

Глава 10. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчет трубопровода начинается, как правило, с выбора трубы, т.е. с определения материала, из которого она должна быть изготовлена, ее диаметра и типа (отношение D/δ).

Материал трубы выбирают в зависимости от его химической стойкости, температуры транспортируемой среды, вида прокладки, гигиенических требований, категории помещения и т.д. Диаметр трубы определяется ее пропускной способностью.

Тип трубы определяют, исходя из расчетных нагрузок и воздействий. Так, для напорных систем тип трубы выбирают по первому предельному состоянию, для безнапорных - по второму.

После определения типа выбранные трубы проверяют с учетом конструкции и назначения трубопровода: по продольной устойчивости, прогибу горизонтальных участков, устойчивости круговой формы и т.д. По результатам проверочных расчетов выбирают конструктивное решение системы трубопроводов (расстояния между опорами, конструкции опор или подвесок, способ укладки в траншею и т.д.). Лишь в крайнем случае, если конструктивными методами нельзя найти удовлетворительного решения, повышают тип трубы и снова делают проверочные расчеты.

В настоящее время общепринятым методом расчета конструкций из различных материалов является расчет по предельным состояниям. Отличием метода расчета по предельным состояниям от методов допускаемых напряжений и разрушающих усилий является введение нескольких предельных состояний, лимитирующих работу конструкций.

Вместо единого коэффициента запаса прочности вводится ряд коэффициентов, раздельно учитывающих влияние на несущую способность конструкций изменения нагрузки, прочностных свойств материалов, условий работы и других факторов.

Под предельным понимается такое состояние конструкции, при котором ее дальнейшая нормальная эксплуатация невозможна. Предельное состояние трубопроводов характеризуется следующим:

появлением в конструкции под действием статических нагрузок напряжений, при которых нарушается целостность трубопровода в течение проектируемого срока службы;

развитием чрезмерных деформаций, исключающих возможность дальнейшей эксплуатации трубопровода.

Расчет трубопровода по первому предельному состоянию (несущей способности) производится по формуле

$$nN^p = \Phi(m, K, R^p, s), \quad (10.1)$$

где Φ - функция, соответствующая виду усилия (растяжение, сжатие, изгиб и т. д.); N^p - усилие от норматив-

ных нагрузок; n - коэффициент перегрузки; K - коэффициент, учитывающий рассеяние прочностных свойств материала; R^p - нормативное сопротивление материала; m - коэффициент условий работы; s - геометрические характеристики сечения.

Условие (10.1) содержит требование, чтобы максимально возможное с учетом перегрузки усилие в трубопроводе не превышало его минимальной несущей способности, определяемой с учетом изменчивости показателей прочности материала и условий работы.

Расчет по второму предельному состоянию производится по формуле

$$\Delta \leq f \quad (10.2)$$

где Δ - деформация, являющаяся функцией геометрической формы конструкции и модуля упругости материала; f - предельно допустимая деформация.

Отличием термопластов от неполимерных материалов является существенное изменение во времени их прочностных и деформационных характеристик при непрерывном действии внешних силовых факторов.

На прочностные и деформационные характеристики термопластов в значительной степени влияет температура. В связи с этим расчет трубопроводов из термопластов должен производиться с учетом указанных особенностей этих материалов, т.е. нормативные прочностные и деформационные характеристики должны назначаться в зависимости от срока службы конструкции и температуры ее эксплуатации.

10.2. РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ТРУБ

Определяющим фактором при прочностных расчетах труб из термопластов является расчетное сопротивление материала труб R , которое находится из выражения

$$R = R_n K_y K_c \quad (10.3)$$

где R_n - нормативное длительное сопротивление материала стенки трубы; K_y - коэффициент условий работы трубопровода; K_c - коэффициент прочности соединения труб и соединительных деталей.

Нормативное длительное сопротивление материала стенки определяют исходя из значения эквивалентного напряжения, получаемого по экспериментальным кривым длительной прочности труб с учетом коэффициента запаса прочности. Значения нормативного длительного сопротивления материала стенок труб из термопластов при транспортировке по ним воды приведены в табл. 10.1.

При транспортировке воды (или других веществ) с температурой ниже 20°C рабочее давление принимают таким же, как при температуре 20°C.

Коэффициент условий работы для технологических трубопроводов (табл. 10.2) принимают

Таблица 10.1. Значения нормативного длительного сопротивления материала пластмассовых труб

Срок службы трубопровода, лет	Температура, °C	R _n , МПа. для труб из					
		ПНД	ПВД	ПВХ	ПП	ПБ	сшитого ПНД
50	20	5,0	2,5	10,0	-	8,0	6,3
	30	3,2	1,6	8,0	-	7,2	5,8
	40	1,9	1,0	6,0	-	6,4	5,1
	50	-	0,6	3,5	-	5,6	4,5
	60	-	0,35	1,0	-	5,0	4,0
	70	-	-	-	-	4,0	3,5
25	20	5,7	2,8	10,3	5,0	9,6	6,3
	30	3,8	2,0	8,3	3,9	8,7	5,9
	40	2,3	1,3	6,3	3,0	8,0	5,2
	50	-	0,8	3,7	2,3	6,9	4,6
	60	-	0,5	1,1	1,6	6,0	4,1
	80	-	-	-	-	3,8	3,1
10	20	6,4	3,0	10,5	6,0	11,2	6,5
	30	4,6	2,4	8,5	4,6	10,4	5,9
	40	2,0	1,8	6,5	3,6	9,0	5,3
	50	1,6	1,2	3,9	2,8	8,1	4,7
	60	-	0,8	1,2	2,2	7,0	4,1
	80	-	-	-	1,0	4,5	3,2
	95	-	-	-	-	2,8	2,7
5	20	6,8	3,2	10,7	6,6	11,5	6,6
	30	5,0	2,7	8,7	5,0	10,6	6,0
	40	3,4	2,1	6,7	4,0	9,2	5,4
	50	2,0	1,5	4,0	3,2	8,3	4,8
	60	1,2	1,0	1,3	2,5	7,2	4,2
	80	-	-	-	1,4	4,6	3,2
	95	-	-	-	0,6	2,9	2,8
1	20	7,4	3,6	11,0	7,0	12,0	6,7
	30	6,1	3,0	9,0	5,7	11,0	6,2
	40	4,8	2,5	7,0	4,5	9,6	5,5
	50	3,3	2,0	4,4	3,7	8,6	4,9
	60	2,0	1,5	1,6	3,0	7,5	4,3
	80	-	-	-	2,0	4,8	3,3
	95	-	-	-	1,1	3,0	2,8

Таблица 10.2. Коэффициент условий работы K_u для технологических трубопроводов

Группа транспортируемых веществ	Категория трубопровода	Температура, °C	K_u для труб различных типов из							
			ПНД		ПВД		ПВХ		ПП	ПБ
			С	Т	С	Т	С	Т	С	ОТ
А и Б	I, II, III	20	0,4	0,6			0,6	0,6		
		30	0,4	0,6			0,5	0,5		
		40	0,4	0,6	0,6	0,6	0,25	0,4	0,4	0,6
		50	-	-			-	-		
		60	-	-			-	-		
В	IV	20					0,4	0,4		
		30	0,4	0,6	0,4	0,4	0,25	0,25	0,25	0,4
		40					-	0,16		
	V	Независимо	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0	1,0

Для газопроводов коэффициент условий работы принимают равным 0,4, т.е. трубы типа С-ГАЗ и Т-ГАЗ пригодны для транспортировки газа при температуре 20°C с давлением 0,25 и 0,4 МПа. Трубы типа С-ГАЗ могут быть использованы для транспортировки газа давлением 0,3 МПа, а типа Т-ГАЗ - давлением 0,6 МПа. При этом K_u составит соответственно 0,5 и 0,6.

Таблица 10.3. Коэффициенты прочности соединений K_c

Способы соединений	K_c для труб из		
	ПНД, ПВД,ПП	ПВХ	ПБ
Сварка нагретым инструментом:			
встык	1,0	-	0,7
враструб	1,0	-	1,0
Сварка при V-образной разделке кромок:			
экструзионная	0,6	-	-
газовая прутковая	0,35	-	-
Склеивание враструб	-	1,0	-

Срок службы, лет	Температура, °С	Рабочее давление, МПа, для труб различных типов из															
		ПНД				ПВД				ПВХ			ПП		ПБ	сшитого ПНД	
		Л	СЛ	С	Т	Л	СЛ	С	Т	СЛ	С	Т	Л	С	ОТ		ОТ
50	20	0,25	0,4	0,6	1,0	0,25	0,4	0,6	1,0	0,4	0,6	1,0	-	-	2,5	2,0	
	30	0,16	0,25	0,4	0,63	0,16	0,25	0,4	0,63	0,3	0,48	0,8			2,2	1,8	
	40	0,1	0,16	0,25	0,4	0,1	0,16	0,25	0,40	0,24	0,36	0,6			2,0	1,7	
	50					0,06	0,1	0,16	0,25	0,1	0,2	0,35			1,75	1,4	
	60						0,06	0,1	0,16	-	-	0,1			1,55	1,25	
	70									-	-	-			1,25	1,1	
25	20	0,28	0,45	0,67	1,12	0,28	0,45	0,67	1,12	0,41	0,62	1,03	0,2	0,5	3,0	2,0	
	30	0,18	0,3	0,45	0,75	0,2	0,32	0,5	0,8	0,32	0,5	0,83	0,18	0,4	2,7	1,9	
	40	0,12	0,18	0,28	0,45	0,12	0,2	0,32	0,5	0,25	0,4	0,63	0,12	0,32	2,5	1,65	
	50					0,08	0,12	0,2	0,32	0,12	0,22	0,37	0,1	0,25	2,2	1,5	
	60					0,06	0,1	0,15	0,25			0,11	0,06	0,18	1,9	1,3	
	80													1,2	1,0	1,0	
10	20	0,3	0,5	0,75	1,25	0,3	0,5	0,7	1,2	0,42	0,63	1,05	0,25	0,6	3,5	2,0	
	30	0,22	0,35	0,53	0,9	0,25	0,4	0,6	1,0	0,33	0,51	0,85	0,18	0,45	3,3	1,9	
	40	0,14	0,22	0,35	0,6	0,18	0,3	0,42	0,71	0,26	0,41	0,65	0,16	0,35	2,8	1,7	
	50	0,08	0,12	0,2	0,32	0,12	0,18	0,28	0,45	0,16	0,24	0,39	0,1	0,25	2,5	1,5	
	60					0,08	0,12	0,2	0,32	0,05	0,07	0,12	0,08	0,22	2,2	1,3	
	80												0,06	0,1	1,4	1,0	
95														0,9	0,9	0,9	
5	20	0,32	0,53	0,8	1,32	0,32	0,53	0,8	1,3	0,43	0,65	1,07	0,28	0,63	3,6	2,1	
	30	0,25	0,4	0,6	1,0	0,28	0,42	0,63	1,1	0,35	0,5	0,87	0,22	0,5	3,4	1,9	
	40	0,16	0,25	0,4	0,67	0,2	0,32	0,5	0,85	0,27	0,42	0,67	0,18	0,4	2,9	1,7	
	50	0,1	0,16	0,25	0,4	0,15	0,25	0,36	0,6	0,17	0,25	0,4	0,12	0,32	2,6	1,6	
	60	0,06	0,1	0,16	0,25	0,1	0,16	0,25	0,4	0,05	0,08	0,13	0,1	0,25	2,3	1,3	
	80												0,06	0,15	1,45	1,0	
95													0,06	0,9	0,9	0,9	
1	20	0,36	0,6	0,85	1,4	0,36	0,6	0,85	1,4	0,45	0,67	1,1	0,3	0,7	3,8	2,1	
	30	0,3	0,5	0,7	1,2	0,3	0,5	0,75	1,2	0,36	0,53	0,9	0,24	0,56	3,5	1,95	
	40	0,24	0,38	0,56	0,95	0,25	0,4	0,6	1,0	0,28	0,43	0,7	0,18	0,45	3,0	1,75	
	50	0,16	0,27	0,4	0,65	0,2	0,3	0,5	0,8	0,18	0,26	0,44	0,15	0,38	2,7	1,7	
	60	0,1	0,16	0,25	0,4	0,15	0,25	0,4	0,6	0,05	0,08	0,16	0,12				

В зависимости от используемых соединений и соединительных деталей коэффициент прочности соединений K_c следует принимать по табл. 10.3.

Основным видом нагружения пластмассовых труб является внутреннее гидростатическое давление, поэтому для напорных труб в большинстве случаев целесообразно использовать табл. 10.4, в которой приведены значения рабочих давлений в зависимости от типа труб, срока службы трубопроводов и температуры транспортируемой по ним воды. При транспортировке по трубам вредных или горючих веществ можно пользоваться табл. 10.5, а негорючих и не вредных веществ, к которым материал труб химически относительно стоек, - табл. 10.6. В двух последних таблицах значение рабочего давления снижено с учетом коэффициента K_y . Считается, что при изготовлении трубопроводов применены соединения и соединительные детали, равнопрочные с трубами. При использовании неравнопрочных с трубами соединений и соединительных деталей значение рабочего давления следует снижать, умножая его на коэффициент K_c .

Для расчетов трубопроводов по несущей способности необходимо знать расчетное сопротивление материала труб R , а по деформациям - модуль ползучести материала труб E .

Модуль ползучести принимают с учетом его изменения при

Таблица 10.5. Рабочее давление для пластмассовых труб и соединительных деталей в зависимости от срока службы и температуры вредных и горючих веществ

Срок службы, лет	Температура, °C	Рабочее давление, МПа, для труб различных типов из							
		ПНД		ПВД		ПВХ		ПБ	ПП
		С	Т	С	Т	С	Т	ОТ	С
25	20	0,25	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	1,5	0,2
	30	0,16	0,4	0,45	0,4	0,25	0,4	1,3	0,16
	40	0,1	0,25	0,16	0,25	0,1	0,25	1,2	0,12
	50			0,1	0,16		0,1	1,05	0,1
	60			0,06	0,1			0,9	
10	20	0,28	0,67	0,45	0,67	0,42	0,62	1,8	0,25
	30	0,18	0,45	0,32	0,5	0,28	0,42	1,7	0,18
	40	0,12	0,28	0,2	0,32	0,12	0,28	1,5	0,15
	50			0,12	0,2		0,12	1,3	0,1
	60			0,1	0,16			1,15	0,08
5	20	0,3	0,75	0,5	0,7	0,45	0,63	2,1	0,28
	30	0,22	0,53	0,4	0,6	0,3	0,45	2,0	0,22
	40	0,14	0,35	0,25	0,42	0,15	0,3	1,7	0,18
	50	0,08	0,2	0,18	0,28		0,15	1,5	0,12
	60			0,12	0,2			1,3	0,1
1	20	0,32	0,8	0,53	0,8	0,5	0,65	2,2	0,3
	30	0,25	0,6	0,42	0,63	0,4	0,5	2,1	0,24
	40	0,16	0,4	0,32	0,5	0,2	0,4	1,8	0,18
	50	0,1	0,25	0,25	0,36		0,2	1,6	0,15
	60	0,06	0,16	0,16	0,25			1,4	0,12

длительном действии нагрузки и температуры на трубопровод по формуле

$$E = k_l E_o \quad (10.4)$$

где E_o - модуль ползучести материала трубы при растяжении, принимаемый по табл. 10.7 в зависимости от проектируемого срока службы трубопровода и напряжения в стенке трубы; k_l коэффициент, учитывающий влияние температуры на деформационные свойства материала труб, принимаемый по табл. 10.8.

При определении деформаций от действия расчетных нагрузок на трубопроводы, транспортирующие вещества с температурой до 40°C, коэффициент Пуассона μ должен приниматься равным: 0,42-0,44 - для труб из ПНД и ПБ; 0,44-0,46 - для труб из ПВД; 0,40-0,42 - для труб из ПП и 0,35-0,38 - для труб из ПВХ.

Для трубопроводов, транспортирующих вещества с температурой выше 40°C, коэффициент Пуассона допускается принимать равным 0,5.

Таблица 10.6. Рабочее давление для пластмассовых труб и соединительных деталей в зависимости от срока службы и температуры не вредных и не горючих веществ, к которым материал химически относительно стоек

Срок службы, лет	Температура, °C	Рабочее давление, МПа, для труб различных типов из							
		ПНД		ПВД		ПВХ		ПП	ПБ
		С	Т	С	Т	С	Т	С	ОТ
25	20	0,25	0,6	0,25	0,4	0,25	0,4	0,16	1,2
	30	0,16	0,4	0,16	0,25	0,1	0,25	0,1	1,1
	40	0,1	0,25	0,1	0,16	~	0,1	~	1,0

10	20	0,28	0,67	0,28	0,45	0,26	0,41	0,18	1,4
	30	0,18	0,45	0,18	0,32	0,12	0,26	0,15	1,2
	40	0,12	0,28	0,12	0,2	~	0,12	0,1	1,1
5	20	0,3	0,75	0,3	0,5	0,28	0,42	0,22	1,45
	30	0,22	0,53	0,22	0,35	0,14	0,28	0,18	1,35
	40	0,14	0,35	0,14	0,22	~	0,14	0,12	1,15
1	20	0,32	0,8	0,32	0,6	0,3	0,43	0,24	1,5
	30	0,25	0,6	0,25	0,4	0,16	0,3	0,19	1,4
	40	0,16	0,4	0,16	0,25	0,1	0,16	0,15	1,2

Таблица 10.7. Значения модуля ползучести E_0

Мате- риал труб	Срок служ- бы,	Е _о при напряжении в стенке трубы, МПа														
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	0,5
ПВД	50	-	-	-	-	-	120	90	100	120	140	150	160	180	200	220
	25							100	110	130	150	160	170	190	210	230
	10							110	120	140	160	170	190	210	230	250
	5							140	130	150	170	190	200	220	240	270
	1								150	170	200	210	230	250	280	300
ПВД	50	-	-	-	-	-	-	-	-	35	32	35	40	45	55	65
	25										35	38	42	48	58	68
	10										40	40	45	50	60	70
	5										42	42	48	55	65	75
	1											45	50	60	70	80
ПВХ	50	-	1170	780	800	810	815	820	825	830	835	-	840	-	850	-
	25			960	1000	1000	1010	1020	1020	1030	1030		1040		1050	
	10			1200	1240	1250	1260	1265	1270	1280	1290		1300		1300	
ПВХ	51	1550	1300	1350	1380	1400	1420	1430	1440	1450	1460		1470		1480	
			1620	1650	1700	1720	1740	1750	1760	1770	1780		1790		1800	
ПП	25	-	-	-	-	-	310	250	210	220	240	250	270	280	300	320
	10							270	260	270	290	300	320	330	350	370
	5							320	280	300	320	330	350	360	380	400
	1								330	350	380	390	400	420	440	450
ПБ	25	110	130	140	160	170	190	205	220	240	250	-	260	-	-	-
	10	120	140	150	170	180	200	215	235	250	260		275			
	5	140	150	165	180	190	210	225	260	270	270		285			
	1	150	160	170	190	210	220	230	250	270	285		300			

Таблица 10.8. Значения коэффициента, k_t

Материал труб	k_t при температуре, гр. С						
	20	30	40	50	60	80	95
ПВД	11	0,75	0,6	0,45	0,4	0,35	0,25
ПВД	1	0,8	0,65	0,5	0,4	0,4	0,24
ПВХ	1	0,9	0,85	0,8	0,7		
ПП	1	0,85	0,75	0,6	0,5		
ПБ		0,9	0,8	0,72	0,64		

Трубы из фторопласта обладают ярко выраженной хладотекучестью. Несущая способность этих труб характеризуется деформацией ползучести. Принимается, что изменение геометрических размеров трубы не должно превышать допустимых для нормальной эксплуатации пределов, поэтому трубы из фторопласта в основном используют в качестве футерующего слоя стальных труб и соединительных частей.

10.3. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

При расчете трубопроводов нагрузки и воздействия, возникающие при их сооружении, испытании и эксплуатации, следует учитывать согласно СНиП 2.01.07-85, при этом коэффициенты перегрузки необходимо принимать по табл. 10.9.

Рабочее внутреннее давление транспортируемого вещества, нагрузки и воздействия, возникающие при монтаже и испытании трубопровода, устанавливают проектом.

Температурные воздействия на трубопроводы определяются в п. 10.4, при этом температурный перепад в материале стенок трубы Δt , °C, следует принимать равным разнице между максимально (или минимально) возможной температурой стенок в процессе эксплуатации и наименьшей (или наибольшей) температурой окружающей среды, при которой производится замыкание трубопровода или его части в законченную систему (монтаж замыкающих стыков). При определении максимальных и минимальных температур стенок труб и окружающей среды надлежит руководствоваться СНиП 2.01.01-82.

Порядок определения нагрузок на подземные трубопроводы от давления грунта в траншее и в насыпи, временных нагрузок на поверхности земли, собственного веса труб и веса транспортируемого вещества приведен ниже.

При расчете внешних нагрузок следует иметь в виду, что на их значение существенно влияют следующие факторы: условия укладки труб в траншею, насыпь или узкую прорезь; способы опирания труб на основание: плоское грунтовое, грунтовое, спрофилированное по форме трубы (выкружка) или на бетонный фундамент; степень уплотнения грунтов засыпки: нормальная, повышенная или плотная; глубина заложения,

определяемая высотой засыпки над верхом трубопровода.

При засыпке трубопровода должно производиться послойное уплотнение грунта с обеспечением коэффициента уплотнения не менее 0,85 - при нормальной степени уплотнения и 0,93 - при повышенной. Повышенная степень уплотнения грунта достигается засыпкой увлажненным намытым песчаным грунтом, полученным при разработке траншей.

Таблица 10.9. Коэффициенты перегрузки

Характер нагрузок и воздействий	Нагрузки и воздействия	Способ прокладки трубопровода		Коэффициент перегрузки
		подземный	надземный в насыпи	
Постоянные	Вес трубопровода	+	+	1,1 1,15
	Давление грунта	+		
	Гидростатическое давление	+		
Временные длительные	Внутреннее давление	+	+	1,0
		++ +	++	1,0 1,1
	транспортируемого вещества	++		1,3
	Вес транспортируемого вещества			1,4 1,0
	Температурные воздействия			
	Давление от нагрузок на поверхность и грунта			
	Нагрузки от колонн ав-			

Кратко-временные	Возникающие при монтаже и испытании трубопроводов	+	+	1,0
	Нагрузки: снеговые ветровая гололедная	-	++ +	1,4 1,4 1,3

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: «+» - нагрузки и воздействия при расчетах учитываются; «-» - не учитываются.