиксируем содержание ячеек с помощью опций «Копировать»→«Специальная вставка»→«Значения». После Фиксации содержания ячеек удаляем столбцы, не используемые при построении иллюстрационной диаграммы (рис 8.5).

Microsoft Excel - книга-р-4-проект-расчет(2)

Вкладка: сводный

Кол1222

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22

1 Расчет диска Сводный Рядовые Лист

2 r, m r, inch t, mm t, inch

3 0.15 1.0000 0.0000 0.0000 0.15279017 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.15279017 0.0000 118.6900 0.0000 118.6900

4 0.18 0.9375 0.9375 0.0600 0.36991154 0.4837 1.7863 0.2750 1.7311 0.18 0.9375 0.9395 0.0600 0.4269 0.68341944 0.3027 110.9377 0.2487 110.9392

5 0.17 0.9824 0.8833 0.1107 0.33316 0.68662096 0.4484 1.3471 0.3067 1.6951 0.17 0.9824 0.8833 0.1107 0.8222 0.68662096 0.6136 109.4470 0.6436 104.4527

6 0.18 0.8333 0.8472 0.1508 0.1698 0.23843862 0.238118.1332 0.3407 1.15564 0.18 0.8333 0.8472 0.1508 0.1837 0.73843862 0.7679 100.5568 0.8741 98.1188

7 0.18 0.7984 0.8168 0.1888 0.3088 0.22753444 0.646272.4171 0.1725 0.81258 0.18 0.7984 0.8168 0.1888 0.2275 1.8448 0.3129 104.3176 0.8479

8 0.21 0.7500 0.7518 0.2188 0.4279 0.91645034 0.356833.56534 0.0368 0.59819 0.21 0.7500 0.7518 0.2188 0.8054 0.91645034 0.1938 99.2266 1.6541 99.9807

9 0.21 0.7423 0.7518 0.2448 0.4000 1.03008642 0.17925 29.8660 0.4300 29.3884 0.21 0.7423 0.7518 0.2448 0.2768 1.03008642 0.1244 89.6231 0.2811 88.3735

10 0.24 0.6818 0.7054 0.2879 0.3337 1.13088769 0.34622 17.9465 0.8631 22.9316 0.24 0.6818 0.7054 0.2879 0.2678 1.13088769 0.1378 86.9333 0.2467 83.6665

11 0.24 0.6622 0.7127 0.2873 0.6620 1.29646792 0.34633 14.7637 0.8500 23.7100 0.24 0.6622 0.7127 0.2873 0.2529 1.29646792 0.1436 84.8463 0.0418 80.1978

12 0.31 0.6250 0.6818 0.3687 0.3665 1.37938738 0.3784 18.1344 1.4300 24.8643 0.31 0.6250 0.6818 0.3687 0.3047 1.37938738 0.1574 82.5266 0.3463 77.3793

13 0.31 0.6000 0.6800 0.3500 0.2588 1.42444225 0.4000 17.8688 0.8725 25.1083 0.31 0.6000 0.6800 0.3500 0.2889 1.42444225 0.1600 80.7999 0.4166 74.9507

14 0.36 0.5769 0.6664 0.3848 0.4844 1.66148884 0.3321 15.0685 0.9650 26.1025 0.36 0.5769 0.6664 0.3848 0.3364 1.66148884 0.1679 79.8749 0.6949 72.2465

15 0.37 0.5554 0.6543 0.3417 0.6655 1.86148884 0.3278 16.1186 1.0260 25.6905 0.37 0.5554 0.6543 0.3417 0.3199 1.86148884 0.1784 77.9142 0.5009 70.1330

16 0.36 0.5374 0.6431 0.3568 0.6789 1.78620368 0.3275 12.1752 0.2220 26.8751 0.36 0.5374 0.6431 0.3568 0.3190 1.78620368 0.1785 76.3764 0.5313 68.6826

17 0.24 0.5172 0.6338 0.3662 0.9986 1.87928492 0.3188 11.4843 0.2863 0.26 0.5172 0.6338 0.3662 0.3172 1.87928492 0.1874 75.2221 0.5684 66.8025

18 0.3 0.5000 0.6250 0.3760 1.4111 2.01198884 0.3150 10.4488 0.4448 26.7350 0.3 0.5000 0.6250 0.3760 0.3449 2.01198884 0.1870 74.1813 0.2712 66.8790

19 0.31 0.4839 0.6177 0.3908 2.0088 2.19022044 0.3081 10.4500 0.4448 0.31 0.4839 0.6177 0.3908 0.3430 2.19022044 0.1847 73.7936 0.2934 65.3544

20 0.34 0.4689 0.6099 0.3901 1.7841 2.23380162 0.3043 10.3951 0.2330 26.0230 0.34 0.4689 0.6099 0.3901 0.3323 2.23380162 0.1867 73.3847 0.1723 61.2713

21 0.34 0.4545 0.6019 0.3888 1.6888 2.28888888 0.3000 10.3400 0.2330 0.34 0.4545 0.6019 0.3888 0.3300 2.28888888 0.1845 72.9544 0.1944 60.0000

22 0.34 0.4412 0.5957 0.4027 1.5827 2.34643636 0.2966 10.2844 0.2330 0.34 0.4412 0.5957 0.4027 0.3281 2.34643636 0.1824 72.5049 0.2042 58.8811

23 0.34 0.4286 0.5910 0.4092 1.6789 2.41091888 0.2932 10.2100 0.2471 0.34 0.4286 0.5910 0.4092 0.3262 2.41091888 0.1809 72.0400 0.2140 57.8241

24 0.36 0.4169 0.5868 0.4169 1.7744 2.48127040 0.2900 10.1244 0.2544 0.36 0.4169 0.5868 0.4169 0.3244 2.48127040 0.1794 71.5611 0.2237 56.8191

25 0.37 0.4054 0.5822 0.4178 0.8783 2.55802904 0.2869 10.0288 0.2639 24.3971 0.37 0.4054 0.5822 0.4178 0.3228 2.55802904 0.1781 71.0688 0.2332 55.8737

26 0.38 0.3943 0.5778 0.4251 0.9844 2.64243104 0.2840 9.9232 0.2744 0.38 0.3943 0.5778 0.4251 0.3213 2.64243104 0.1768 70.5622 0.2427 54.9883

27 0.37 0.3848 0.5740 0.4260 1.0482 2.73286296 0.2810 9.8060 0.2840 0.37 0.3848 0.5740 0.4260 0.3194 2.73286296 0.1754 70.0418 0.2518 54.1646

28 0.41 0.3659 0.5689 0.4331 0.8451 2.82943104 0.2780 9.6796 0.2944 0.41 0.3659 0.5689 0.4331 0.3178 2.82943104 0.1741 69.5073 0.2603 53.4000

29 0.41 0.3609 0.5649 0.4331 0.8451 2.82943104 0.2780 9.6796 0.2944 0.41 0.3609 0.5649 0.4331 0.3178 2.82943104 0.1741 69.5073 0.2603 53.4000

30 0.42 0.3571 0.5638 0.4362 0.1021 2.93343000 0.2760 9.5436 0.3071 0.42 0.3571 0.5638 0.4362 0.3160 2.93343000 0.1728 68.9544 0.2692 52.7132

31 0.43 0.3498 0.5608 0.4367 0.1487 3.04489900 0.2740 9.3984 0.3160 0.43 0.3498 0.5608 0.4367 0.3140 3.04489900 0.1715 68.3866 0.2783 52.0190

32 0.44 0.3409 0.5581 0.4383 0.1881 3.16429314 0.2720 9.2448 0.3240 0.44 0.3409 0.5581 0.4383 0.3120 3.16429314 0.1702 67.8044 0.2874 51.3152

33 0.45 0.3333 0.5544 0.4400 0.2288 3.29182600 0.2700 9.0816 0.3320 0.45 0.3333 0.5544 0.4400 0.3100 3.29182600 0.1689 67.2088 0.2965 50.6114

34

Рис. 8.4. Работ №8. Скриншот листа «сводный» расчётной таблицы

Microsoft Excel - книга-р-4-проект-расчет(2)

Вкладка: сводный(2)

Кол1222

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22

1 Расчет диска Сводный Рядовые Лист

2 r, m r, inch t, mm t, inch

3 0.15 0.0000 0.0000 0.0000 0.151119.9525

4 0.16 1.1111 119.9525

5 0.17 7.9391 104.4527

6 0.18 11.5564 98.1188

7 0.19 15.1268 94.1479

8 0.20 18.6539 90.9867

9 0.21 20.3684 86.3175

10 0.22 22.2101 83.8480

11 0.24 24.7160 80.1978

12 0.24 24.8641 77.4379

13 0.25 25.0033 74.9790

14 0.26 25.1027 72.7346

15 0.27 25.1698 70.7935

16 0.28 25.2031 68.6626

17 0.29 25.2080 66.5360

18 0.3 25.1959 64.4145

19 0.31 25.1688 63.3455

20 0.32 25.1260 61.3159

21 0.33 25.0817 60.1510

22 0.34 24.9938 58.9893

23 0.35 24.8751 57.1421

24 0.36 24.7244 55.6879

25 0.37 24.5835 54.2979

26 0.38 24.4244 52.9595

27 0.39 24.3007 51.6458

28 0.4 18.8672 50.3720

29 0.41 17.1704 48.9993

30 0.42 16.3833 47.3312

31 0.43 14.8865 45.3668

32 0.44 13.3284 44.6007

33 0.45 12.0952 43.9339

34

Рис. 8.5. Работ №8. Скриншот листа «сводный(2)» расчётной таблицы

8.3. Построение иллюстрационной диаграммы

Построение выполняется с помощью программы Мастер диаграмм. Используется точечная диаграмма со значениями, соединенными отрезками баз маркеров. При построении используются данные столбцов C1, C2, C3 (рис. 8.6).

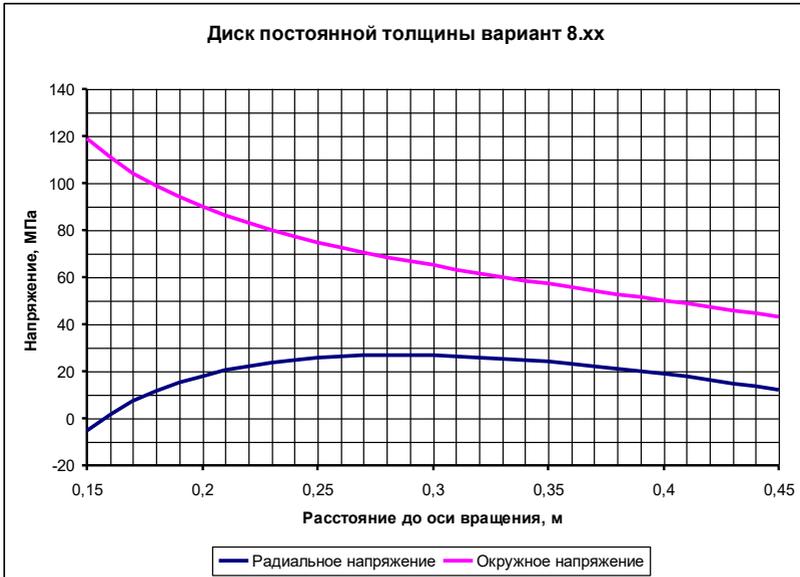


Рис. 8.6. Эпюра напряжений вращающегося диска

8.4. Анализ результатов исследования

На основании анализа эпюр сделать выводы

- какие напряжения (радиальные или окружные) являются опасными для диска с точки зрения выполнения условия прочности;
- указать координату опасной точки, в которой возможно возникновение пластической деформации и разрушения материала диска.

8.5. Определение предельной частоты вращения диска (см. формулу 8.10)

2. Варианты исходных данных для выполнения работ
Работа №1 Исследование несущей способности балок при изгибе.
Анализ экономичности балок

Задание. Выполнить исследование несущей способности балок, работающих при изгибе. Одна балка изготовлена из фасонного проката (двутавр ГОСТ 8239–89, швеллер ГОСТ 8240–72), вторая балка имеет кольцевое сечение. Балки рассматриваются равновеликие (имеют одинаковую площадь поперечного сечения). Проанализировать экономичность балок при изгибе. Исследование и анализ выполнить для расположения изгибающей нагрузки в заданной плоскости.

Таблица В 1 - Исходные данные для выполнения работы №1

№ вар.	1	2	№ вар.	1	2
1.01.	Двутавр, № 10	YOZ	1.11.	Двутавр, № 14	XOZ
1.02.	Швеллер, № 10у	YOZ	1.12.	Швеллер, № 14у	XOZ
1.03.	Двутавр, № 10	XOZ	1.13.	Двутавр, № 16	YOZ
1.04.	Швеллер, № 10у	XOZ	1.14.	Швеллер, № 16у	YOZ
1.05.	Двутавр, № 12	YOZ	1.15.	Двутавр, № 16	XOZ
1.06.	Швеллер, № 12у	YOZ	1.16.	Швеллер, № 16у	XOZ
1.07.	Двутавр, № 12	XOZ	1.17.	Двутавр, № 18	YOZ
1.08.	Швеллер, № 12у	XOZ	1.18.	Швеллер, № 16ау	YOZ
1.09.	Двутавр, № 14	YOZ	1.19.	Двутавр, № 18	XOZ
1.10.	Швеллер, № 14у	YOZ	1.20.	Швеллер, № 16ау	XOZ

1. Вид проката: двутавр или швеллер.
2. Плоскость приложения изгибающей нагрузки (OY_Z – вертикальная, OX_Z – горизонтальная).
3. Дополнительные данные выбираются из таблицы ГОСТ на сортамент прокатных профилей см. Таблицы В 2, В 3.
4. Для вертикальной плоскости ZOY – W_x; для горизонтальной плоскости ZOY – W_y.
5. Для вертикальной плоскости ZOY – h; для горизонтальной ZOY – b.

Таблица В 2 - Двутавры. Сортамент ГОСТ 8239-89

№	h	b	F	m	W _x	W _y
	см	см	см ²	кг/м	см ³	см ³
10	10	5,5	12,0	9,46	39,7	6,49
12	12	6,4	14,7	11,50	58,4	8,72
14	14	7,3	17,4	13,7	81,7	11,50
16	16	8,1	20,2	15,9	109,0	14,50
18	18	9,0	23,4	18,4	143,0	18,40
20	20	10,0	26,8	21,0	184,0	23,10
22	22	11,0	30,6	24,0	232,0	28,6
24	24	11,5	34,8	27,3	289,0	34,50

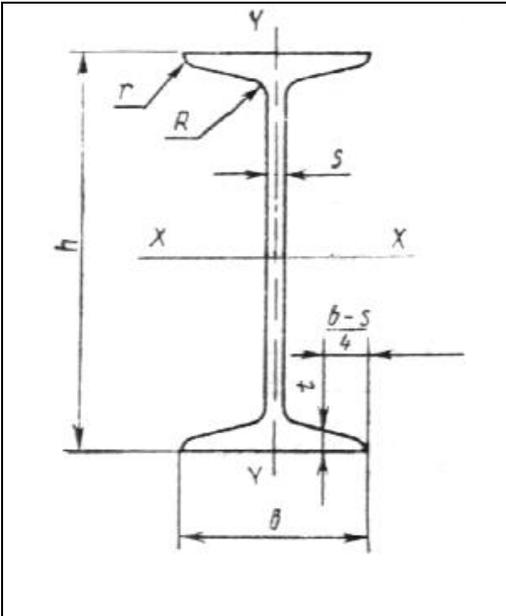


Рис. В1. Двутавр стальной горячекатаный по ГОСТ 8239–89 (h — высота двутавра; b — ширина полки; s — толщина стенки; t — средняя толщина полки; R — радиус внутреннего закругления; r — радиус закругления полки)

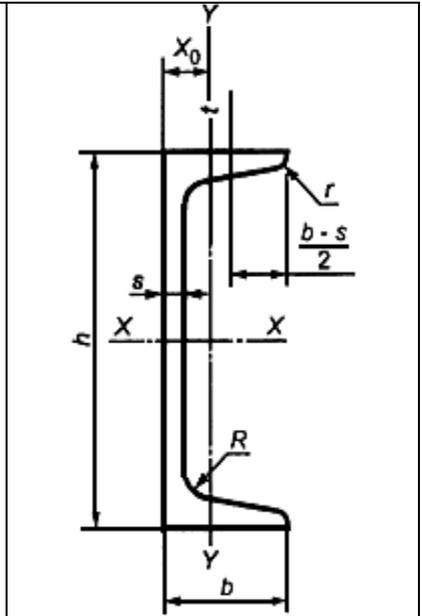


Рис. В2. Швеллер стальной горячекатаный с уклоном внутренних граней полок по ГОСТ 8240–97 (h — высота швеллера; b — ширина полки; s — толщина стенки; t — толщина полки; R — радиус внутреннего закругления; r — радиус закругления полки)

Таблица В 3 - Швеллеры. Сортомента ГОСТ 8240-97

№	h	b	F	m	W _x	W _y
	см	см	см ²	кг/м	см ³	см ³
10у	10	4,6	10,90	8,59	34,8	6,46
12у	12	5,2	13,30	10,40	50,6	8,52
14у	14	5,8	15,60	12,30	70,2	11,00
16у	16	6,4	18,10	14,20	93,4	13,80
16ау	16	6,8	19,50	15,40	103,0	16,40
18у	18	7,0	20,70	16,30	121,0	17,00
18ау	18	7,4	22,20	17,40	132,0	20,00
20у	20	7,6	23,40	18,40	152,0	20,50

**Работа №2. Исследование напряжённого состояния в стенке
цилиндрической тонкостенной обечайки**

Задание. Проводилось измерение напряжений в стенке тонкостенной цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением. Тензодатчики были размещены по двум перпендикулярным направлениям. Зная величину напряжений в точке измерения σ_α , σ_β и ориентацию тензодатчиков относительно осей обечайки углы α , β , определить: 1) величину главных напряжений в точке измерения; 2) значения нормальных и касательных напряжений в зависимости от угла расположения площадки; 3) расчётные напряжения в точке измерения по II, III и IV теории прочности.

Таблица В 4 - Исходные данные для выполнения работы №2

Вариант	α	β	σ_α	σ_β	Вариант	α	β	σ_α	σ_β
	град		МПа			град		МПа	
2.01	20	110	37,66	22,34	2.11	60	150	28,13	39,37
2.02	30	120	35,00	25,00	2.12	70	160	25,13	42,37
2.03	40	130	31,74	28,26	2.13	20	110	44,72	26,53
2.04	50	140	24,73	27,77	2.14	30	120	41,56	29,69
2.05	60	150	21,88	30,62	2.15	40	130	37,69	33,56
2.06	70	160	19,55	32,95	2.16	50	140	35,33	39,67
2.07	20	110	35,31	20,94	2.17	60	150	31,25	43,75
2.08	30	120	32,81	23,44	2.18	70	160	27,93	47,07
2.09	40	130	29,75	26,50	2.19	20	110	49,43	29,32
2.10	50	140	31,80	35,70	2.20	30	120	45,94	32,81

**Работа № 3. Оптимизация размеров корпуса цельносварного стального
аппарата, работающего под внутренним давлением**

Задание. Определить оптимальные размеры (диаметр, высота) корпуса стального цельносварного аппарата заданного объёма с эллиптическими неотбортованными днищами. Оптимизацию выполнить из условий: а) минимума массы аппарата; б) минимума боковой поверхности аппарата. Выполнить эскизы аппаратов оптимальных размеров. Проанализируйте полученный результат.

Таблица В5 - Исходные данные для выполнения работы №3

Вар-т	V, м ³	Сталь	p, МПа	t, °C	Вар-т	V, м ³	Сталь	p, МПа	t, °C
3.01.	25	20	0,5	210	3.11.	55	09Г2С	0,5	320
3.02.	30	09Г2С	0,6	220	3.12.	60	20	0,6	310
3.03.	35	20	0,7	230	3.13.	65	09Г2С	0,7	290
3.04.	40	09Г2С	0,8	240	3.14.	70	20	0,8	290
3.05.	45	20	0,9	260	3.15.	75	09Г2С	0,9	270
3.06.	50	09Г2С	0,7	270	3.16.	80	20	0,7	260

Вар-т	V, м ³	Сталь	p, МПа	t, °С	Вар-т	V, м ³	Сталь	p, МПа	t, °С
3.07.	25	20	0,5	280	3.17.	85	09Г2С	0,5	240
3.08.	30	09Г2С	0,6	290	3.18.	90	20	0,6	230
3.09.	35	20	0,7	310	3.19.	95	09Г2С	0,7	220
3.10.	40	09Г2С	0,8	320	3.20.	100	20	0,8	210

Пояснения: V – объём аппарата; p – давление в аппарате; t – температура в аппарате.

Дополнительные данные

$s = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$ конструктивная прибавка к толщине стенки; $\varphi = 1$ коэффициент прочности сварного шва (сварка автоматическая дуговая (АДС); допустимое напряжение стали при рабочей температуре в аппарате определяется интерполяцией (см. Сафонов Б.П. Расчёт элементов химического оборудования. Часть 1. Учебное пособие по КРЭО, Новомосковск 2018, 123 с., таблица П7).

Работа № 4. Исследование напряжённого состояния в стенке толстостенного сосуда

Задание. Полый стальной цилиндр с днищами, имеющий внутренний диаметр D_2 и толщину стенки s , нагружен внутренним давлением p , равномерно распределённым по объёму сосуда.

Для толстостенного сосуда:

1. Построить распределение радиальных σ_r и окружных σ_t напряжений по толщине стенки цилиндра.
2. Определить величину наибольшего расчётного напряжения в стенке цилиндра по теории наибольших касательных напряжений σ_{III} и по энергетической теории прочности σ_{IV} . Проанализировать полученный результат.

Таблица В6 - Исходные данные для выполнения работы №4

Вар.	D_2 , мм	s , мм	p, МПа	Вар.	D_2 , мм	s , мм	p, МПа
4.01.	150	25	40	4.11.	170	30	45
4.02.	160	25	40	4.12.	180	30	45
4.03.	170	30	40	4.13.	150	25	45
4.04.	180	30	40	4.14.	160	25	45
4.05.	150	25	50	4.15.	170	30	45
4.06.	160	25	50	4.16.	180	30	45
4.07.	170	30	50	4.17.	150	25	35
4.08.	180	30	50	4.18.	160	25	35
4.09.	150	25	45	4.19.	170	30	35
4.10.	160	25	45	4.20.	180	30	35

Работа № 5. Исследование размещения отверстий под трубы в трубной решётке кожухотрубчатого теплообменника

Задание. Изучить схемы размещения отверстий под трубы в трубной решётке по треугольнику и квадрату; освоить камеральную разметку трубной решётки при размещении отверстий под трубы; составить таблицы индексов отверстий; выполнить схемы размещения отверстий на трубной решётке; сравнить компактность размещение отверстий по треугольнику и квадрату

Таблица В7 - Исходные данные для выполнения работы №5

Вариант	$D_n \times s_k$, мм	d_n , мм	Вариант	$D_n \times s_k$, мм	d_n , мм
5.01.	159×10	16	5.11.	245×10.	16
5.02.	159×10	20	5.12.	245×10.	20
5.03.	180×10	16	5.13.	245×10.	25
5.04.	180×10	20	5.14.	273×10.	16
5.05.	194×10.	16	5.15.	273×10.	20
5.06.	194×10.	20	5.16.	273×10.	25
5.07.	194×10.	25	5.17.	299×10.	16
5.08.	219×10.	16	5.18.	299×10.	20
5.09.	219×10.	20	5.19.	299×10.	25
5.10.	219×10.	25	5.20.	325×10.	16

Пояснения: D_n – наружный диаметр кожуха теплообменника, выполненного из трубы; s_k – толщина стенки кожуха; d_n – наружный диаметр теплообменных труб

Работа № 6. Компоновка теплообменного аппарата

Задание. Изучить конструкцию кожухотрубчатого теплообменника; выбрать полуфабрикатов для изготовления элементов аппарата; выполнить расчёт массы аппарата при монтаже и гидравлическом испытании; определить габаритные размеры теплообменника.

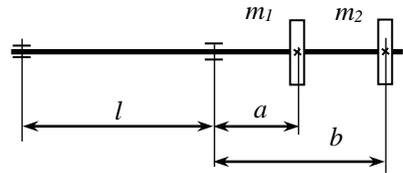
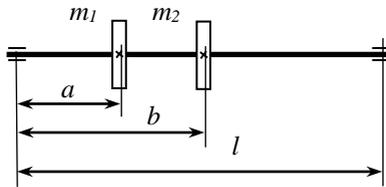
Таблица В 8 - Исходные данные для выполнения работы №6*

№ п/п	Наименование параметра, обозначение	Значение	Размерность
1.	Диаметр аппарата, D_B	?	м
2.	Толщина стенки кожуха, s_1	?	мм
3.	Теплообменные тубы, $d_n \times s_T$?	мм
4.	Число теплообменных труб, $n_{зтр.}$?	—
5.	Длина теплообменных труб, $l_{тр}$?	м
6.	Толщина стенки распределительной камеры, s_2	?	мм
7.	Патрубок штуцера, $d_n \times s_n$?	мм
8.	Ширина укрепляющего накладного	?	мм

№ п/п	Наименование параметра, обозначение	Значение	Размерность
	кольца, $b_{н.к.}$		
9.	Толщина эллиптического днища, s_3	?	мм
10.	Толщина трубной решётки, s_5	?	мм
11.	Общая высота фланцев, H_f	?	м
* исходные данные выбираются в соответствии параметрами теплообменника курсовой работы по КРЭО			

Работа №7. Исследование критической скорости вала мешалки при разной компоновке

Задание. Исследовать критическую скорость вала мешалки разной компоновки. Проанализировать полученный результат.



Расчётная схема вала мешалки однопролётного исполнения

Расчётная схема вала мешалки консольного исполнения

Таблица В 9 - Исходные данные для выполнения работы №7

Вар.	d, мм	m_1 , кг	m_2 , кг	Однопролётный			Консольный		
				l, м	a, м	b, м	l, м	a, м	b, м
7.01	30	1,06	2,9	1,5	0,975	1,3	0,62	0,660	0,88
7.02	31	1,07	3,05	1,5	1,013	1,35	0,64	0,645	0,86
7.03	32	1,08	3,2	1,5	1,050	1,4	0,66	0,630	0,84
7.04	33	1,09	3,35	1,5	0,780	1,04	0,68	0,615	0,82
7.05	34	1,1	3,5	1,5	0,818	1,09	0,7	0,600	0,8
7.06	35	1,2	3,45	1,5	0,855	1,14	0,515	0,739	0,985
7.07	30	1,3	3,44	1,5	0,893	1,19	0,535	0,724	0,965
7.08	31	1,4	3,43	1,5	0,930	1,24	0,555	0,709	0,945
7.09	32	1,5	3,42	1,5	0,968	1,29	0,575	0,694	0,925
7.10	33	1,00	2,00	1,5	1,005	1,34	0,595	0,679	0,905
7.11	34	1,01	2,15	1,5	1,043	1,39	0,615	0,664	0,885
7.12	35	1,02	2,3	1,5	1,080	1,44	0,635	0,649	0,865
7.13	30	1,03	2,45	1,5	0,776	1,035	0,655	0,634	0,845
7.14	31	1,04	2,6	1,5	0,814	1,085	0,675	0,619	0,825

Вар.	d, мм	m ₁ , кг	m ₂ , кг	Однопролётный			Консольный		
				l, м	a, м	b, м	l, м	a, м	b, м
7.15	32	1,05	2,75	1,5	0,851	1,135	0,695	0,604	0,805
7.16	33	1,06	2,9	1,5	0,889	1,185	0,715	0,589	0,785
7.17	34	1,07	3,05	1,5	0,926	1,235	0,51	0,743	0,99
7.18	35	1,08	3,2	1,5	0,964	1,285	0,53	0,728	0,97
7.19	30	1,09	3,35	1,5	1,001	1,335	0,55	0,713	0,95
7.20	31	1,1	3,5	1,5	1,039	1,385	0,57	0,698	0,93

Пояснения: d – диаметр вала; l – расстояние между опорами; m₁, m₂ – масса мешалок; рис. 7.1: a – расстояние от левой опоры до мешалки №1; b – расстояние от левой опоры до мешалки №2; рис. 7.2: a – расстояние от опоры до мешалки №1; b – от левой опоры до мешалки №2.

Работа №8. Исследование напряжённого состояния быстровращающегося диска

Задание. Исследовать распределение радиальных и окружных напряжений быстровращающегося диска; построить эпюры радиальных σ_r и окружных σ_t напряжений в направлении, перпендикулярном оси вращения диска; определить предельную частоту вращения диска из заданного материала.

Таблица В 10 - Исходные данные для выполнения работы №8

Вар.	D ₁	D ₂	ω рад/с	σ_{r1}	σ_{r2}	Вар.	D ₁	D ₂	ω рад/с	σ_{r1}	σ_{r2}
	мм						МПа				
8.01	120	1000	200	-4	10	8.16	190	1600	150	-6	14
8.02	130	1100	210	-5	11	8.17	200	1800	130	-7	15
8.03	140	1200	190	-6	12	8.18	210	2000	120	-8	5
8.04	150	1300	170	-7	13	8.19	140	1000	240	-9	6
8.05	160	1400	160	-8	14	8.20	150	1100	210	-10	7
8.06	170	1500	150	-9	15	8.21	160	1200	200	-4	8
8.07	180	1600	150	-10	5	8.22	170	1300	180	-4	9
8.08	190	1800	130	-4	6	8.23	180	1400	170	-5	10
8.09	200	2000	120	-5	7	8.24	190	1500	160	-6	11
8.10	130	1000	220	-6	8	8.25	200	1600	150	-7	12
8.11	140	1100	210	-7	9	8.26	210	1800	130	-8	13
8.12	150	1200	200	-8	10	8.27	220	2000	120	-9	14
8.13	160	1300	180	-9	11	8.28	150	1000	240	-10	15
8.14	170	1400	170	-10	12	8.29	160	1100	220	-8	5
8.15	180	1500	160	-5	13	8.30	170	1200	180	-9	6

Пояснения: D₁ – диаметр посадочного отверстия диска; D₂ – наружный диаметр диска; ω – частота вращения диска; σ_{r1} , σ_{r2} – радиальное напряжение в точке диска, имеющей радиальную координату r₁ и r₂, соответственно.

Вар.	D ₁	D ₂	ω рад/с	σ_{r1}	σ_{r2}	Вар.	D ₁	D ₂	ω рад/с	σ_{r1}	σ_{r2}
	мм						мм				

Дополнительные данные:

1. Материал диска: нечётные варианты – сталь 20; чётные варианты – сталь 09Г2С
2. Свойства (σ_T , ρ) при комнатной температуре сталей для изготовления диска см. с таблице П 13 учебного пособия Сафонов Б.П. Расчёт элементов химического оборудования ч. 3, Новомосковск, НИ РХТУ, 2020, с. 89.

Приложения

Таблица П 1 - ГОСТ 34233.1–2017. Допускаемые напряжения сталей

Марка	Значение $[\sigma]$ в МПа при t (°C)											
	20	200	250	300	350	400	450	470	500	540	600	700
Ст3сп ⁽¹⁾	140	126	120	108	98	85	—	—	—	—	—	—
10	130	118	112	100	88	74	51	42	—	—	—	—
20, 20К ⁽²⁾	147	136	132	119	106	92	61	49	—	—	—	—
16ГС, 09Г2С ⁽³⁾	183	148	145	134	123	105	71	56	—	—	—	—
12ХМ, 12МХ	147	145	145	141	137	132	124	117	96	47	—	—
15Х5М	146	134	127	120	114	105	94	89	79	54	25	—
12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т	184	160	154	148	144	137	132	130	127	111	74	30
03Х21Н21М4ГБ	180	171	167	149	143	140	—	—	—	—	—	—
06ХН28МДТ	147	124	117	110	107	103	—	—	—	—	—	—

Пояснения: Ст3сп, 10, 20, 20К – стали низкоуглеродистые; 16ГС, 09Г2С – стали низколегированные; 12ХМ, 12МХ, 15Х5М – стали теплоустойчивые; 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т – стали жаростойкие, жаропрочные и коррозионностойкие; 03Х21Н21М4ГБ – сталь, стойкая против межкристаллитной коррозии; 06ХН28МДТ – железоникелевый сплав, стойкий против межкристаллитной коррозии
Значение $[\sigma]$ указаны для толщин стенки: 1 – свыше 20 мм; 2 – до 180 мм; 3 – свыше 32 мм

Таблица П 2 - Параметры сетки размещения центров отверстий под трубы

Наружный диаметр труб d_H , мм	16	20	25	38	57
Шаг размещения трубных отверстий $t_{отв}^*$	21	26	32	48	70
Треугольное размещение t_x , мм	10,5	13	16	24	35
Треугольное размещение t_y , мм	18,2	22,5	27,7	41,6	60,6
Квадратное размещение t_x , t_y , мм	14,85	18,38	22,63	33,94	49,5
* в соответствии с ГОСТ 31842-2019					

Таблица П 3 -Координаты рядов сетки на трубной решётке при треугольном размещении отверстий

Трубы, мм	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$
Шаг отв., мм	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$
Шаг сетки, мм	$t_x=10,5$	$t_x=13$	$t_x=16$	$t_y=18,2$	$t_y=22,5$	$t_y=27,7$
Коорд. ряда	x_i , мм	x_i , мм	x_i , мм	y_j , мм	y_j , мм	y_j , мм
№ ряда	Поперечные ряды (i)			Продольные ряды (j)		
	0	0	0	0	0	0
1	10,5	13	16	18,2	22,5	27,7
2	21	26	32	36,4	45	55,4
3	31,5	39	48	54,6	67,5	83,1
4	42	52	64	72,8	90	110,8
5	52,5	65	80	91	112,5	138,5
6	63	78	96	109,2	135	166,2
7	73,5	91	112	127,4	157,5	193,9
8	84	104	128	145,6	180	221,6
9	94,5	117	144	163,8	202,5	—
10	105	130	160	182	225	—
11	115,5	143	176	200,2	—	—
12	126	156	192	218,4	—	—
13	136,5	169	208	—	—	—
14	147	182	224	—	—	—
15	157,5	195	240	—	—	—
16	168	208	256	—	—	—
17	178,5	221	272	—	—	—
18	189	234	288	—	—	—
19	199,5	247	304	—	—	—
20	210	260	320	—	—	—
21	220,5	273	336	—	—	—
22	231	286	352	—	—	—
23	241,5	299	368	—	—	—
24	252	312	384	—	—	—
25	262,5	325	400	—	—	—
26	273	338	416	—	—	—

Трубы, мм	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$
Шаг отв., мм	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$
Шаг сетки, мм	$t_x=10,5$	$t_x=13$	$t_x=16$	$t_y=18,2$	$t_y=22,5$	$t_y=27,7$
Коорд. ряда	x_i , мм	x_i , мм	x_i , мм	y_j , мм	y_j , мм	y_j , мм
№ ряда	Поперечные ряды (i)			Продольные ряды (j)		
27	283,5	351	432	—	—	—
28	294	364	—	—	—	—
29	304,5	377	—	—	—	—
30	315	390	—	—	—	—
31	325,5	403	—	—	—	—
32	336	416	—	—	—	—
33	346,5	429	—	—	—	—
34	357	—	—	—	—	—
35	367,5	—	—	—	—	—
36	378	—	—	—	—	—
37	388,5	—	—	—	—	—
38	399	—	—	—	—	—
39	409,5	—	—	—	—	—
40	420	—	—	—	—	—

Таблица П 4 -Координаты рядов сетки на трубной решётке при квадратном размещении отверстий

Трубы, мм	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$
Шаг отв., мм	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$
Шаг сетки, мм	$t_x = t_y = 14,18$	$t_x = t_y = 18,38$	$t_x = t_y = 22,63$
№ ряда	Координата ряда		
	$x_i = y_j$, мм	$x_i = y_j$, мм	$x_i = y_j$, мм
0	0	0	0
1	14,85	18,38	22,63
2	29,7	36,76	45,26
3	44,55	55,14	67,89

Трубы, мм	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$
Шаг отв., мм	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$
Шаг сетки, мм	$t_x = t_y = 14,18$	$t_x = t_y = 18,38$	$t_x = t_y = 22,63$
№ ряда	Координата ряда		
	$x_i = y_j$, мм	$x_i = y_j$, мм	$x_i = y_j$, мм
4	59,4	73,52	90,52
5	74,25	91,9	113,15
6	89,1	110,28	135,78
7	103,95	128,66	158,41
8	118,8	147,04	181,04
9	133,65	165,42	203,67
10	148,5	183,8	226,3
11	163,35	202,18	248,93
12	178,2	220,56	271,56
13	193,05	238,94	294,19
14	207,9	257,32	316,82
15	222,75	275,7	339,45
16	237,6	294,08	362,08
17	252,45	312,46	384,71
18	267,3	330,84	407,34
19	282,15	349,22	429,97
20	297	367,6	452,6
21	311,85	385,98	—
22	326,7	404,36	—
23	341,55	422,74	—
24	356,4	441,12	—
25	371,25	—	—
26	386,1	—	—
27	400,95	—	—
28	415,8	—	—
29	430,65	—	—

Трубы, мм	$d_H=16$	$d_H=20$	$d_H=25$
Шаг отв., мм	$t_{отв}=21$	$t_{отв}=26$	$t_{отв}=32$
Шаг сетки, мм	$t_x = t_y = 14,18$	$t_x = t_y = 18,38$	$t_x = t_y = 22,63$
№ ряда	Координата ряда		
	$x_i = y_j$, мм	$x_i = y_j$, мм	$x_i = y_j$, мм
30	445,5	—	—

Таблица П 5 - Толщина листов и погонная масса листовой стали
Горячекатаная сталь ГОСТ 19903-2015

s	$m_{п.л}$	s	$m_{п.л}$	s	$m_{п.л}$	s	$m_{п.л}$
мм	кг/м ²	мм	кг/м ²	мм	кг/м ²	мм	кг/м ²
0,4	3,14	5	39,25	19	149,15	45	353,25
0,5	3,92	6	47,1	20	157	48	376,8
0,6	4,71	7	54,95	21	164,85	50	392,5
0,7	5,5	8	62,8	22	172,7	52	408,2
0,8	6,28	9	70,65	25	196,25	55	431,75
0,9	7,06	10	78,5	26	204,1	60	471
1,0	7,85	11	86,35	28	219,8	65	510,25
1,5	11,78	12	94,2	30	235,5	70	549,5
2,0	15,7	13	102,05	32	251,2	75	588,75
2,5	19,62	14	109,9	34	266,9	80	628
3,0	23,55	15	117,75	36	282,6	85	667,25
3,5	27,48	16	125,6	38	298,3	90	706,5
4	31,4	17	133,45	40	314	95	745,75
4,5	35,325	18	141,3	42	329,7	100	785

Холоднокатаная сталь ГОСТ 19904-74

s	$m_{п.л}$	s	$m_{п.л}$	s	$m_{п.л}$	s	$m_{п.л}$
мм	кг/м ²						
0,6	4,71	1,5	11,775	1,8	14,13	4,2	32,97
0,9	7,065	1,6	12,56	3	23,55	4,5	35,325
1,2	9,42	1,7	13,345	3,8	29,83	5	39,25

Упрощённое обозначение полуфабриката листового проката ГОСТ 5520–79
Листовой прокат нормальной точности прокатки (Б) размером 7×2000×6000
мм из стали 16ГС, без термической обработки

Лист $\frac{Б7 \times 2000 \times 6000 \text{ ГОСТ } 19903 - 2015}{16\text{ГС ГОСТ } 5520 - 2017}$

Таблица П 6 - ГОСТ 6533–78. Эллиптическое днище

Высота

D _в м	h _в мм	Высота борта (мм) при толщине стенки (мм)					
		6	8	10	12	14	16
0,6	150	25	25	25	25	25	25
0,7	175	25	25	25	25	25	40
0,8	200	25	25	25	25	40	40
0,9	225	25	25	25	40	40	40
1,0	250	25	25	25	40	40	40
1,1	275	25	25	40	40	40	40
1,2	300	25	25	40	40	40	40
1,4	350	25	40	40	40	40	40

Площадь внутренней поверхности и объём полости

D _в м	F _в (м ²) при высоте борта (мм)		V (м ³) при высоте борта (мм)	
	25	40	25	40
0,6	0,437	0,466	0,0353	—
0,7	0,586	0,619	0,0545	0,0603
0,8	0,756	0,794	0,0796	0,0871
0,9	0,949	0,991	0,111	0,121
1,0	1,16	1,21	0,151	0,162
1,1	1,40	1,45	0,198	0,212
1,2	1,66	1,71	0,255	0,271
1,4	2,23	2,30	0,398	0,421

Масса стального днища

D _в м	Масса днища (кг) при толщине стенки (мм)					
	6	8	10	12	14	16
0,6	21,0	28,2	35,5	43,2	50,7	58,3
0,7	28,1	37,7	47,4	57,1	67,5	81,8
0,8	36,2	48,5	60,9	73,5	90,3	105
0,9	45,3	60,7	76,2	95,9	112	129
1,0	55,5	74,3	93,2	117	137	157
1,1	66,7	89,2	116	140	164	188
1,2	78,9	105	137	165	193	221
1,4	106	146	183	221	258	296

Пояснения: D_в – внутренний диаметр аппарата; h_в – внутренняя высота выпуклой части; F_в – площадь внутренней поверхности; V – объём полости. Условное обозначение днища с D_в = 400 мм, s = 6 мм и h = 25 мм из стали 09Г2С

Днище 400×6–25–09Г2С ГОСТ 6533–78

Таблица П 7 - ГОСТ 28759.3-90. Размеры фланцев с втулкой приварных
ВСТЫК

D _B *	D _{1ф}	D _{2ф}	D _{3ф}	D _{6ф}	D _{7ф}	H _ф	b _ф	d _o	d _б	n _б	p _y
М								ММ			МПа
0,4	0,535	0,495	0,458	0,412	0,432	0,065	0,035	23	M20	20	1,0
	0,535	0,495	0,458	0,412	0,436	0,070	0,035	23	M20	20	1,6
	0,535	0,495	0,458	0,418	0,440	0,075	0,040	23	M20	24	2,5
	0,590	0,530	0,458	0,424	0,454	0,095	0,050	33	M30	20	4,0
0,45	0,590	0,550	0,514	0,464	0,482	0,065	0,035	23	M20	24	1,0
	0,590	0,550	0,514	0,464	0,486	0,070	0,035	23	M20	24	1,6
	0,590	0,550	0,514	0,472	0,490	0,075	0,045	23	M20	24	2,5
	0,640	0,580	0,508	0,474	0,510	0,105	0,050	33	M30	20	4,0
0,5	0,640	0,600	0,564	0,514	0,532	0,065	0,035	23	M20	24	1,0
	0,640	0,600	0,564	0,514	0,536	0,070	0,035	23	M20	24	1,6
	0,640	0,600	0,564	0,522	0,544	0,080	0,045	23	M20	28	2,5
	0,695	0,635	0,558	0,524	0,560	0,105	0,060	33	M30	20	4,0
0,6	0,740	0,700	0,664	0,614	0,634	0,065	0,035	23	M20	28	1,0
	0,740	0,700	0,664	0,616	0,640	0,070	0,035	23	M20	28	1,6
	0,740	0,700	0,664	0,624	0,648	0,085	0,050	23	M20	32	2,5
	0,795	0,735	0,658	0,630	0,664	0,115	0,065	23	M30	28	4,0
0,7	0,84	0,800	0,761	0,716	0,736	0,065	0,035	23	M20	32	1,0
	0,84	0,800	0,764	0,718	0,740	0,080	0,045	23	M20	32	1,6
	0,85	0,810	0,774	0,728	0,754	0,090	0,05	23	M20	40	2,5
	0,895	0,835	0,758	0,732	0,766	0,125	0,075	33	M30	32	4,0
0,8	0,945	0,905	0,866	0,818	0,838	0,070	0,04	23	M20	40	1,0
	0,945	0,905	0,866	0,818	0,846	0,085	0,045	23	M20	40	1,6
	0,955	0,915	0,876	0,830	0,860	0,100	0,055	23	M20	48	2,5
	1,005	0,945	0,87	0,838	0,876	0,130	0,075	33	M30	32	4,0
0,9	1,045	1,005	0,966	0,918	0,940	0,080	0,045	23	M20	40	1,0
	1,045	1,005	0,966	0,920	0,948	0,095	0,050	23	M20	40	1,6
	1,070	1,02	0,978	0,932	0,962	0,100	0,055	27	M24	48	2,5
	1,11	1,05	0,97	0,940	0,980	0,140	0,080	33	M30	40	4,0
1,0	1,145	1,105	1,066	1,020	1,044	0,085	0,05	23	M20	44	1,0
	1,145	1,105	1,066	1,024	1,050	0,095	0,055	23	M20	44	1,6
	1,175	1,125	1,080	1,036	1,066	0,105	0,060	27	M24	52	2,5
	1,24	1,170	1,075	1,042	1,088	0,160	0,090	40	M36	40	4,0
1,1	1,25	1,210	1,168	1,12	1,144	0,085	0,050	23	M20	52	1,0
	1,25	1,210	1,168	1,124	1,152	0,100	0,060	23	M20	52	1,6
	1,285	1,235	1,19	1,136	1,172	0,120	0,065	27	M24	56	2,5
	1,345	1,275	1,19	1,144	1,192	0,170	0,100	40	M36	44	4,0
1,2	1,350	1,310	1,268	1,220	1,248	0,095	0,05	23	M20	56	1,0

D_B^*	$D_{1ф}$	$D_{2ф}$	$D_{3ф}$	$D_{6ф}$	$D_{7ф}$	$H_ф$	$b_ф$	d_o	d_6	n_6	p_y
	1,350	1,310	1,268	1,224	1,256	0,11	0,060	23	M20	56	1,6
	1,400	1,345	1,296	1,238	1,276	0,13	0,070	30	M27	56	2,5
	1,455	1,385	1,290	1,248	1,302	0,185	0,105	40	M36	48	4,0
1,4	1,550	1,510	1,470	1,420	1,452	0,105	0,055	23	M20	68	1,0
	1,550	1,510	1,470	1,430	1,460	0,110	0,065	23	M20	68	1,6
	1,610	1,555	1,506	1,438	1,484	0,145	0,075	30	M27	64	2,5
	1,670	1,600	1,495	1,454	1,516	0,200	0,105	40	M36	56	4,0

Примечание: * – обязательный размер, остальные размеры рекомендуемые.
Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата (условный проход); $D_{1ф}$ – диаметральный габаритный размер; $D_{2ф} = D_{6ф}$ – диаметр установки болтов (шпилек); $D_{3ф}$ – внутренний диаметр впадины (для фланцев исполнения 1); $D_{6ф}$ – наружный диаметр втулки фланца в верхнем сечении; $D_{7ф}$ – наружный диаметр втулки фланца в основании (на уровне тарелки фланца); $H_ф$ – осевой габаритный размер; $b_ф$ – расстояния от основания втулки до привалочной поверхности; d_o – диаметр отверстий для болтов (шпилек); d_6 – обозначение резьбы болтов (шпилек); n_6 – количество болтов (шпилек); p_y – условное давление.

Пример условного обозначения фланцев

Описание: Фланец с втулкой приварной встык ГОСТ 28759.3–90: монометаллический, уплотнительная поверхность – впадина (исполнение 1); $D_B = 1000$ мм; $p_y = 1,0$ МПа; сталь 09Г2С
Обозначение: Фланец 1–1000–1,0–09Г2С ГОСТ 28759.3–90

Таблица П 8 - ГОСТ 28759.3–90. Масса фланцев

D_B , мм	Исполнение				p_y , МПа	D_B , мм	Исполнение				p_y , МПа
	1	2	3	4			1	2	3	4	
	Масса, кг, не более						Масса, кг, не более				
400	25,4	25,4	26,3	24,4	1,0	900	77,5	77,9	77,7	75,1	1,0
	26,4	26,3	27,2	25,3	1,6		91,4	91,8	93,8	89,0	1,6
	30,3	30,3	31,2	29,3	2,5		118,2	118,8	121,1	115,1	2,5
	56,4	55,2	57,1	54,3	4,0		219,3	217,1	221,0	215,0	4,0
450	29,3	29,5	30,4	28,1	1,0	1000	95,7	96,1	98,0	93,3	1,0
	30,3	30,5	31,4	29,1	1,6		109,2	109,6	111,4	106,7	1,6
	38,9	39,0	40,0	37,7	2,5		147,2	147,8	150,4	143,8	2,5
	66,3	64,9	67,1	63,9	4,0		309,7	306,6	311,9	303,8	4,0
500	32,4	32,6	33,6	31,1	1,0	1100	107,7	108,1	110,4	104,8	1,0
	33,6	33,8	34,8	32,3	1,6		133,4	133,7	136,0	130,4	1,6
	43,9	44,1	45,1	42,6	2,5		191,8	193,0	196,0	187,8	2,5
	86,6	85,0	87,5	83,9	4,0		379,7	377,6	382,0	374,8	4,0

D _в , мм	Исполнение				P _у , МПа	D _в , мм	Исполнение				P _у , МПа
	1	2	3	4			1	2	3	4	
	Масса, кг, не более						Масса, кг, не более				
600	38,4	38,7	39,9	36,9	1,0	1200	123,3	123,7	126,7	120,1	1,0
	40,4	40,7	41,9	38,9	1,6		152,2	152,6	155,0	149,0	1,6
	57,9	58,2	59,4	56,4	2,5		242,4	244,1	247,8	237,9	2,5
	109,3	107,4	110,3	106,1	4,0		466,0	463,3	468,6	460,0	4,0
700	44,8	45,1	46,5	43,1	1,0	1400	159,6	160,6	163,1	156,0	1,0
	59,1	59,5	60,8	57,4	1,6		188,7	189,1	192,2	185,0	1,6
	74,3	75,1	76,4	72,5	2,5		326,7	329,1	333,3	320,8	2,5
	143,2	141,2	144,4	139,6	4,0		605,4	601,9	608,8	597,5	4,0
800	59,9	60,2	61,9	57,8	1,0	1500	176,2	177,0	179,5	172,5	1,0
	71,5	71,9	73,6	69,4	1,6		242,1	242,8	246,6	236,9	1,6
	97,9	98,8	100,5	95,7	2,5		366,5	369,0	373,5	360,2	2,5
	177,3	175,5	178,8	173,6	4,0		817,9	813,2	822,4	807,4	4,0

Пояснения: D_в – внутренний диаметр аппарата; p_у – условное давление (см. таблицу П 8); исполнение фланцев: 1 – с впадиной; 2 – с выступом; 3 – с пазом; 4 – с шипом.

Таблица П 9 - ГОСТ 8734–78 Трубы стальные бесшовные
холоднодеформированные

d _н , мм	Масса 1 м трубы (кг), при толщине стенки, мм							
	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
16	0,536	0,691	0,832	0,962	1,079	1,184	1,270	1,356
20	0,684	0,888	1,079	1,258	1,424	1,578	1,720	1,850
25	0,869	1,134	1,387	1,628	1,856	2,072	2,275	2,466
38	1,350	1,776	2,189	2,589	2,978	3,354	3,718	4,069
57	2,053	2,713	3,360	3,995	4,618	5,228	5,826	6,412

Пояснение: d_н – наружный диаметр трубы

Условное обозначение трубы с наружным диаметром 20 мм, толщиной стенки 2 мм, длиной 6000 мм, из стали марки 20 с поставкой по механическим свойствам и химическому составу (по группе В)

Труба $20 \times 2 \times 6000$ ГОСТ 8734 – 75
В 20 ГОСТ 8733 – 74

Таблица П 10 - Модуль продольной упругости E сплавов

Материал	Значения E · 10 ⁻⁵ (МПа) при температуре (°С)							
	20	100	150	200	300	450	550	650
Углеродистые и низколегированные стали	1,99	1,91	1,86	1,81	1,71	1,4	—	—

Материал	Значения $E \cdot 10^{-5}$ (МПа) при температуре (°C)							
	20	100	150	200	300	450	550	650
Теплоустойчивые и коррозионно-стойкие хромистые стали	2,15	2,15	2,05	1,98	1,90	1,71	1,54	—
Жаропрочные и жаростойкие аустенитные стали	2,00	2,00	1,99	1,97	1,90	1,74	1,60	1,43
Алюминий и его сплавы	0,72	0,69	0,67	—	—	—	—	—
Сплавы на основе меди	1,05	1,02	1,00	0,98	—	—	—	—
Сплавы титана	1,1	1,06	1,02	0,96	0,83	—	—	—
Чугун	1,1	1,1						

Таблица П 11 – Коэффициенты влияние δ_{ij} для однопролётного вала

$\delta_{11} = \frac{1}{3EI_x} \cdot \frac{a^2(l-a)^2}{l}$	$\delta_{22} = \frac{1}{3EI_x} \cdot \frac{b^2(l-b)^2}{l}$	$\delta_{33} = \frac{1}{3EI_x} \cdot \frac{c^2(l-c)^2}{l}$
$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{6EI_x} \cdot \frac{a}{l} \cdot (l-b) \cdot (2bl - a^2 - b^2)$		
$\delta_{13} = \delta_{31} = \frac{1}{6EI_x} \cdot \frac{a}{l} \cdot (l-c) \cdot (2cl - a^2 - c^2)$		

Таблица П 12 – Коэффициенты влияние δ_{ij} для консольного вала

$\delta_{11} = \frac{1}{3EI_x} \cdot a^2 \cdot (a+l)$	$\delta_{22} = \frac{1}{3EI_x} \cdot b^2 \cdot (b+l)$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{6EI_x} \cdot a \cdot (2lb + 3ab - a^2)$$

Таблица П 13 – Свойства при комнатной температуре сталей для изготовления элементов химического оборудования

Марка сплава	σ_T	σ_B	ρ	Марка сплава	σ_T	σ_B	ρ
	МПа		кг/м ³		МПа		кг/м ³
Ст3сп	250	400	7850	12ХМ, 12МХ	220	410	7850
10	195	335	7850	15Х5М	220	390	7850
20, 20К	220	370	7850	40Х (улучшение)	780	980	7850
16ГС, 09Г2С	300	490	7850	40ХН (улучшение)	780	980	7850
12Х18Н10Т	270	510	7900				

Библиографический список

1. Поникаров И.И., Поникаров С.И. Конструирование и расчёт элементов оборудования: учебник. – М.: Альфа-М, 2010. – 382 с.
2. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник. 3-е изд., стереотипное. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 752 с.
3. Расчёт и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи /М.Ф. Михалёв, Н.П.Третьяков, А.И. Мильченко, В.В. Зобнин; Под общ. ред. М.Ф. Михалёва. – 2-е изд. М.: ООО «Торгово-Издательский Дом «Арис», 2010. – 312 с.
4. Поникаров И.И., Поникаров С.И., Рачковский С.В. Расчёты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки (примеры и задачи). М.: Альфа-М, 2008. – 720 с.
5. Сафонов Б.П. Расчёт элементов химического оборудования. Часть 1. ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал), Новомосковск, 2018. – 123 с.
6. Сафонов Б.П. Расчёт элементов химического оборудования. Часть 2. ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал), Новомосковск, 2017. – 118 с.
7. Сафонов Б.П. Расчёт элементов химического оборудования. Часть 3. ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал), Новомосковск, 2020. – 90 с.

Оглавление

1. Содержание работ и порядок выполнения.....	3
Работа №1. Исследование несущей способности балок при изгибе. Анализ экономичности балок.....	3
Работа №2. Исследование напряжённого состояния в стенке цилиндрической тонкостенной обечайки.....	7
Работа №3. Оптимизация размеров корпуса цельносварного стального аппарата, работающего под внутренним давлением.....	11
Работа №4. Исследование напряжённого состояния в стенке толстостенного сосуда.....	17
Работа № 5. Исследование размещения отверстий под трубы в трубной решётке кожухотрубчатого теплообменника.....	21
Работа № 6. Компоновка теплообменного аппарата.....	26
Работа № 7. Исследование критической скорости вала мешалки при разной компоновке.....	30
Работа № 8. Исследование напряжённого состояния быстровращающегося диска.....	34
2. Варианты исходных данных для выполнения работ.....	40
Работа № 1.....	40
Работа № 2.....	42
Работа № 3.....	42
Работа № 4.....	43
Работа № 5.....	44
Работа № 6.....	44
Работа № 7.....	45
Работа № 8.....	46
3. Приложения.....	47
Таблица П 1 - ГОСТ 34233.1–2017. Допускаемые напряжения сталей.....	47
Таблица П 2 - Параметры сетки размещения центров отверстий под трубы....	47
Таблица П 3 -Координаты рядов сетки на трубной решётке при треугольном размещении отверстий.....	48
Таблица П 4 - Координаты рядов сетки на трубной решётке при квадратном размещении отверстий.....	49
Таблица П 5 - Толщина листов и погонная масса листовой стали.....	51
Таблица П 6 - ГОСТ 6533–78. Эллиптическое днище.....	52
Таблица П 7 - ГОСТ 28759.3–90. Размеры фланцев с втулкой приварных встык.	53
Таблица П 8 - ГОСТ 28759.3–90. Масса фланцев.....	54
Таблица П 9 - ГОСТ 8734–78 Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные.....	55
.....	
Таблица П 10 - Модуль продольной упругости E сплавов.....	55
Таблица П 11 – Коэффициенты влияния δ_{ij} для однопролётного вала.....	56
Таблица П 12 – Коэффициенты влияния δ_{ij} для консольного вала.....	56
Таблица П 13 – Свойства при комнатной температуре сталей для изготовления элементов химического оборудования.....	57

Учебное издание

САФОНОВ Борис Петрович

Лабораторно-практические работы по КРЭО

Учебное пособие

Редактор Е.М. Туманова

Компьютерная верстка В.В.Гальченко

Лицензия ЛР №020714 от 02.02.98

Подписано в печать 06.04.2021г. Формат 60X84/16.

Бумага «SvetoСору». Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л.3,5. Уч.-изд. л. 2,1.

Тираж 70 экз. Заказ 1987/1602.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д.И.Менделеева»

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр.

Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9.

Адрес института: 301655 Тульская обл., Новомосковск, ул. Дружбы, 8