

ДВУХСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

DOUBLE-LAYER PIPELINE STRUCTURES



В. Я. Магалиф, ООО «НТП Трубопровод», г. Москва

V. Magalif, PSRE Co «NTP Truboprovod», Moscow, e-mail: magalif@truboprovod.ru

1. Трубопровод с рубашкой

Трубопровод с рубашкой представляет собой своеобразный сосуд с двойными стенками (межтрубным пространством). Область применения ограничена:

- когда перекачиваемый продукт (обычно очень вязкие жидкости) нуждается в постоянном и равномерном подогреве, который нельзя обеспечить трубопроводами – спутниками или электро подогревательными устройствами. Подогрев, как правило, осуществляется насыщенным паром. Классическое конструктивное решение приведено на рисунке 1;
- при использовании в качестве изоляционного слоя вакуума, создаваемого в межтрубном пространстве. Наиболее частое применение – при транспортировке криогенных жидкостей (например, жидкого азота).

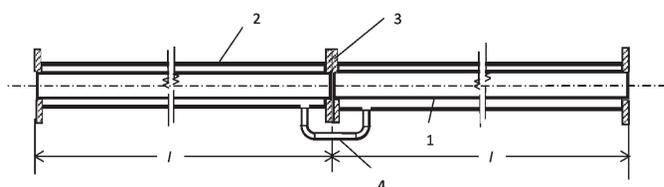


Рисунок 1 – Типовая конструктивная схема для подогрева вязких жидкостей:
1 – труба «сердечник»; 2 – труба «рубашка»; 3 – фланцевое соединение; 4 – обводная трубка

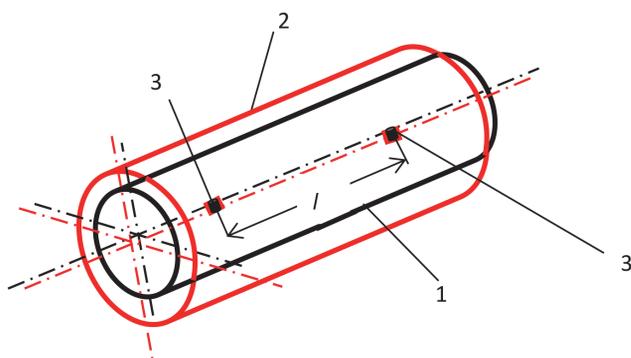


Рисунок 2 – Расчетная модель «труба в трубе»

Для расчета прочности требуется расчетная модель, позволяющая рассчитывать внутренний трубопровод «сердечник» совместно с наружным трубопроводом «рубашкой». Для этого целесообразно использовать следующий искусственный прием. Внутренняя труба вкладывается в наружную таким образом, чтобы их продольные оси были параллельны и находились на достаточно близком расстоянии друг от друга (рис. 2). Осевые линии соединяются жесткими перемычками, отстоящими на расстоянии l . Поскольку обычно используется стержневая модель, абсолютно жесткие перемычки, соединяющие оси параллельных стержней, объединяют обе трубы в единую конструкцию. Таким образом, трубопровод с рубашкой заменяется двумя трубопроводами, осевые линии которых тождественны, параллельны и незначительно смещены по отношению друг к другу. На концах каждого трубопровода ставим мертвые опоры (независимо!), а в промежуточных точках – перемычки (рис. 3).

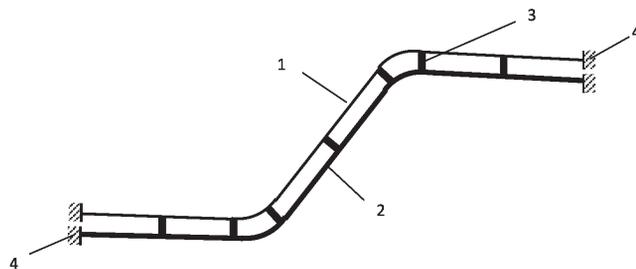


Рисунок 3 – Расчетная модель трубопровода с рубашкой:
1 – трубопровод «сердечник»; 2 – трубопровод «рубашка»; 3 – перемычка; 4 – неподвижная опора с заземлением (мертвая)

Один трубопровод рассматриваем как сердечник, а второй – как рубашку. Трубопровод – сердечник удобно расположить над трубопроводом – рубашкой, а перемычки – в вертикальной плоскости.

Внешние промежуточные опоры ставятся на трубопроводе – рубашке. Сердечник в свою очередь может опираться на рубашку с помощью внутренних промежуточных опор (рис. 4б и 4в). В первом случае задаются обычные подвижные опоры (скользящие, направляющие, жесткие подвески), во втором опоры моделируются перемычками. Каждая такая перемычка представляет

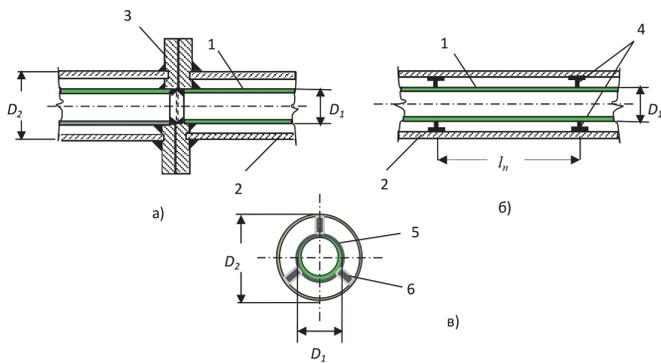


Рисунок 4 – Конструктивные элементы трубопровода с рубашкой: а – фланцевое соединение участков; б – внутреннее опирание трубы – «сердечника»; в – вариант конструкции внутренней опоры; 1 – труба сердечник, 2 – труба – рубашка, 3 – фланец, 4 – внутренняя опора, 5 – опорное кольцо, 6 – опорные лапки

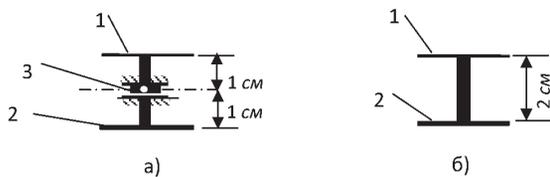


Рисунок 5 – Варианты жестких перемычек: а – перемычка со сдвиговым компенсатором; б – обычная перемычка; 1 – трубопровод – сердечник; 2 – трубопровод – рубашка; 3 – сдвиговой компенсатор (боковой ползун)

собой бесконечно жесткий стержень, в середине которого расположен сдвиговой компенсатор (боковой ползун), обеспечивающий свободу перемещений внутренней трубы вдоль ее оси (рис. 5а). Податливость сдвигового компенсатора нужно задавать бесконечно большой, например $\lambda = 99999$ мм/кгс.

Простые перемычки, соединяющие сердечник и рубашку (рис. 5б) располагаются в местах фланцевых соединений. Длина перемычек должна быть достаточно малой (например, 2 см), чтобы свести к минимуму влияние эксцентриситета продольных осей. Температурный перепад на перемычках нужно задавать равным нулю.

Бывают случаи, когда двухслойная модель относиться только к отдельным участкам трубопровода. Характерный пример приведен на рисунке 6. Криволинейные участки и участки, выделенные красным цветом, будут иметь материал, сечение и температуру сердечника, а остальные – рубашки.

При проверке продольной устойчивости конструкции рассматриваем два случая.

1. Межтрубное пространство используется для подогрева транспортируемого продукта, сердечник и рубашка находятся в тепловом равновесии. Материал сердечника – обычно нержавеющая сталь (X18H10T), а материал рубашки – углеродистая сталь (20). Хотя температура сердечника и рубашки одинакова,

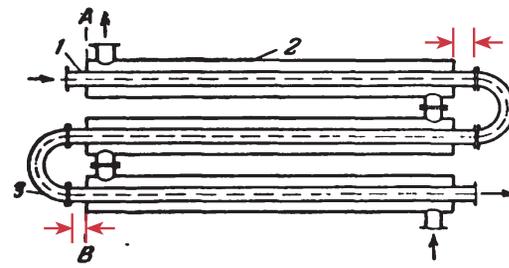


Рисунок 6 – Теплообменник с рубашкой: 1- сердечник; 2 – рубашка; 3 – отвод «калач»

материалы имеют разные коэффициенты температурного расширения, вследствие чего вероятно потеря устойчивости сердечником.

2. Межтрубное пространство используется в качестве изоляционного слоя для транспортировки криогенных продуктов. Материалы сердечника и рубашки одинаковы, но температуры существенно различаются: у сердечника отрицательная ниже -200°C , а у рубашки положительная $+20^\circ\text{C}$. В этом случае вероятно потеря устойчивости рубашкой в силу разности температур.

Полученное в результате статического расчета осевое усилие на каждом прямом участке N_{np} должно отвечать условию

$$N_{np} < (4\pi^2 EI) / l^2.$$

Здесь: l – длина участка между фланцевыми разрезами (рис.1), E – модуль упругости материала, I – момент сопротивления сечения трубы изгибу. Для сердечника E и I соответствуют сечению внутренней трубы (случай 1), а для рубашки – внешней (случай 2).

Если условие для N_{np} не выполняется, определяется расстояние между промежуточными внутренними опорами l_n (рис. 4, б), необходимое для предотвращения потери устойчивости

$$l_n = \sqrt{(\pi^2 EI) / N_{np}^2}.$$

Когда это расстояние получается меньшим, чем принятое по условиям прочности, шаг расстановки внутренних опор изменяется в меньшую сторону.

Существуют разные способы сопряжения элементов трубопроводов с рубашками. На рисунке 2а показана конструкция сопряжения с помощью приварных фланцев.

Возникающие в местах приварных фланцев напряжения вызваны неоднородностью материала трубопровода-сердечника и рубашки, изгибом этих элементов в результате компенсации температурных расширений, разностью давлений в трубном и межтрубном пространстве и др. Сумма этих напряжений должна быть сопоставлена с максимальным допустимым напряжением, при котором выполняются условия прочности в местах фланцевых разрезов. Поскольку усилия, возникающие в местах фланцевых разрезов в результате расчета трубопровода известны, для оценки прочности соединений можно использовать

- специализированные программы, основанные на методе конечных элементов,
- приближенные методы, приведенные в ГОСТ Р 52857.8 – 2007 на сосуды с рубашками [1].

2. Трубопровод, футерованный фторопластом

Фторопласт в силу своей химической стойкости и термостойкости позволяет исключить коррозионные процессы в условиях агрессивных сред, в том числе при высоких температурах и давлениях. Изложение методики проведем на конкретном примере – стального трубопровода, футерованного фторопластом.

При моделировании используем следующий подход: двухслойная конструкция заменяется однослойной: стальной трубой, обладающей эквивалентной жесткостью при работе на изгиб и кручение. Данные для проведения расчета сведены в таблицу. В дальнейшем индекс $i = 1$ будет использоваться для обозначения механических характеристик трубы и $i = 2$ футеровки.

Исходные данные

Элемент конструкции	Материал	$D_1 \times s_1$, мм	Коэффициент линейного расширения α_1 , см/см °С	Модуль упругости E_1 , кгс/см ²	Момент инерции I_1 , см ⁴
Труба	сталь 20	426 × 6	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^6$	$1,745 \cdot 10^4$
Футеровка	фторопласт Ф4кК20	414 × 5,5	$12,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,532 \cdot 10^4$

Будем проводить расчет для эквивалентного трубопровода из стали, диаметр которого соответствует трубе. Для этого надо ввести поправку в момент инерции поперечного сечения, который увеличивается за счет жесткости футеровки:

$$I' = I_1 (E_2/E_1) = 1,745 \cdot 10^4 ((1,2 \cdot 10^4)/(2,1 \cdot 10^6)) = 0,9971 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

Полный эквивалентный момент инерции:

$$I_1^{\text{экв}} = I_2 + I' = (1,5320 + 0,9971) \cdot 10^4 = 2,5291 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

При $S_{\text{экв}} = 6$ мм определяем диаметр срединной поверхности эквивалентного трубопровода:

$$D_1^{\text{сп}} = \sqrt[3]{(8 I_1^{\text{экв}} / \pi \cdot S_{\text{экв}})} = \sqrt[3]{(8 \cdot 25291 / 3,14 \cdot 0,6)} = 47,53 \text{ см} \cong 475 \text{ мм}.$$

Таким образом, нужно выполнить расчет эквивалентного с точки зрения жесткости на изгиб и кручение трубопровода из стали с наружным диаметром $D_1^{\text{экв}} = 475 + 6 = 481$ мм и толщиной стенки 6 мм. Материал трубопровода сталь 20 с коэффициентом линейного расширения $1,2 \cdot 10^{-5}$. Вес трубопровода состоит из веса трубы 426 × 6 с изоляцией, веса продукта и футеровки. В результате расчета определяются усилия по концам всех расчетных участков, нагрузки на опоры, перемещения, а также усилия, возникающие в местах фланцевых соединений.

Оценку прочности фланцевых соединений см. выше.



Рисунок 6 –
Футерованные трубы

3. Заключение

Приведены расчетные модели двухслойных конструкций трубопроводов: с рубашкой и футеровкой (на примере фторопластом). Для проведения расчетов с их использованием рекомендуется программа Старт-Проф [2].

Москва, март 2025 года

Список литературы:

1. ГОСТ Р 52857.8 – 2007. Сосуды и аппараты, Нормы и методы расчета на прочность, Сосуды и аппараты с рубашками, Стандартиформ, М. 2008.
2. Руководство пользователя программы Старт-Проф, 4.87 R2, ООО «НТП Трубопровод», 2025.