

В. П. Миронов, И. В. Постникова

Расчет сосудов и аппаратов

Часть II

Расчет аппаратов

Учебное пособие

Иваново - 2010

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Ивановский государственный химико-технологический
университет

В.П. Миронов, И.В. Постникова

РАСЧЕТ СОСУДОВ И АППАРАТОВ
Часть II
Расчет аппаратов

Учебное пособие

Иваново 2010

УДК 66.002.5.0012.(07)

Миронов В.П., Постникова И.В. Расчет сосудов и аппаратов. Часть II.
Расчет аппаратов: учебн. пособие / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново,
2010. 122 с. ISBN 978-5-9616-0335-4

В пособии изложены основные теоретические положения по курсу «Конструирование и расчет элементов оборудования». Даются основные сведения по теории и практике расчета и конструирования аппаратов из пластмасс, горизонтальных емкостных аппаратов, аппаратов высокого давления, колонного оборудования, расчета узлов аппаратов на малоцикловое нагружение. Приводятся методики инженерного расчета данных аппаратов, разработанные на основе нормативной документации с учетом иерархической структуры рассматриваемых конструкций. Приведены алгоритмы расчета аппаратов. Сформулированы контрольные вопросы по каждому рассматриваемому разделу, а также общий тестовый контроль знаний студента по данному курсу. Приводятся варианты заданий для выполнения курсовых проектных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «Машины и аппараты химических производств» и «Машины и аппараты пищевых производств».

Табл. 13. Ил. 16. Библиогр.: 43 назв. Прил. 9 рисунков.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра теплотехники Ивановской государственной текстильной академии;
доктор технических наук П.П. Гуюмджян (Ивановский государственный
архитектурно-строительный университет)

ISBN 978-5-9616-0335-4

© Миронов В.П., Постникова И.В., 2010

© Ивановский государственный химико-
технологический университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1 РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ПЛАСТМАСС	4
1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
1.2. ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ОБОЛОЧКИ	8
1.3. ФЛАНЦЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	11
1.4. ПЛОСКИЕ ДНИЩА И СТЕНКИ	11
1.5. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЕМКОСТИ	12
1.6. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЕМКОСТИ	14
1.7. СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ И МЕТАЛЛОПЛАСТОВЫЕ ОБОЛОЧКИ	15
ГЛАВА 2 АППАРАТЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	25
2.1. АППАРАТЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	25
2.2. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА АППАРАТОВ И КОРПУСОВ МАШИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	31
ГЛАВА 3 КОЛОННЫЕ АППАРАТЫ И РЕАКТОРЫ	43
3.1. КОЛОННЫЕ АППАРАТЫ. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ	43
3.2. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЛОННЫХ АППАРАТОВ	44
ГЛАВА 4 МАЛОЦИКЛОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ СОСУДОВ И АППАРАТОВ	62
4.1. УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА	66
4.2. УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ (объект – тонкостенный аппарат)	68
4.3. МЕТОДИКА УТОЧНЕННОГО РАСЧЕТА С УЧЕТОМ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ (объект – горячий аппарат высокого давления)	68
4.4. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ. МЕТОДИКИ УТОЧНЕННОГО РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННОГО АППАРАТА	69
4.5. СОСТАВНЫЕ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ	71
ГЛАВА 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	72
5.1. ТЕСТОВЫЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ ПО КУРСУ	72
5.2. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	78
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	102
ПРИЛОЖЕНИЯ	105

ГЛАВА 1

РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ПЛАСТМАСС [27,28,29]

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчет на прочность сосудов и аппаратов из пластмасс и стеклопластиков требует определения величин напряжений и деформаций в изделиях определенной геометрической формы при внешних и внутренних характеристиках конструкционных материалов.

Коэффициенты запаса прочности для пластмасс изменяются в более широком интервале, чем для сталей (от 3,2 до 9), коэффициенты запаса на устойчивость (от 6 до 9). Коррозионная активность сред оценивается либо по

коэффициенту уменьшения времени до разрушения $K_i = \frac{i_c}{i_b}$, равного отношению времени до разрушения в данной среде к времени до разрушения в

воде, либо по коэффициенту снижения длительной прочности $K_\sigma = \frac{\sigma_{дл.н.сп}}{\sigma_{дл.н.в.}}$,

равного отношению длительной прочности в данной среде к длительной прочности в воде при одинаковых времени и температуре.

Прочностные характеристики ортотропных и композиционных материалов: модуль упругости и величина расчетных и разрушающих напряжений определяются с учетом объемного содержания композитов в конструкционном материале и их количественных соотношений в меридиональном и кольцевом направлениях.

Основные прочностные характеристики для пластмасс представлены в таблицах 1.1 - 1.6.

В основу вывода расчетных формул положены решения дифференциальных уравнений равновесия цилиндрических ортотропных оболочек в перемещениях.

В результате выведены расчетные формулы для анализа прочности и устойчивости цилиндрических, эллиптических, полушаровых и конических оболочек, прогиба ортотропных пластин.

Расчет горизонтальных цилиндрических емкостей выполнен с учетом гидростатического давления и инерционной нагрузки или постоянного газового давления.

При расчете и конструировании прямоугольных (коробчатых) емкостей учитывается размещение ребер жесткости (стоек) в соответствии с величиной гидростатического давления и условиями их закрепления.

Для вертикальных цилиндрических емкостей, несущих и ограждающих конструкций, расчет верха и низа выполняется с учетом нагрузки и от веса

Таблица 1.1

Сопротивление усталости пластмасс при изгибе

Материал	Вид нагружения	Частота цикла в минуту	База, млн. цикл.	Сопротивление усталости σ , МПа	Статическая прочность σ , МПа	Коэффициент запаса $K=\sigma/p \cdot 100$ %
Стеклотекстолит на основе смолы Р-21	Ч	100	10	33	135	24
Стеклотекстолит на основе смолы ПЭМ-2	К	47,3	10	70	370	19
Стеклопластик АГ-4С	К	47,3	10	60	200	30
Стеклопластик АГ-4В	К	47,3	10	35	100	35
Текстолит (обрезки грубой ткани на основе фенолформальдегидной смолы)	Ч	28,7	100	19,2	58,5	33
То же	К	28,7	100	22,9	58,5	39
Текстолит на основе фенолформальдегидной смолы	Ч	50	10	28	138	21
То же	-	25	20	31,6	132,5	24
Фенолформальдегидный бумагопласт	4	166,7	250	47,5	217	22
То же	-	25	0,6	58,5	200	28
Капрон	К	47,3	10	6,5	90	7
Полистирол	Ч	100	10	5	70	7
Винипласт	Ч	100	10	7,9	110	7
Оргстекло	К	47,3	10	10,5	129	8
То же	Ч	57,5	10	146	Более 83*	Менее 17
Полиэтилен низкой плотности высокого давления	К	47,5	10	2,5	Более 22,5*	Менее 11
То же	Ч	100	10	3,2	Более 22,5*	Менее 14
Полиэтилен высокой плотности низкого давления	Ч	100	10	4,7	48	10
Ацетилцеллюлоза	Ч	57,5	100	7,3	Более 35,8*	Менее 20

Примечание. Обозначения: К - консольный изгиб; Ч - чистый изгиб.

* Образец сильно изгибался без излома.

Таблица 1.2

Предел прочности пластмасс в зависимости от температуры, МПа

Материал	Температура, °С								
	-80	-60	-40	0	+20	+50	+100	+150	+200
Стеклотекстолит (со стекловолокном на безщелочной основе)	-	-	-	-	320	302	280	255	232
То же, со стекловолокном	-	-	-	-	128	120	108	90	67,5
Гетинакс	-	-	-	-	110	80	65	50	35
Полиэтилен низкой плотности высокого давления	48	-	28,5	-	12,5	7,5	2,5	-	-
Полиэтилен высокой плотности низкого давления	-	51	45	-	32	25	125	-	-
Винипласт	-	-	-	-	56	42	30*	-	-
Фторопласт-4	-	-	35-50	33	25	24	19	-	-

* При температуре + 80°С

Таблица 1.3

Допускаемые исходные напряжения для пластмасс различных марок, МПа

Пластмассы	σ в.с.ж	σ_B	σ_H	Нагрузка				
				кратковременная			циклическая	
				$[\sigma]_{в.с.ж}$	$[\sigma]_B$	$[\sigma]_H$	при изгибе	кон-такт-ная
							$[\sigma]_0$	$[\sigma]_K$
Пресс-порошки* ¹	90	40	70	60	30	50	15	7,5
Фенолит 1, 2, 3	160	45	55	120	35	40	10	7
Декоррозит 1, 2	140	-	60	100	-	45	10	6
Текстолитовая крошка	160	45	55	120	35	40	12	7
Пресс-порошки типа ФКПМ	160	25	50	120	18	33	8	8
Монолиты	145	30	70	110	22	50	13	6
Волокнит	140	30	80	100	18	60	15	7
Асболокниты	90	45	75	65	35	55	12,5	7
Стекловолокнит АГ-4В	130	80	100	95	60	75	20	7
Стеклотекстолит АГ-2	80	45	65	60	35	48	18	6
Стеклопластик* ²	230	300	230	150	200	150	23,5	10
Аминопласты А и Б	100	40	70	75	30	50	15	8
Текстолиты	220	70	100	150	45	65	20	12
Капрон	70	80	80	35	30	40	17	4
Полиамидные смолы 68, 54	80	50	70	40	25	35	15	5; 2,5
Полиамидная смола АК-7	85	55	100	42	27	50	16	6
Поливинилхлорид	85	50	100	42	25	50	12,5	-
Полистирол блочный	90	40	80	46	20	40	8	4,5
Полипропилен	70	35	60	35	17	30	12	3
Полиформальдегид	130	60	100	65	30	50	12,5	5,5
Поликарбонат	77	70	85	35	35	42	10	5
* ¹ Пресс-порошки марок К-152, К-17-2, К-18-2, К-19-2, К-20-2, К-110-2, К-21-2, К-211-2, К-211-32, К-220-23.								
* ² Стеклопластик на полиэфирной смоле, армированный стеклотканью								

Таблица 1.4

Запасы прочности пластмасс

Материал	Распределение напряжений	Нагружение			
		регулярное			периодическое
		$n_\sigma = \sigma_\sigma / [\sigma]$	$n_{\sigma.с.ж} = \sigma_{\sigma.с.ж} / [\sigma]$	$n_T = \sigma_T / [\sigma]$	$n = \sigma_{-1} / [\sigma]$
Термопласты	Равномерное	2,5-3,5	2 – 3	1,5 - 2	2 – 3
	С концентрацией	4 - 6	-	-	(2-3)K*
Реактопласты	Равномерное	2,5-3,5	2,5 - 3	1,2 – 2	3 - 4
	С концентрацией	4 - 6	-	-	(3 – 4)K*
*K=K ₁ K ₂ K ₃ (здесь K ₁ = 1 при точном учете условий работы детали, K ₁ = 1,4 – 1,65 при недостаточно точном; K ₂ = 1 – 2,2 учитывает влияние выточек и других концентраторов; K ₃ = 1,15 для крупных и сложных деталей.					

Таблица 1.5

Предел прочности пластмасс после 1000 ч испытаний

Материал	Вид нагружения	Предел прочности при нагружении, МПа		Коэффициент запаса прочности $(\sigma_d/\sigma_v)100\%$
		кратковременном σ_v	длительном σ_d	
Стеклотекстолит на основе эпоксидной смолы	Растяжение	379	273	72
То же	Изгиб	499	336	72
Стеклотекстолит на основе полиэфирной смолы	Изгиб	350	230	66
То же	Изгиб	430	280	65
Стеклотекстолит на основе фенольной смолы	Изгиб	540	330	61
То же	Изгиб	580	330	67
Фенольный бумажный пластик	Растяжение	121	80,5	67
То же	Растяжение	123	80,5	65
Текстолит на основе фенольной смолы	Растяжение	121	80,5	67
Аминопласт с целлюлозным волокном	Растяжение	53,5	360	67
Полиметилметакрилат (оргстекло)	Растяжение	63,5	28,5	43
Фенопласт с асбестом	Растяжение	41,5	15,5	37
Фенопласт с древесной мукой	Растяжение	45,5	16	36
Фенолформальдегидная смола	Растяжение	65	15	23
Целлулоид	Растяжение	-	45	-
Полистирол	Растяжение	-	25	-
Оргстекло	Растяжение	-	20	-
Поливинилхлорид	Растяжение	-	3,5	-

крышки, снеговой нагрузки, гидростатического давления и ветровой нагрузки. Несущие конструкции представляют в виде решетки, состоящей из стоек и поясов, стойки работают на изгиб, а пояса – на растяжение.

Плоские элементы ограждающей конструкции выполняют в виде цилиндрических панелей.

Горизонтальные подземные цилиндрические сосуды рассчитываются на прочность, жесткость и усталость при действии гидростатического давления или постоянного газового давления, нагрузки от грунта (нормальной и касательной) и реакции опор. Прочность сосуда определяется кольцевым изгибающим моментом, жесткость - радиальным перемещением, устойчивость – кольцевым меридиональным усилием.

В химическом и пищевом машиностроении из пластмасс изготавливают различную аппаратуру и детали. Кроме того, пластмассы используют для покрытий и футеровки. Коэффициент запаса по пределу длительной прочности

принимают для емкостной аппаратуры $n_\tau = 3$, а для аппаратуры, работающей под давлением, $n_\tau = 3,5$.

Коэффициент запаса прочности для срока службы 10^5 ч для емкостной аппаратуры равен $n_p = 5,2$; для аппаратуры, работающей под давлением, $n_p = 6$.

Выбор конструкционного материала из пластмасс зависит от агрессивных свойств среды и определяется по коэффициенту уменьшения времени до разрушения (K_τ). Материал считают применимым в данной среде при $K_\tau > 0,1$, этому значению соответствует $K_\sigma = 0,5$.

1.2. ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ОБОЛОЧКИ

Пробное давление определяется $P_{np} = K \frac{\sigma_p}{\sigma_\tau} P_{раб}$, где $K = 1,1$ для сосудов под налив, $K = 1,25$ для аппаратов, работающих под давлением; σ_p – предел временной прочности, σ_τ – предел длительной прочности.

Для аппаратуры, работающей под давлением, при $\frac{\sigma_p}{\sigma_\tau} = 0,5$, $P_{np} = 2,5P_{раб}$.

Расчет толщины стенки и днища аппарата из винипласта (в условиях статических нагрузок) производят по формулам:

а) для цилиндрической обечайки

$$S = \frac{P \cdot D}{2,3[\sigma]\varphi - P} + C, \quad [P] = \frac{2,3S[\sigma]\varphi}{D + S}; \quad (1.1)$$

б) для конического днища

$$S = \frac{P \cdot D}{2,3[\sigma]\varphi \cos \alpha - P} + C, \quad [P] = \frac{2,3[\sigma]\varphi \cos \alpha}{D + S}; \quad (1.2)$$

в) для эллиптического днища

$$S_1 = \frac{P \cdot D}{4[\sigma]\varphi - P} \cdot \frac{D}{2h} + C, \quad [P] = \frac{8S_1[\sigma]\varphi}{D + 2\frac{h}{D}S} \cdot \frac{h}{D}; \quad (1.3)$$

г) для полушарового днища

$$S_1 = \frac{P \cdot D}{4[\sigma]\varphi - P} + C, \quad [P] = \frac{4S[\sigma]\varphi}{D + S}. \quad (1.4)$$

Формула (1.1) применима при $S/D \leq 0,5$; формула (1.2) – при $S/D \leq 1/2 \cos \alpha$, формулы (1.3 и 1.4) – при $S/D \leq 0,25$.

Коэффициент прочности сварного шва $\varphi = 0,5$ для Х – образного шва; $\varphi = 0,35$ для V – образного шва; $\varphi = 1,0$ для цельных труб. Прибавка С,м, назначается для округления расчетной толщины листа до стандартной, с учетом минусового допуска по ГОСТ 9639-71.

Критическую нагрузку для обечайки, укрепленной ребрами жесткости, принимают равной наименьшему из трех значений нагрузок: для гладкой длинной, равной шагу ребер жесткости для ребра жесткости, для оболочки в целом.

Пример конструктивного оформления ребер и колец жесткости приведен на рис. 1.1.

Критическое наружное давление, сплющивающее цилиндрическую сварную пластмассовую оболочку, определяется по формуле:

$$P = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{S}{D_{cp}} \right)^3. \quad (1.5)$$

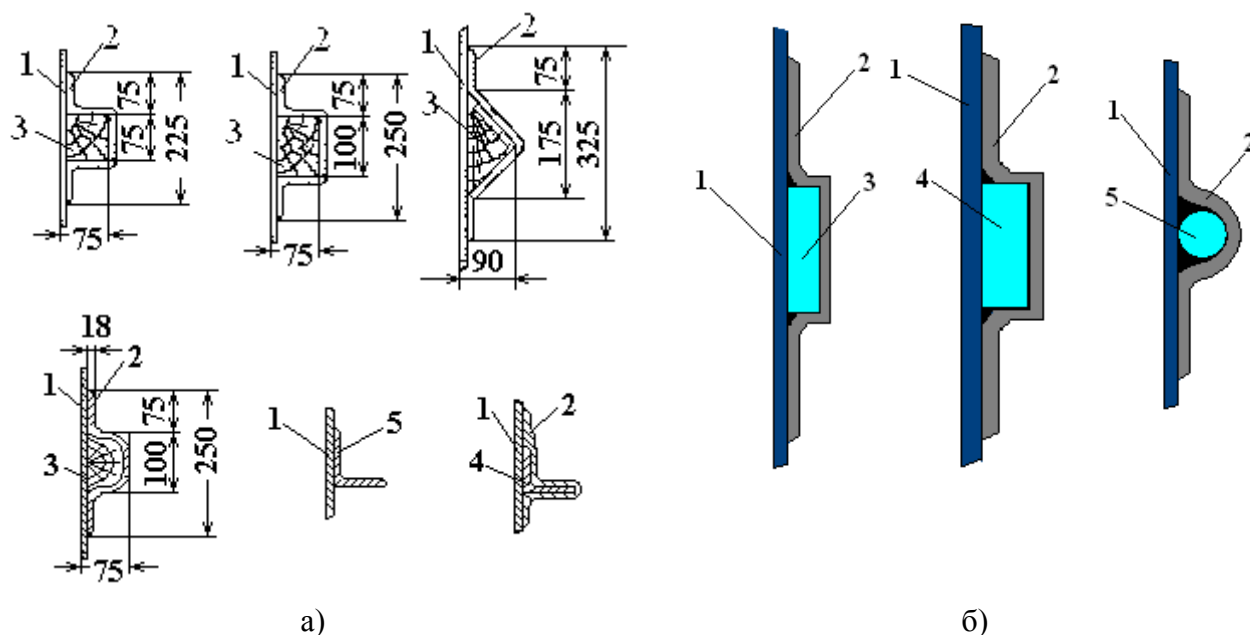


Рис. 1.1. Типовые ребра и кольца жесткости:

а - для стенки прямоугольного резервуара: 1- стенка резервуара; 2 – ребро жесткости из стеклопластика; 3 – подкладка (пенопласт, балза, картон); 4 – металлический уголок, покрытый стеклопластиком; 5 – уголок из стеклопластика; б - для стенки цилиндрического резервуара: 1 – стенка; 2 – кольцо жесткости из стеклопластика; 3 – стальная полоса; 4 – пенополиуретан; 5 – бумажная веревка или толстый канат из стекловолокна.

Момент инерции кольца жесткости, см^4 , может быть найден по формуле:

$$J = \frac{R_k \cdot P \cdot m \cdot l}{3E_k}, \quad (1.6)$$

где R_k – радиус нейтральной линии кольца, см;

m – коэффициент устойчивости ($m = 4, 6$);

l – расстояние между кольцами жесткости, см, определяют по формуле:

$$l \leq \frac{2,59E_k \cdot D}{P \cdot m(D/S)^{0,5}}, \quad (1.7)$$

где S – толщина кольца, см.

Допускаемые напряжения для винипласта в зависимости от рабочей температуры приведены в таблице 1.6.