

Технологические трубопроводы из полимерных материалов

В. Я. Магалиф

Преимуществом трубопроводов из полимерных материалов является небольшой вес и высокая коррозионная стойкость, а недостатком – более низкие механические характеристики. Трубопроводы делятся на жесткие, которые работают как геометрически неизменяемые стержневые системы, и гибкие, работающие по принципу гибкого шланга. Механическая прочность зависит от срока службы и режима эксплуатации. Расчетные сопротивления сжатию и изгибу определяются по эталонным кривым длительной прочности, полученным на основе лабораторных испытаний. Несущая способность оценивается по условиям прочности и жесткости (допустимой овализации). Приведены области применения для различных групп и категорий технологических трубопроводов.

Ключевые слова: технологические трубопроводы, полимерные материалы, области применения, оценка прочности.

Конструкции трубопроводов из полимерных материалов имеют неоспоримые преимущества:

- низкие, по сравнению с металлами, производственные расходы на изготовление труб и деталей и минимальные потребности в их чистовой обработке,
- небольшой удельный вес,
- хорошие тепло- и электроизоляционные свойства,
- стойкость против коррозии.

К недостаткам относятся более низкие, по сравнению с металлами, характеристики прочности и неспособность противостоять высоким температурам. В полимерных трубопроводах допускается кратковременное повышение температуры транспортируемой среды не более, чем до 100°C при ограниченной продолжительности ее действия 100 ч за весь срок службы трубопровода.

Некоторые конструкторы ошибочно считают полимеры дешевыми заменителями металлов, тогда как стоимость, например, тонны полипропилена или поливинилхлорида, более чем в два раза выше стоимости чугуна и стали. Но энергозатраты на производство полимерных труб и деталей существенно ниже, чем при их изготовлении из традиционных материалов.

Трубопроводы из полимерных материалов делятся на жесткие, которые работают как геометрически неизменяемые стержневые системы, и гибкие, работающие по принципу гибкого шланга. Трубопроводы из полиэтилена диаметром до 120 мм могут быть как жесткими, так и гибкими, а более 120 мм — как правило, жесткими. Полипропилен и поливинилхлорид менее пластичны по сравнению с полиэтиленом. Модуль упругости полипропилена выше в 2 раза,

а поливинилхлорида — в 10 раз. Поэтому трубопроводы из этих материалов диаметрами более 50 мм конструируют жесткими.

И еще одна классификация — трубопроводы надземные и подземные в каналах, прокладываемые на опорах или непрерывном жестком основании (в лотках) и подземные, заземленные в грунте.

Для технологических трубопроводов рекомендуется использовать трубы и детали, изготовленные по Государственным стандартам и техническим условиям заводов-изготовителей, из следующих полимерных материалов:

- PE — полиэтилен,
- PE -RT — полиэтилен теплостойкий,
- PE -X — сшитый полиэтилен,
- PP-R — полипропилен рандомсополимер,
- PP-B — полипропилен блоксополимер,
- PP-H — полипропилен гомополимер,
- PP- RCT — полипропилен рандом статический сополимер пропилена с этиленом,
- PВ — полибутен,
- PVC-C тип II — поливинилхлорид хлорированный тип II.

В табл. 1 приводятся сравнительные характеристики труб из различных полимерных материалов, применяемых в системах отопления.

Трубопроводы из полимерных труб не допускается применять для транспортировки чрезвычайно и высокоопасных веществ 1 и 2 классов опасности, а также веществ, к которым материалы труб химически нестойки. Рекомендуемый перечень веществ, к которым полимерные материалы химически стойки приведен в приложении 1 к СН 550–82 [2].

Механическая прочность и твердость полимерных материалов зависит от срока службы и режима эксплуатации. Допускаемые напря-

Табл. 1. Сравнительные характеристики труб из различных материалов, применяемых в системах отопления (данные ООО «Изосталь»)

Параметр	Материал				
	PE	PP-R	PB	PE-X	PE-RT тип II
Допускаемое напряжение в стенке трубы для 5-го класса эксплуатации (срок службы 50 лет), МПа	Не применяется при $T_{\text{раб}} > 50^{\circ}\text{C}$	1,9	4,3	3,24	2,88
Минимальная толщина стенки трубы диаметром 110 мм для 5-го класса эксплуатации с $P_{\text{макс}}=0,6$ МПа, мм	—	15,0	7,2	9,3	10,4
Модуль упругости, при $T=20^{\circ}\text{C}$ МПа	500	1000	400	600-700	650
Способ соединения	—	Сварка	Сварка	Компрессионные фитинги	Сварка и компрессионные фитинги

жения рассчитываются по эталонным кривым длительной прочности, полученным на основе лабораторных испытаний. ГОСТ Р 52134–2003* содержит эталонные кривые длительной прочности для всех рекомендуемых выше материалов труб. Некоторые кривые состоят из двух участков (ломанные кривые).

На рис. 1 приведены эталонные кривые длительной прочности (в логарифмических шкалах) для труб из полипропилена марки PP-R 80, которые применяются для напорных трубопроводов. Начиная с температуры 70°C и выше, кривые состоят из левой и правой части, которые сты-

куются в точках перелома. Напряжения, соответствующие этим точкам, приведены в табл. 2.

Для расчетной температуры $T_i < 70^{\circ}\text{C}$ и левой части кривой при $T_i \geq 70^{\circ}\text{C}$ справедлива зависимость

$$\lg(t_i) = 55,725 - 9484,1 \lg(K_i \sigma_i) / (T_i + 273) + 25502,2 / (T_i + 273) + 6,39 \lg(K_i \sigma_i),$$

а для правой части кривой при $T_i \geq 70^{\circ}\text{C}$

$$\lg(t) = -19,98 + 9507 / (T_i + 273) - 4,11 \lg(K_i \sigma_i).$$

Здесь t_i — время непрерывного действия температуры T_i , которое труба может выдержать без разрушения, ч; σ_i — напряжение в стенке трубы при температуре T_i , МПа; K_i — расчетный коэффициент запаса прочности при температуре T_i , принимаемый по следующим данным: при $T_{\text{раб}} — 1,5$, при $T_{\text{макс}} — 1,3$; при $T_{\text{авар}} — 1,0$.

Срок службы трубопровода определяется суммарным временем его работы при температурах $T_{\text{раб}}$, $T_{\text{макс}}$ и $T_{\text{авар}}$:

$T_{\text{раб}}$ — рабочая температура или комбинация температур (когда рабочих температур несколько);

$T_{\text{макс}}$ — максимальная рабочая температура, действие которой ограничено во времени. Как правило, это температура имеет суммарную продолжительность до 10% от срока службы трубопровода и характеризует допустимое крат-

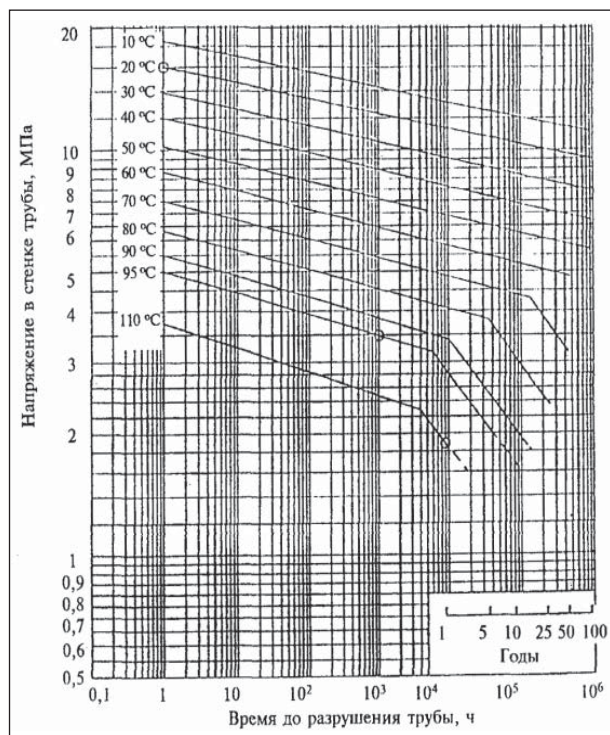


Рис. 1. Эталонные кривые длительной прочности для труб из полипропилена PP-R 80

Табл. 2. Границы применимости эталонных кривых длительной прочности для PP-R 80

$T_i, ^{\circ}\text{C}$	$K_i \sigma_i$
70	4,31
75	4,07
80	3,84
90	3,41
100	3,01

ковременное повышение $T_{\text{раб}}$. В том случае, когда рабочих температур несколько (комбинация температур), $T_{\text{макс}}$ будет одна, ибо она представляет собой кратковременное повышение наибольшей рабочей температуры;

$T_{\text{авар}}$ — аварийная температура, возникающая в аварийных ситуациях при нарушениях в работе систем регулирования. Принимается равной 100 часам независимо от расчетного срока службы трубопровода.

Например, 5-й класс эксплуатации систем высокотемпературного отопления, приведенный выше в табл. 1, согласно ГОСТ Р 52134–2003* предусматривает работу трубопровода из полимерных материалов в течение 50 лет при соблюдении следующего температурного режима эксплуатации:

$$T_{\text{раб}} = 20^{\circ}\text{C} - 14 \text{ лет,}$$

$$T_{\text{раб}} = 60^{\circ}\text{C} - 25 \text{ лет,}$$

$$T_{\text{раб}} = 80^{\circ}\text{C} - 10 \text{ лет,}$$

$$T_{\text{макс}} = 90^{\circ}\text{C} - 1 \text{ год,}$$

$$T_{\text{авар}} = 100^{\circ}\text{C} - 100 \text{ ч.}$$

В частном случае, когда трубопровод работает при постоянной расчетной температуре, допускаемое напряжение определяется только для одного значения $T_{\text{раб}}$ в течение всего срока службы.

Суммарное повреждение TYD , %/ч, рассчитывается по формуле

$$TYD = \sum a_i / t_i,$$

где a_i — назначенное время действия температуры T_i за весь срок службы трубопровода, %.

Срок службы трубопровода является величиной, обратной TYD и обычно вычисляется в годах

$$\tau = \frac{100}{TYD \cdot 24 \cdot 365,25} = \frac{1}{TYD \cdot 87,66}.$$

Пример определения σ трубопровода из пропилена PP-R 80.

Трубопровод служит для транспортировки этиленгликоля. Срок службы 25 лет или $219 \cdot 10^3$ ч. Из них:

- работа при температуре $T_{\text{раб}} = 60^{\circ}\text{C}$ составляет $a_1 = 97\%$ времени,
- работа при аварийной температуре $T_{\text{авар}} = 90^{\circ}\text{C}$ в течение 100 ч

$$a_3 = \frac{100}{219 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,046\%,$$

- работа при максимальной температуре $T_{\text{макс}} = 70^{\circ}\text{C}$ составляет $a_2 = 100 - 97 - 0,046 = 2,954\%$.

Напряжение в стенке трубы определяется по эталонным кривым (рис. 1) с помощью последовательных приближений.

Начальное приближение: $\sigma = 3,3$ МПа. Расчетные напряжения составляют

$$\text{при } T_1 = 60^{\circ}\text{C}: K_1 \sigma_1 = 1,5 \cdot 3,3 = 4,95 > 4,82 \text{ МПа,}$$

$$\text{при } T_2 = 70^{\circ}\text{C}: K_2 \sigma_1 = 1,3 \cdot 3,3 = 4,29 < 4,31 \text{ МПа,}$$

$$\text{при } T_3 = 100^{\circ}\text{C}: K_3 \sigma_1 = 1,0 \cdot 3,3 = 3,3 < 3,41 \text{ МПа.}$$

В правой части неравенств — граничные значения для σ_1 , определяемые для PP-B 80 по табл. 1. Напряжения при температуре $T_1 = 60^{\circ}\text{C}$ относятся к эталонной кривой, которая не имеет точки перелома (первая зависимость), при температурах $T_2 = 70^{\circ}\text{C}$ и $T_3 = 90^{\circ}\text{C}$ расчетные напряжения находятся справа от точки перелома (вторая зависимость). Подставляя T_i и $K_i \sigma_1$ в уравнения для соответствующих кривых, получаем

$$t_1 = 3,26 \cdot 10^5 \text{ ч, } t_2 = 1,35 \cdot 10^5 \text{ ч, } t_3 = 0,12 \cdot 10^5 \text{ ч.}$$

Повреждаемость

$$TYD = \frac{a_i}{t_i} = \frac{97}{3,26 \cdot 10^5} + \frac{2,954}{1,35 \cdot 10^5} + \frac{0,046}{0,12 \cdot 10^5} = 32,32 \cdot 10^{-5} \%/\text{ч.}$$

Срок службы

$$\tau = \frac{1}{TYD \cdot 87,66} = \frac{1}{32,32 \cdot 10^{-5} \cdot 87,66} = 35,3 > 25 \text{ лет.}$$

Второе приближение: $\sigma = 3,4$ МПа:

$$\text{при } T_1 = 60^{\circ}\text{C}: K_1 \sigma_2 = 1,5 \cdot 3,4 = 5,1 > 4,82 \text{ МПа,}$$

$$\text{при } T_2 = 70^{\circ}\text{C}: K_2 \sigma_2 = 1,3 \cdot 3,4 = 4,42 > 4,31 \text{ МПа,}$$

$$\text{при } T_3 = 90^{\circ}\text{C}: K_3 \sigma_2 = 1,0 \cdot 3,4 = 3,4 < 3,41 \text{ МПа.}$$

Подставляя значения T_i и $K_i \sigma_2$ в соответствующие уравнения, получаем

$$t_1 = 1,688 \cdot 10^5 \text{ ч, } t_2 = 0,801 \cdot 10^5 \text{ ч, } t_3 = 0,0211 \cdot 10^5 \text{ ч.}$$

Повреждаемость

$$TYD = \frac{97}{1,688 \cdot 10^5} + \frac{2,954}{0,801 \cdot 10^5} + \frac{0,046}{0,0211 \cdot 10^5} = 63,33 \cdot 10^{-5} \%/\text{ч.}$$

Срок службы

$$\tau = \frac{1}{63,33 \cdot 10^{-5} \cdot 87,66} = 18,0 < 25 \text{ лет.}$$

Третье приближение: $\sigma = 3,35$ МПа:

$$\text{при } T_1 = 60^{\circ}\text{C}: K_1 \sigma_3 = 1,5 \cdot 3,35 = 5,03 > 4,82 \text{ МПа,}$$

$$\text{при } T_2 = 75^{\circ}\text{C}: K_2 \sigma_3 = 1,3 \cdot 3,35 = 4,35 > 4,31 \text{ МПа,}$$

$$\text{при } T_3 = 100^{\circ}\text{C}: K_3 \sigma_3 = 1,0 \cdot 3,35 = 3,35 < 4,01 \text{ МПа.}$$

Получаем

$$t_1 = 2,291 \cdot 10^5 \text{ ч}, t_2 = 1,071 \cdot 10^5 \text{ ч}, t_3 = 0,113 \cdot 10^5 \text{ ч}.$$

Повреждаемость

$$TYD = \sum \frac{a_i}{t_i} = \frac{97}{2,291 \cdot 10^5} + \frac{2,954}{1,071 \cdot 10^5} + \frac{0,046}{0,113 \cdot 10^5} = 45,5 \cdot 10^{-5} \%/\text{ч}.$$

Срок службы

$$\tau = \frac{1}{45,5 \cdot 10^{-5} \cdot 87,66} = 25,07 \text{ лет} \approx 25 \text{ лет}.$$

При сроке службы 25 лет напряжение в стенке трубопровода не должно превышать 3,35 МПа.

Определенное таким образом напряжение для заданного режима эксплуатации и срока службы трубопровода является нормативным длительным сопротивлением разрушению материала R^H . В этом состоит одна из специфических особенностей подхода к определению предела прочности полимерных труб по сравнению с металлическими.

Допустимое давление в трубопроводе рассчитывается по известной формуле

$$[P] = \frac{2sR}{(D-s)},$$

которую можно представить также в виде

$$[P] = \frac{2R}{(D-s)/s} = \frac{2R}{SDR-1},$$

где R — расчетное сопротивление материала труб, МПа ($\text{кг}/\text{см}^2$); SDR — безразмерная величина, численно равная отношению номинального наружного диаметра трубы к номинальной толщине стенки

$$SDR = \frac{D}{s}.$$

В принятой в настоящее время международной классификации маркировка труб производится по сериям «S». Каждой серии S соответствует определенное SDR . Такая классификация в 2003 году введена и в России государственным стандартом ГОСТ Р 52134–2003* [2]. Между S и SDR установлено однозначное соответствие

$$SDR = 2S + 1.$$

Таким образом, мы получаем еще один вариант формулы для допустимого давления

$$[P] = \frac{R}{S}.$$

Вернемся к нашему примеру, в котором для срока службы 25 лет номинальное допускаемое напряжение составило $\sigma = 3,35$ МПа. Пусть наружный диаметр трубопровода из пропилена PP-R 80 $D = 110$ мм. Требуется определить допустимое давление. Выберем трубу 5-й серии ($S = 5$, $SDR = 11$). Имеем

$$[P] = \frac{2 \cdot 3,35}{11-1} = \frac{3,35}{5} = 0,67 \text{ МПа} = 6,7 \text{ кг}/\text{см}^2.$$

Согласно ГОСТ Р 52134–2003 получаем толщину стенки 10 мм.

Если допускаемое расчетное давление должно быть больше, чем $6,7 \text{ кг}/\text{см}^2$, нужно увеличить толщину стенки. Для серии $S = 3,2$ ($SDR = 7,4$), например, имеем

$$[P] = \frac{2 \cdot 3,25}{7,4-1} = \frac{3,25}{3,2} = 1 \text{ МПа} = 10 \text{ кг}/\text{см}^2.$$

Толщина стенки для этой серии равна $s = 15,1$ мм.

Расчетная толщина стенки трубы определяется по формуле

$$s' = \frac{PD}{2R+P} = \frac{PD}{SDR(2R+P)},$$

где R — расчетное сопротивление МПа, ($\text{кг}/\text{см}^2$), определяемое ниже; P — расчетное давление в трубопроводе, МПа, ($\text{кг}/\text{см}^2$).

Расчетное сопротивление материала труб R , МПа ($\text{кг}/\text{см}^2$) определяется по формулам:

а) для надземного трубопровода и трубопровода, проложенного в подземном канале:

$$R_1 = R^H K_y K_c,$$

где R^H — нормативное сопротивление, численно равное номинальному допускаемому напряжению σ , рассчитанному по эталонным кривым длительной прочности для заданного режима и срока службы (пример определения рассмотрен выше), МПа ($\text{кг}/\text{см}^2$); K_y — коэффициент условий работы трубопровода, принимается по табл. 3; K_c — коэффициент прочности соединения труб, принимается по табл. 4.

б) для подземного трубопровода, заземленного в грунте

$$R_2 = K_n R,$$

где K_n — коэффициент условий прокладки, принимаемый 0,8 — для трубопроводов, прокладываемых в местах, труднодоступных для рытья траншеи в случае его повреждения; 0,9 — для трубопроводов, прокладываемых под усовершенствованными покрытиями; 1,0 — для остальных трубопроводов.

Табл. 3. Коэффициент условий работы K_y

Группа транспортируемых веществ	Транспортируемые вещества	Категория трубопровода	Температура, °С	Материал		
				PE-RT	PP-R, PP-R-ST, PP-B	PVC- C тип II
А	Умеренно опасные вещества класса 3	II	20	0,6	0,6	0,6
Б	Горючие газы (ГГ), кроме сжиженных углеводородных (СУГ), Легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ), Горючие жидкости (ГЖ)	II	30	0,6	0,6	0,6
			40	0,5	0,45	0,4
		III	50	–	0,4	0,4
В	Трудногорючие (ТГ) и негорючие (НГ)	IV	60	–	0,3	0,4
		V	Независимо	1,0		

Табл. 4. Коэффициент прочности соединений труб и деталей из различных материалов

Способ соединения	K_c			Примечание
	PE-RT	PP-R, PP-R-ST, PP-B	PV-C- C тип II	
Контактная сварка встык:				
для соединения труб и соединительных деталей	1,0	1,0	–	Для литых деталей $K_c = 1$
для изготовления тройников равнопроходных прямых и сегментных отводов	0,7	0,7	–	
для изготовления тройников равнопроходных косых и неравнопроходных прямых	0,4	0,4	–	
Контактная сварка внахлест для соединения труб и соединительных деталей	1,0	1,0	–	

Коэффициенты Пуассона μ при температуре до 40°С должны приниматься равными для труб:

- из полиэтилена 0,44–0,46,
- из полипропилена 0,40–0,42,
- из поливинилхлорида 0,35–0,38.

Для труб, транспортирующих вещества с температурой свыше 40°С, величину коэффициента Пуассона допускается принимать равной 0,5.

Оценка несущей способности трубопровода осуществляется от нагрузок и воздействий в рабочем состоянии, соответствующем расчетному давлению P и расчетной температуре T , за которую обычно принимается $T_{\text{раб}}$ (максимальное значение $T_{\text{раб}}$, когда рабочих температур несколько). Для определения перемещений, нагрузок на опоры и места присоединения трубопровода к аппаратам дополнительно используется вариант нагружения в режиме гидроиспытаний.

Для надземных трубопроводов и подземных в канале несущая способность определяется условием прочности

$$\left. \begin{aligned} y_{\text{кц}} &\leq \frac{P(D-s)}{2s} = \frac{P}{2}(SDR-1) \\ \sigma_{\text{экр}} &\leq R_1 \end{aligned} \right\}$$

Для подземных трубопроводов бесканальной прокладки:

- несущая способность по условиям прочности

$$\left. \begin{aligned} y_{\text{кц}} &\leq \frac{P(D-s)}{2s} = \frac{P}{2}(SDR-1) \\ \sigma_{\text{экр}} &\leq R_2 \end{aligned} \right\}$$

для гибких трубопроводов (шлангов) второй критерий не используется;

- несущая способность по условиям жесткости — допустимой овализации поперечного сечения (укорочения вертикального диаметра)

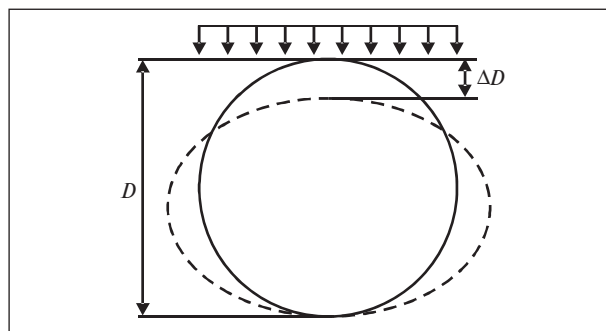


Рис. 2. Овализация трубы под действием давления грунта

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} \cdot 100\% \leq [\varepsilon].$$

Здесь $y_{\text{кц}}$ — среднее окружное напряжение от внутреннего давления в сечении трубы, МПа; y — расчетное напряжение в сечении трубы, МПа; D — номинальный наружный диаметр трубы, мм; s — номинальная толщина стенки трубы, мм; $\varepsilon = \Delta D/D$ — относительная вертикальная деформация наружного диаметра трубы (рис. 2); ΔD — вертикальное сплющивание трубы, мм; $[\varepsilon]$ — предельно допустимая овализация поперечного сечения трубы, принимаемая для труб из полиэтилена 5%, полипропилена — 4%, поливинилхлорида — 3,5%.

Дополнительно должна проверяться устойчивость круглой формы поперечного сечения для подземного трубопровода бесканальной прокладки, в том числе при возможности его всплытия в результате действия грунтовых вод и отсутствия внутреннего давления.

Расчетные значения продольных усилий, возникающих в трубопроводе при изменении температуры, без учета компенсации температурных деформаций и трения скольжения (в промежуточных опорах или при непрерывном опирании), определяются по формуле

$$N_l = \alpha \Delta T E_0 F,$$

где α — коэффициент линейного расширения, мм/мм град (для полиэтилена — $2,2 \cdot 10^{-4}$, для полипропилена — $1,5 \cdot 10^{-4}$, для поливинилхлорида — $0,8 \cdot 10^{-4}$); ΔT — расчетный температурный перепад, °C; F — площадь поперечного сечения трубы, см²; E_0 — модуль ползучести материала при растяжении, МПа (кг/см²), принимается по данным завода-изготовителя в зависимости от расчетного срока службы трубопровода и величины σ (R^H). Для полипропилена РР-Р при $R^H = 2,0$ Н/мм² данные приведены в [6].

Расчетные величины продольных перемещений определяются от максимального повышения температуры (положительный температурный перепад) и внутреннего давления, а также возможного понижения температуры до 0°С при отсутствии внутреннего давления.

При отрицательной температуре полимерные материалы становятся хрупкими, при этом наблюдается повышенная склонность к растрескиванию. Поэтому отрицательная температура монтажа при расчете на прочность должна приниматься не ниже минус 10°С.

Методы оценки прочности технологических трубопроводов из полимерных материалов включены в новую редакцию СТО ООО «НТП Трубопровод».

Литература

1. Уиллоуби Д. А. Полимерные трубы и трубопроводы. — СПб.: Профессия, 2010.
2. СН 550–82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб.
3. ГОСТ Р 52134–2003*. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия.
4. НПО «Пластик» Михимпрома СССР. Пособие по проектированию трубопроводов из пластмассовых труб (к СН 550–82). — М.: Стройиздат, 1984.
5. СП 40–102–200. Проектирование и монтаж трубопроводных систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов.
5. Бухин В. Е. Применение труб из полимерных материалов // Трубопроводы и экология. — 2007. — №3.
6. SIMONA, Engineering Manual for Piping Systems, Tech. info, 2010.

V. Y. Magalif

Plastics Process Piping Stress Analysis

The advantages of polymeric materials pipelines are the low weight and high corrosion resistance. The disadvantages are lower mechanical properties. Pipelines can be divided into hard, which work as a geometrically invariable rod system and flexible who work by the principle of flexible hose. The mechanical strength depends on service life and regime of operation. Estimated compressive strength and bending strength are determined by reference to long-term strength curves obtained from laboratory tests. Load carrying capacity is evaluated on the strength and stiffness conditions. The application range for different groups and categories of process piping is given.

Key words: process piping, plastics piping, stress analysis.