Создание алгоритма расчета армированных металлополимерных труб на прочность с использованием эквивалентной двухслойной модели

Докладчик: Синюгин Александр Александрович, к.т.н.,
Главный инженер проекта, ООО «ИТ-Сервис»

Аннотация

Аварии на промысловых трубопроводах являются острой проблемой нефтедобывающей отрасли. Значительная часть таких аварий вызвана коррозией металла трубопроводов, причем современные мероприятия, нацеленные на защиту трубопроводов от коррозии, не являются эффективными в полном объеме и не обеспечивают полную защиту трубопроводов от коррозии.

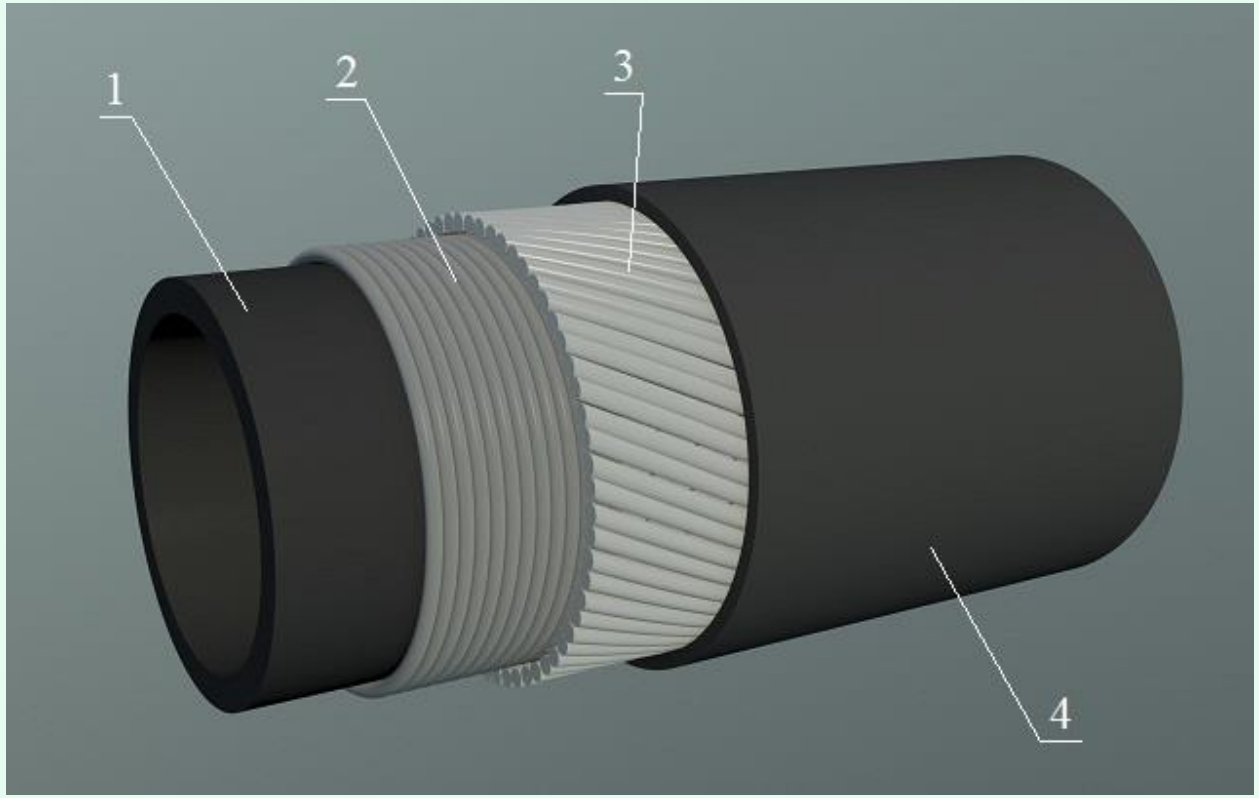
Применение армированных металлополимерных трубопроводов (АМПТ) в качестве основного элемента систем сбора нефти на промысле позволяет исключить риск возникновения коррозионных дефектов. Однако, к оценке прочности АМПТ неприменимы формулы, применяемые для расчета стальных трубопроводов (тонкостенных цилиндров).

Представленные в научной и технической литературы методики расчета на прочность АМПТ являются формулами, где главными критериями прочности гибкой трубы являются шаг спирали стального каркаса, его толщина и механические характеристики. При этом используемая формула расчета осевых напряжений была выведена для бурильных гибких труб, конструктивно отличающихся от ряда АМПТ, и ее применение ко всем разновидностям АМПТ некорректно.

Следовательно, создание новых методик расчета АМПТ является актуальной научно-технической задачей.

Обзор видов АМПТ, используемых в нефтяной промышленности

Армированная металлополимерная труба в нефтяной промышленности является сложным по конструкции изделием, содержащим от 2 до 10 и более слоев. Конструкция трубы и применяемые материалы влияют на эксплуатационные параметры трубопровода, тип разъемных соединений и конструкцию входных фланцев, а также состав вспомогательного оборудования.

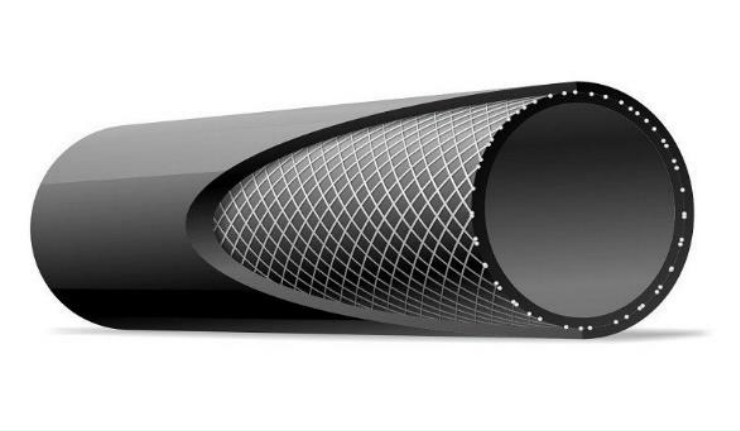


1 – внутренняя герметизирующая камера, 2 – повивы на восприятие радиальных нагрузок,
3 – грузонесущие элементы, 4 – внешняя герметизирующая камера

Некоторые модели АМПТ, используемые в нефтяной промышленности



Промысловые АМПТ производства ООО «Псковгеокабель» (сверху) и ООО «Технология композитов (внизу)





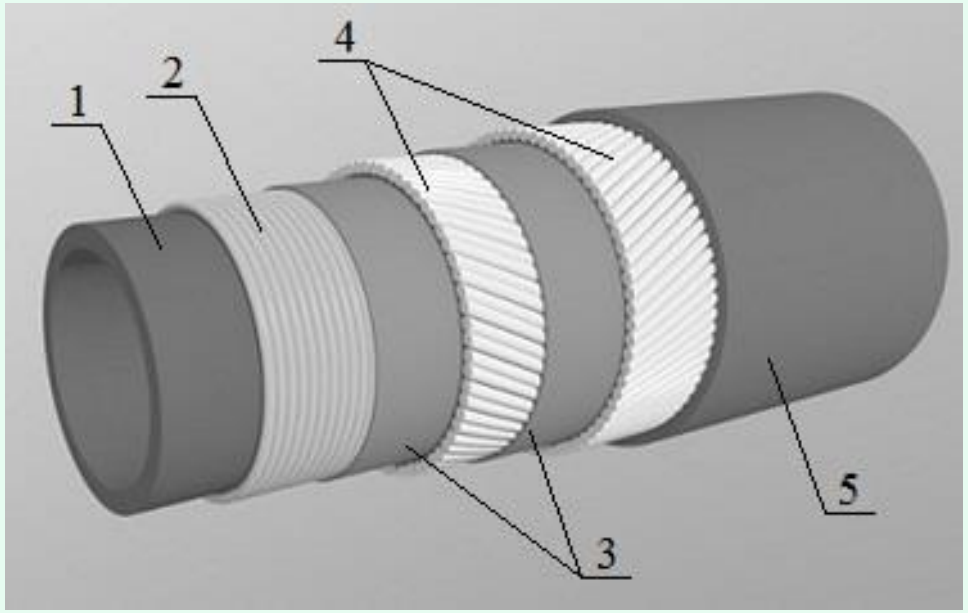
АМПТ буровой рукав



АМПТ систем дозировочных систем (сверху) и морской райзер (внизу)



Краткая характеристика объекта исследования



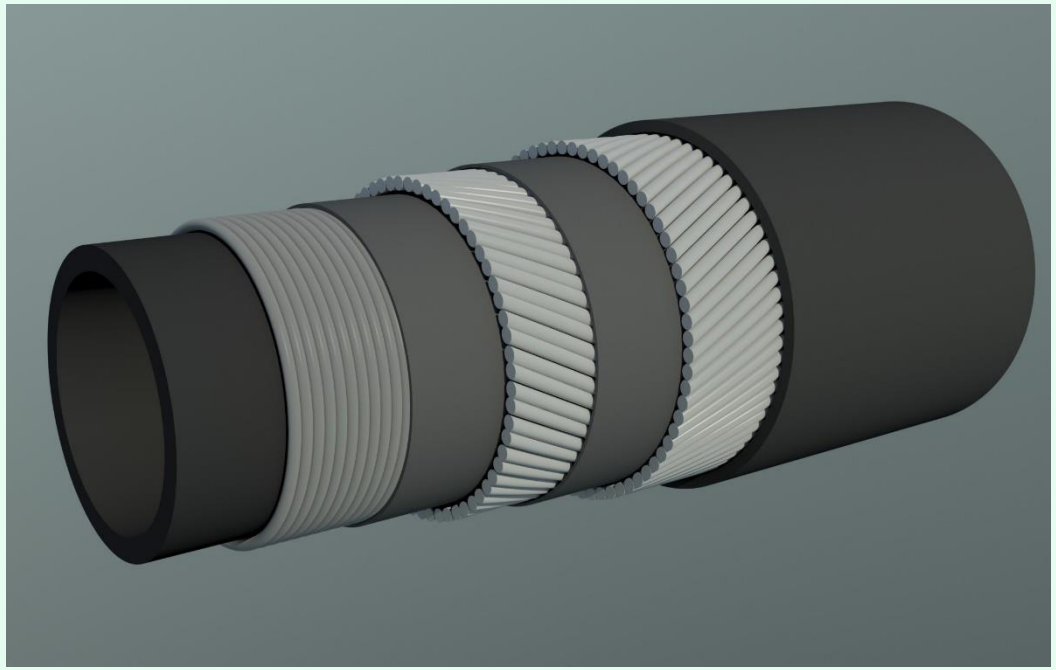
1 – внутренняя полиэтиленовая камера, 2 – проволочный стальной каркас, 3 – герметизирующие слои из ПВХ, 4 – грузонесущие повивы из ПП шпагата, 5 – внешняя полиэтиленовая камера

Существующие расчетные методики ГПМТ

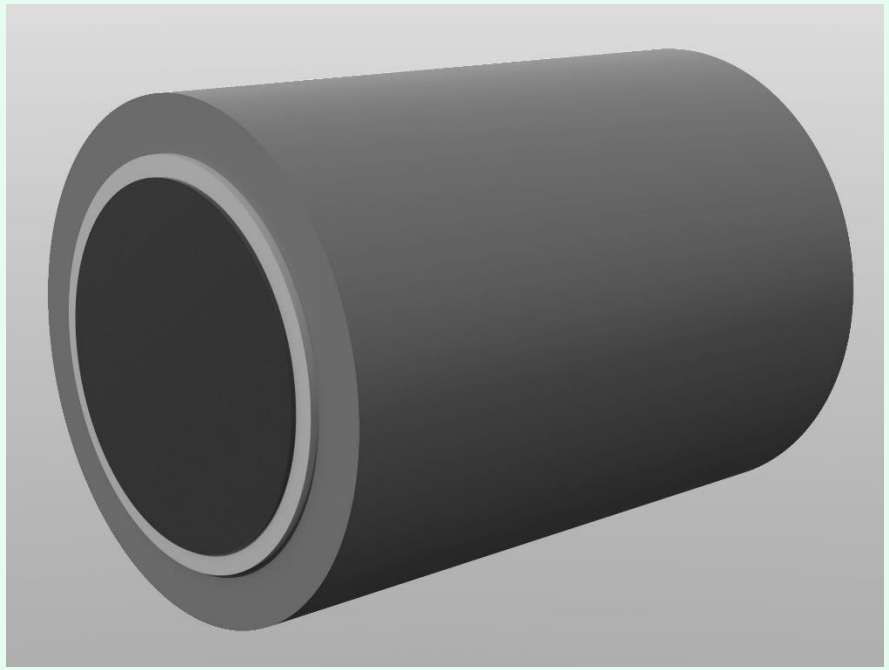
Внутр. крит. давление (рад. составляющая): $P_{\text{вн.кр}} = \frac{2К}{t_{\text{ш}} \times d_{tk}} = \frac{0{,}5\pi \times d^2 \times \sigma}{t \times d_{tk}}$ $E_{\text{оболочек}} \ll E_{\text{груз}}$

Внутр. крит. давление (осевая составляющая): $P_{\text{вн.кр}} = \frac{4T_{\text{разр}}}{\pi(d_{\text{внеш}} - t_{\text{ГПМТ}})^2}$ $E_{\text{оболочек}} \sim E_{\text{груз}}$

Описание двухслойной эквивалентной модели



Общий вид АМПТ



Общий вид двухслойной эквивалентной модели

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{P \times d}{2t} \qquad \sigma_{\text{пр}} = \frac{P \times d}{4t}$$

Описание геометрических характеристик, а также механических свойств двухслойной эквивалентной модели

Наименование слоя	Номинальный диаметр, мм		
	50	75	100
Внутренний диаметр	51,4	73,6	90
Внутренняя камера из ПНД	5,8	8,2	10
Стальной спиральный проволочный каркас		3	
Слой из ленты ПВХ (первый)		0,8	
Первый (правый) слой грузонесущих повивов из ПП		4	
Слой из ленты ПВХ (второй)		0,8	
Второй (левый) слой грузонесущих повивов из ПП		4	
Внешний слой из ПВД		3	

Толщины слоев ГПМТ

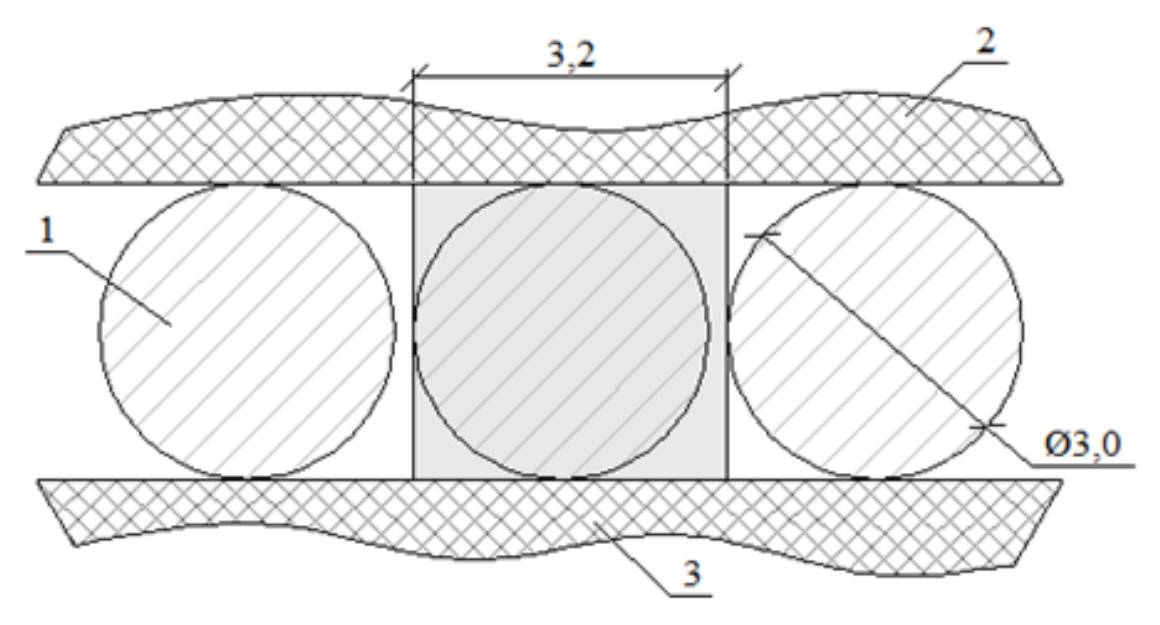
Наименование слоя	Номинальный диаметр, мм		
	50	75	100
Внутренний диаметр	63	90	110
Внутренний слой		3	
Внешний слой		8	

Толщины слоев эквивалентных моделей

$$\begin{cases} \sigma_{\text{в рад}} = a \times \sigma_{\text{в каркас}} \\ \sigma_{\text{т рад}} = a \times \sigma_{\text{т каркас}} \\ E_{\text{рад}} = a \times E_{\text{каркас}} \\ \sigma_{\text{в ос}} = 0 \\ \sigma_{\text{т ос}} = 0 \\ E_{\text{ос}} = 0 \\ 0 < a < 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma'_{\text{в рад}} = 0 \\ \sigma'_{\text{т рад}} = 0 \\ E'_{\text{рад}} = 0 \\ \sigma'_{\text{в ос}} = b \times \sigma_{\text{в груз}} \\ \sigma'_{\text{т ос}} = b \times \sigma_{\text{т груз}} \\ E'_{\text{ос}} = b \times E_{\text{груз}} \\ 0 < b < 1 \end{cases}$$

Метод заполненного периметра



$$a_1 = \frac{S_{\text{пров}}}{S_{\text{кластера}}} = 0{,}74$$

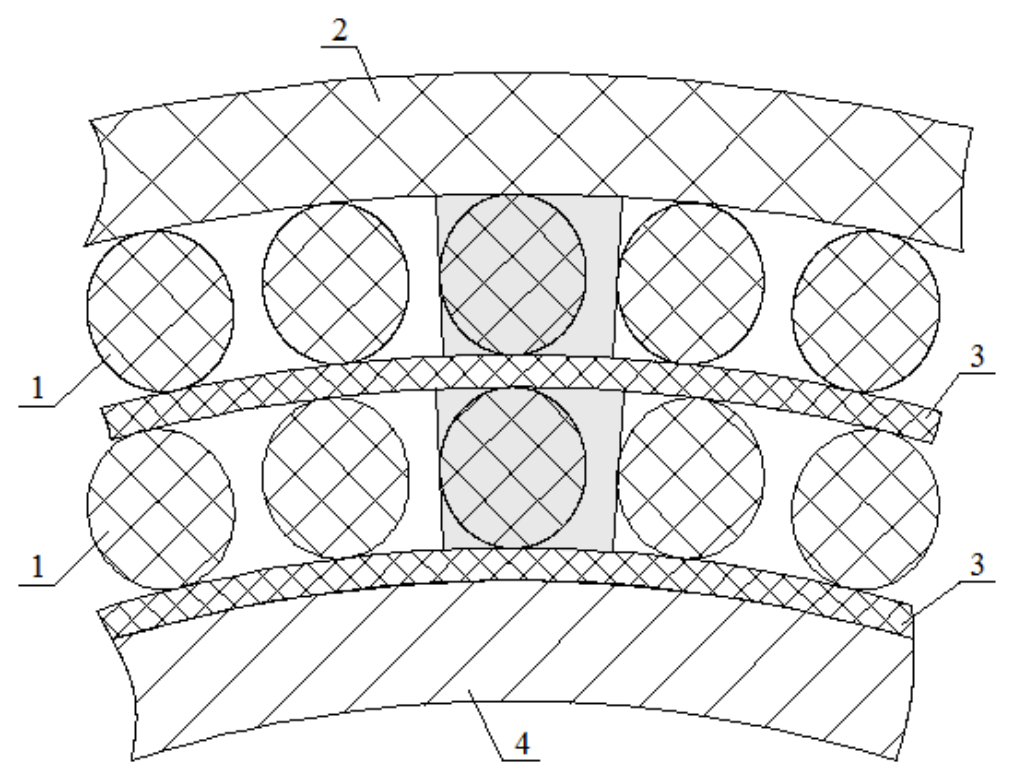
$$\sigma_{\text{в рад}} = a_1 \times \sigma_{\text{в каркас}} = 0{,}74\sigma_{\text{в каркас}}$$

$$\sigma_{\text{т рад}} = a_1 \times \sigma_{\text{т каркас}} = 0{,}74\sigma_{\text{т каркас}}$$

$$a_2 = 0{,}9 - 1{,}25D_{\text{вн}}\ (0{,}73 \ldots 0{,}8)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\text{в рад}} = 0{,}74\ \sigma_{\text{в каркас}} \\ \sigma_{\text{т рад}} = 0{,}74\ \sigma_{\text{т каркас}} \\ E_{\text{рад}} = 0{,}74\ E_{\text{каркас}} \\ \sigma_{\text{в ос}} = 0 \\ \sigma_{\text{т ос}} = 0 \\ E_{\text{ос}} = 0 \end{cases}$$

Применение метода заполненного периметра к поперечному сечению ГПМТ



$$b = \frac{S_{\text{проекции шпагата}}}{S_{\text{кластера}}} = 0{,}65$$

$$\sigma'_{\text{в ос}} = b \times \sigma_{\text{в ПП}} = 0{,}65\sigma_{\text{в ПП}}$$

$$\sigma'_{\text{т ос}} = b \times \sigma_{\text{т ПП}} = 0{,}65\sigma_{\text{т ПП}}$$

$$E_{\text{оболочек}} \ll E_{\text{груз}}$$

$$E_{\text{оболочек}} \sim E_{\text{груз}}$$

$$E_{\text{оболочек}} \sim E_{\text{груз}}$$

$$\sigma_{\text{в оболочек}} \sim \sigma_{\text{в груз}}$$

Влияние внутренней камеры на осевую прочность ГПМТ

DN	Грузонесущие ПП повивы		Камера ПНД		Сумма, кН
	Усилие разрыва, кН	Доля от общего, %	Усилие разрыва, кН	Доля от общего, %	
50	94,74	79,8	24,03	20,2	118,77
75	127,31	72,4	48,61	27,6	175,92
100	151,44	67,7	72,43	32,3	223,87

DN	$S_{внеш\ экв}$, мм^2	$\sigma'_{в\ ос}$, МПа
50	1936	61,35
75	2614	67,30
100	3109	72,01

$$\sigma'_{в\ ос} = \frac{b \times \sigma_{в\ ПП} \times S_{груз} + \sigma_{в\ ПНД} \times S_{кам}}{S_{вн\ экв\ слой}}$$

$$\sigma'_{в\ ос} = \frac{\sigma_1 \times S_1 + \sigma_2 \times S_2 + \ldots + \sigma_n \times S_n}{S_{экв}}$$

$$\sigma'_{в\ ос} \sim \sigma'_{т\ ос} \qquad E'_{ос} = E_{ПП}$$

$$\begin{cases} \sigma'_{в\ рад} = 0 \\ \sigma'_{т\ рад} = 0 \\ E'_{рад} = 0 \\ \sigma'_{в\ ос} = \dfrac{0{,}65\sigma_{в\ ПП} \times S_{груз} + \sigma_{в\ ПНД} \times S_{кам}}{S_{вн\ экв\ слой}} \\ \sigma'_{т\ ос} \sim \sigma'_{в\ ос} \\ E'_{ос} = E_{ПП} \end{cases}$$

Основные положения прочностного расчета ГПМТ

$$\begin{cases} \sigma_{\text{в рад}} = 0{,}74\ \sigma_{\text{в каркас}} \\ \sigma_{\text{т рад}} = 0{,}74\ \sigma_{\text{т каркас}} \\ E_{\text{рад}} = 0{,}74\ E_{\text{каркас}} \\ \sigma_{\text{в ос}} = 0 \\ \sigma_{\text{т ос}} = 0 \\ E_{\text{ос}} = 0 \end{cases}$$

Система, определяющая механические свойства внутреннего слоя двухслойной эквивалентной модели

$$\begin{cases} \sigma'_{\text{в рад}} = 0 \\ \sigma'_{\text{т рад}} = 0 \\ E'_{\text{рад}} = 0 \\ \sigma'_{\text{в ос}} = \dfrac{0{,}65\sigma_{\text{в ПП}} \times S_{\text{груз}} + \sigma_{\text{в ПНД}} \times S_{\text{кам}}}{S_{\text{вн экв слой}}} \\ \sigma'_{\text{т ос}} \sim \sigma'_{\text{в ос}} \\ E'_{\text{ос}} = E_{\text{ПП}} \end{cases}$$

Система, определяющая механические свойства внешнего слоя двухслойной эквивалентной модели

Формулы для проведения прочностного расчета ГПМТ по уравнениям Лапласа с использованием эквивалентной модели

$$P_{\text{кр}} = \frac{2t \times \sigma_{\text{в рад}}}{d_{\text{н1}}} \qquad P_{\text{кр}} = \frac{4t \times \sigma'_{\text{в ос}}}{d_{\text{вн2}}} \qquad P_{\text{кр}} = \frac{2t \times \sigma_{\text{в рад}}}{nd_{\text{н1}}}$$

Формулы для проведения прочностного расчета ГПМТ по существующим методикам

$$P_{\text{кр}} = \frac{2\text{К}}{t_{\text{ш}} \times d_{tk}} \qquad P_{\text{кр}} = \frac{4T_{\text{разр}}}{\pi(d_{\text{внеш}} - t_{\text{ГПМТ}})^2}$$

Исходные данные для прочностного расчета ГПМТ и их результаты

ИД для расчета внутреннего слоя эквивалентной оболочки

Исходный параметр	Номинальный диаметр ГПМТ, мм		
	50	75	100
Толщина внутреннего слоя экв. модели t, мм	3		
$\sigma_{в\ рад}$, МПа	725		
$d_{н1}$, мм	69	96	116

ИД для расчета внешнего слоя эквивалентной оболочки

Исходный параметр	Номинальный диаметр ГПМТ, мм		
	50	75	100
Толщина внешнего слоя экв. модели t, мм	8		
$\sigma'_{в\ ос}$, МПа	61,4	67,3	72,0
$d_{н2}$, мм	69	96	116

ИД для расчета ГПМТ как армированной оболочки со спиральным каркасом

Исходный параметр	Номинальный диаметр ГПМТ, мм		
	50	75	100
Крепость элементов каркаса, К, кН	6,92		
Шаг навивки спирали, $t_ш$, мм	3,2		
d_{tk}, мм	63	90	110

ИД для расчета внутреннего критического давления ГПМТ по традиционной методике

Исходный параметр	Номинальный диаметр ГПМТ, мм		
	50	75	100
$T_{разр}$, кН	114,0	153,9	182,6
$d_{внеш}$, мм	94,2	121,2	141,2
$t_{ГПМТ}$, мм	21,4	23,8	25,6

Расчетные значения критического внутреннего давления $P_{кр}$ для спирального проволочного каркаса и внутреннего слоя экв. модели

Номинальный диаметр DN, мм	Расчетное критическое давление, МПа		
	Спиральный проволочный каркас	Внутренний слой экв. модели	Внутренний слой экв. модели с коэфф. n
50	68,7	63,0	54,8
75	48,1	45,3	39,4
100	39,3	37,5	32,6

Расчетные значения критического внутреннего давления $P_{кр}$ осевой составляющей по традиционной методике и внешнему слою экв. модели

Номинальный диаметр DN, мм	Расчетное критическое давление, МПа	
	Традиционная методика	Внешний слой экв. модели
50	27,4	28,5
75	20,7	22,4
100	17,4	19,9

Алгоритм расчета АМПТ на прочность с использованием эквивалентной двухслойной модели

1. Определение основных несущих слоев нефтегазовой АМПТ, воспринимающих радиальную и осевую растягивающую нагрузки, их геометрических параметров (толщины, диаметра, угла навивки) и материального исполнения;

2. Выбор геометрических параметров (толщины, диаметра) слоев эквивалентной двухслойной модели, определение характера нагрузок, воспринимаемых слоями эквивалентной модели;

3. Определение механических свойств слоев эквивалентной модели исходя из геометрических параметров и механических свойств несущих слоев нефтегазовой АМПТ;

4. Расчет АМПТ на прочность с использованием полученной эквивалентной модели по методикам расчета тонкостенных цилиндров по уравнениям Лапласа.

Общий вид систем уравнений, описывающих прочность слоев эквивалентной модели

$$\begin{cases} \sigma_{\text{в рад}} = \dfrac{a_1 \times \sigma_{\text{в каркас 1}} \times t_{\text{каркас 1}} + a_2 \times \sigma_{\text{в каркас 2}} \times t_{\text{каркас 1}} + \ldots + a_n \times \sigma_{\text{в каркас } n} \times t_{\text{каркас } n}}{t_{\text{экв внутр}}} \\ \sigma_{\text{т рад}} = \dfrac{a_1 \times \sigma_{\text{т каркас 1}} \times t_{\text{каркас 1}} + a_2 \times \sigma_{\text{т каркас 2}} \times t_{\text{каркас 1}} + \ldots + a_n \times \sigma_{\text{т каркас } n} \times t_{\text{каркас } n}}{t_{\text{экв внутр}}} \\ E_{\text{рад}} = a_{\text{макс}} \times E_{\text{каркас макс}} \\ \sigma_{\text{в ос}} = 0 \\ \sigma_{\text{т ос}} = 0 \\ E_{\text{ос}} = 0 \end{cases}$$

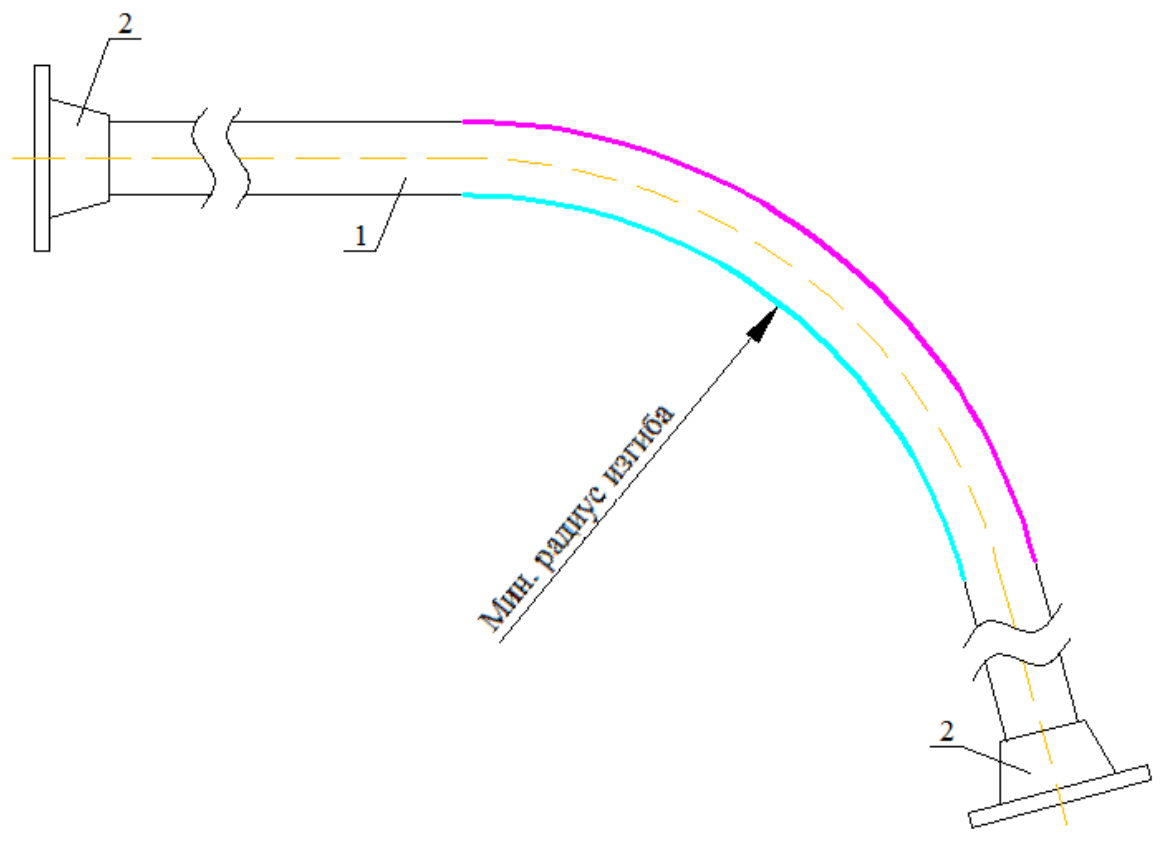
$$\begin{cases} \sigma'_{\text{в рад}} = 0 \\ \sigma'_{\text{т рад}} = 0 \\ E'_{\text{рад}} = 0 \\ \sigma'_{\text{в ос}} = \dfrac{b_1 \times \sigma_{\text{в груз 1}} \times S_{\text{груз 1}} + b_2 \times \sigma_{\text{в груз 2}} \times S_{\text{груз 2}} + \ldots + b_n \times \sigma_{\text{в груз } n} \times S_{\text{груз } n}}{S_{\text{экв внеш}}} \\ \sigma'_{\text{т ос}} = \dfrac{b_1 \times \sigma_{\text{т груз 1}} \times S_{\text{груз 1}} + b_2 \times \sigma_{\text{т груз 2}} \times S_{\text{груз 2}} + \ldots + b_n \times \sigma_{\text{т груз } n} \times S_{\text{груз } n}}{S_{\text{экв внеш}}} \\ E'_{\text{ос}} = b_{\text{макс}} \times E_{\text{груз макс}} \end{cases}$$

Основные выводы

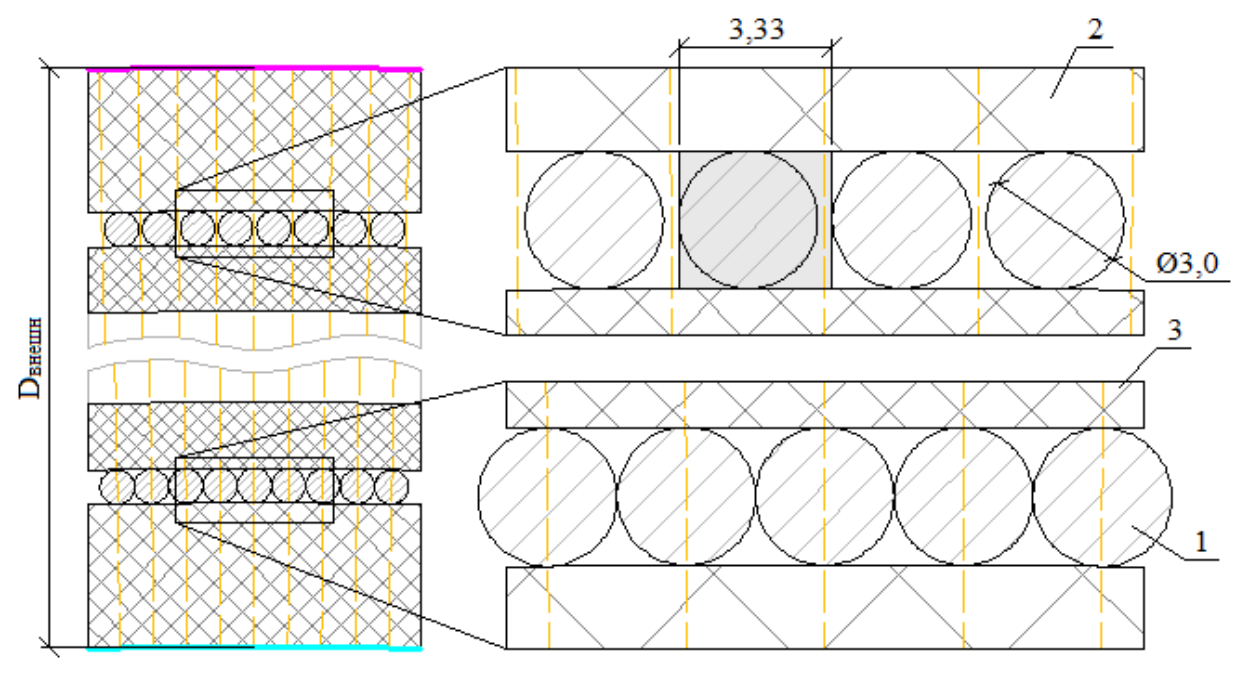
1. По итогам анализа условий эксплуатации, конструктивных особенностей, материального исполнения слоев и механических свойств используемых материалов сформулирована и предложена эквивалентная двухслойная модель для прочностного расчета применяемых в нефтегазовой промышленности АМПТ. Для каждого из слоев модели были обоснованы диаметр, толщина, ортотропный характер механических свойств и определены системы уравнений, описывающих условия выражения механических свойств по осям. На основании результатов лабораторных экспериментов, аналитических исследований и решения задач методом конечных элементов были определены численные значения механических свойств слоев эквивалентной модели для одного из частных случаев АМПТ (гибкой полимерно-металлической трубы ГПМТ);
2. Благодаря полученным значениям механических характеристик ортотропных слоев проведен прочностной расчет частного случая АМПТ по уравнению Лапласа для расчета тонкостенных цилиндров на прочность с использованием эквивалентной двухслойной модели. Результаты расчетов сравнивались с традиционными методиками расчета АМПТ и паспортными значениями, при этом максимальное расхождение при этом составило 4…14,3% в зависимости от DN и типа расчета;
3. Представлен общий алгоритм проведения прочностного расчета по внутреннему давлению для АМПТ любой конструкции. Алгоритм включает в себя методику расчета АМПТ с представлением ее в виде эквивалентной двухслойной модели в зависимости от количества слоев, их материального исполнения и конструктивных особенностей. Использование алгоритма позволяет упростить расчет многослойных армированных труб, шлангокабелей и буровых рукавов.

Спасибо за внимание

Приложение 1

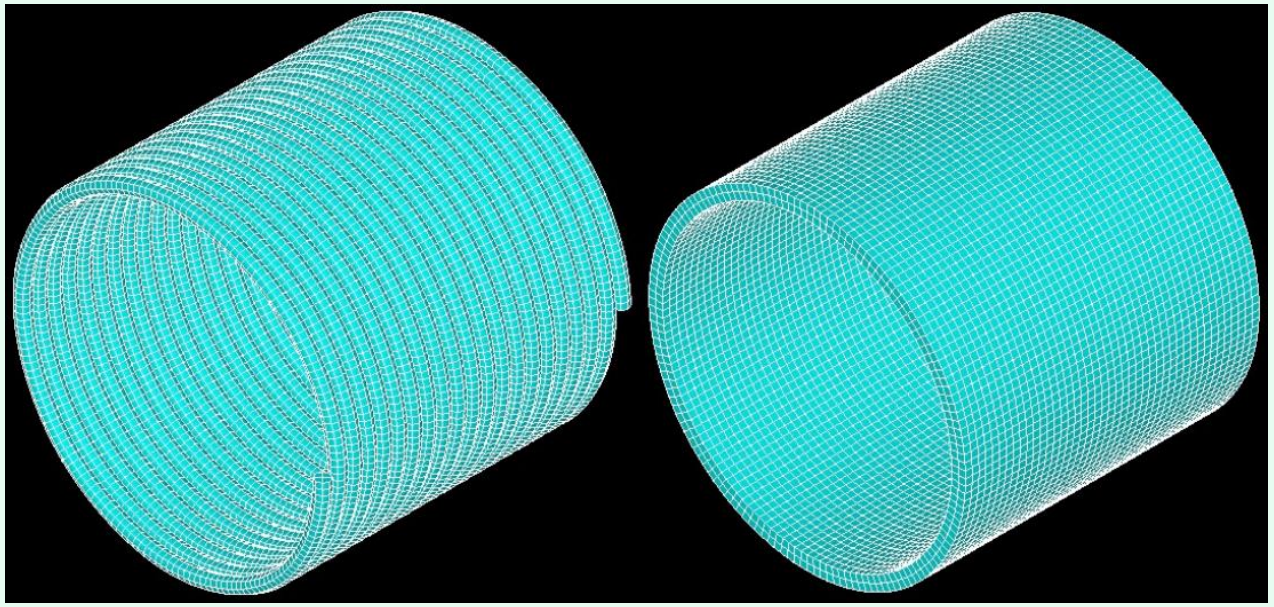


Общий вид участка изгиба

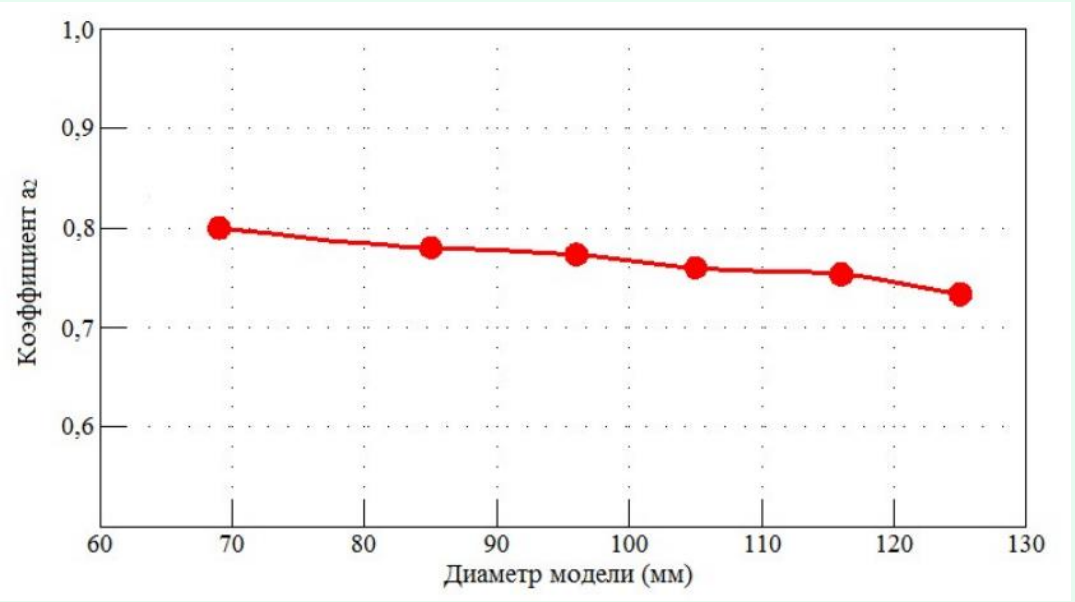


Фрагмент продольного сечения изогнутого участка ГПМТ

Приложение 2



Общий вид спиральной и цилиндрической моделей



Зависимость значения коэфф. a_2 от диаметра модели