

УДК 539.3:621.643.3

**А.А. Синюгин<sup>1</sup>**, e-mail: alexsinugin@gmail.com; **С.Б. Кобылин<sup>1</sup>**, e-mail: mahp@inbox.ru;

**В.Б. Опарин<sup>1</sup>**, e-mail: oparin\_v\_b@mail.ru

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (Самара, Россия).

## Алгоритм расчета армированных металлополимерных труб на прочность с использованием эквивалентной двухслойной модели

Все более широкое применение в нефтегазовой промышленности находят многослойные металлополимерные трубы, используемые в качестве элементов трубопроводов транспортных систем углеводородов и пластовой воды, морских райзеров, бурильных труб и рукавов и т. д. Рост популярности многослойных металлополимерных труб объясняется тем, что они сохраняют основные преимущества как металлических трубопроводов (прочность), так и полимерных труб (гибкость, отсутствие влияния коррозии, технологичность). В зависимости от назначения и производителя металлополимерные трубы могут значительно различаться конструктивно, к примеру иметь разное количество и материальное исполнение слоев, их толщину и т. д. Прочностные расчеты таких конструкций не унифицированы, а рекомендации по проведению данных расчетов, как правило, даются для отдельных типов нефтяных металлополимерных труб, выпускаемых конкретным производителем.

В статье представлен унифицированный алгоритм прочностного расчета многослойных армированных металлополимерных труб вне зависимости от их назначения, конструкции и материального исполнения. Алгоритм базируется на ранее предложенной авторами эквивалентной двухслойной математической модели, представляющей собой двухслойный тонкостенный цилиндр с ортотропными механическими свойствами слоев, причем внутренний слой воспринимает радиальную составляющую нагрузки, а внешний – осевую. Даны рекомендации по практическому применению алгоритма для расчета прочности многослойных труб различной конструкции, т. е. по выводу механических свойств ортотропных слоев эквивалентной математической модели исходя из количества, материального исполнения и конструктивных особенностей многослойных армированных металлополимерных труб. Предложены системы уравнений, позволяющие рассматривать многослойный металлополимерный трубопровод любой конструкции как двухслойную эквивалентную модель.

**Ключевые слова:** армированная металлополимерная труба, гибкая труба, многослойная армированная труба, прочностной расчет, внутреннее давление, эквивалентная модель.

.....

**А.А. Sinyugin<sup>1</sup>**, e-mail: alexsinugin@gmail.com; **S.B. Konygin<sup>1</sup>**, e-mail: mahp@inbox.ru;

**V.B. Oparin<sup>1</sup>**, e-mail: oparin\_v\_b@mail.ru

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Samara State Technical University” (Samara, Russia).

## Algorithm for Strength Calculation of Reinforced Metal-Polymer Pipes Using an Equivalent Two-Layer Model

Multilayer metal-polymer pipes are increasingly used in the oil and gas industry as elements of pipelines for transport systems of hydrocarbons and produced water, offshore risers, drill pipes and sleeves, etc. The growing popularity of multilayer metal-polymer pipes is explained by the fact that they retain the main advantages of both metal pipelines (strength) and polymer pipes (flexibility, lack of corrosion, manufacturability). Depending on the purpose and manufacturer, metal-polymer pipes can differ significantly structurally, for example, have a different number and material execution of layers, their thickness, etc. The strength calculations of such structures are not unified, and recommendations for carrying out these calculations are usually given for individual types of petroleum metal-polymer pipes produced by a specific manufacturer. The article presents a unified algorithm for the strength calculation of multilayer reinforced metal-polymer pipes, regardless of their purpose, design and material performance. The algorithm is based on the previously proposed by the authors an equivalent two-layer mathematical model, which is a two-layer thin-walled cylinder with orthotropic

mechanical properties of the layers, with the inner layer taking the radial component of the load, and the outer layer – the axial one. Recommendations are given for the practical application of the algorithm for calculating the strength of multilayer pipes of various designs, i. e., for deriving the mechanical properties of orthotropic layers of an equivalent mathematical model based on the number, material design and constructional features of multilayer reinforced metal-polymer pipes. Systems of equations are proposed that allow considering a multilayer metal-polymer pipeline of any design as a two-layer equivalent model.

**Keywords:** reinforced metal-polymer pipe, multilayer metal-polymer pipe, flexible pipe, strength calculation, equivalent model, internal pressure.

Полимерные материалы находят все более широкое применение в нефтегазовой отрасли. Они используются, в частности, при конструировании агрегатов, машин, их отдельных узлов, а также как внешние (антикоррозионные, диэлектрические и т. д.) и внутренние (антикоррозионные, антифрикционные и т. д.) покрытия трубопроводов различного назначения.

К числу наиболее распространенных вариантов использования полимеров

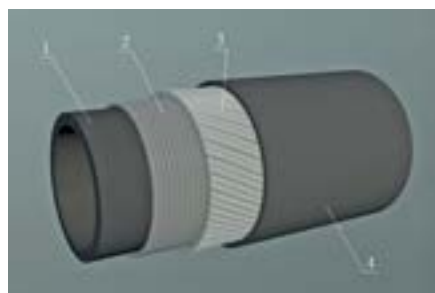


Рис. 1. Основные конструктивные элементы армированной металлополимерной трубы: 1 – внутренняя герметизирующая камера (полимеры); 2 – элементы для восприятия радиальных нагрузок (стальная проволока, металлокорд, стекловолокно, полимеры); 3 – элементы для восприятия осевых нагрузок (стальная проволока, металлокорд, стекловолокно, полимеры); 4 – внешняя герметизирующая камера (полимеры)

Fig. 1. The main structural elements of a reinforced metal-polymer pipe: 1 – internal sealing chamber (polymers); 2 – elements for the perception of radial loads (steel wire, metal cord, fiberglass, polymers); 3 – elements for the perception of axial loads (steel wire, steel cord, fiberglass, polymers); 4 – external sealing chamber (polymers)

относятся трубопроводные системы различного назначения. По сравнению со стальными трубопроводами, отличающимися прочностью и широким спектром возможных рабочих температур, но склонными к коррозии, в т. ч. внутренней, и требующими применения относительно сложных технологий при строительстве, полимерные трубопроводы проще в монтаже, не подвержены коррозии, однако их применение сильно ограничено из-за недостаточной прочности и сравнительно небольшого диапазона рабочих температур.

Одним из компромиссных решений являются армированные металлополимерные трубопроводы (АМПТ), сочетающие плюсы стальных и полимерных труб. АМПТ прочны (рабочее давление может составлять 20 и более МПа в зависимости от конструкции), практически не подвержены коррозии (внутренний и внешний слои АМПТ изготавливаются, как правило, из полимерных материалов), технологичны при монтаже (АМПТ изготавливаются бухтами, длина трубопровода в одной бухте составляет 40–300 м в зависимости от диаметра трубы) и отличаются гибкостью (при подземной прокладке не требуется применение отводов, поскольку радиус изгиба АМПТ, обеспечивающий сохранение прочности конструкции, составляет несколько метров).

В мировой практике АМПТ в основном используются в качестве трубопроводов систем сбора на нефтяных месторождениях, в т. ч. шельфовых, морских райзеров, колтюбинговых труб, буровых рукавов и т. д. Общий вид АМПТ представлен на рис. 1.

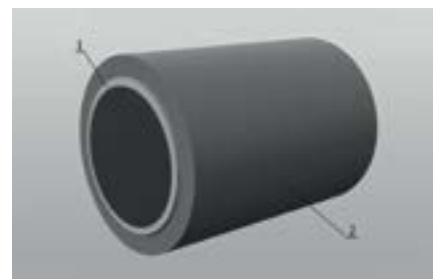


Рис. 2. Общий вид эквивалентной двухслойной модели армированной металлополимерной трубы:

1 – внутренний слой эквивалентной модели (восприятие радиальных нагрузок от внутреннего давления); 2 – внешний слой эквивалентной модели (восприятие осевых нагрузок от внутреннего давления)

Fig. 2. General view of an equivalent two-layer model of a reinforced metal-polymer pipe: 1 – inner layer of the equivalent model (perception of radial loads from internal pressure); 2 – external layer of the equivalent model (perception of axial loads from internal pressure)

Вопросами исследования напряженно-деформированного состояния АМПТ и их прочностными расчетами в разное время занимались исследователи из Норвегии [1, 2], Дании [3, 4], Бразилии, Китая [2, 5, 6] и других стран. В России проблему изучали в Перми [7–9], Самаре [10], Уфе [11] и ряде других научных центров. При этом подавляющее большинство публикаций посвящено либо решению определенной проблемы, либо описанию конкретной конструкции АМПТ различного назначения. Авторами данной статьи для прочностного расчета гибкой полимерно-метал-

Ссылка для цитирования (for citation):

Синюгин А.А., Кобыгин С.Б., Опарин В.Б. Алгоритм расчета армированных металлополимерных труб на прочность с использованием эквивалентной двухслойной модели // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2021. № 1–2. С. 84–90.

Sinyugin A. A., Konygin S. B., Oparin V. B. Algorithm for Strength Calculation of Reinforced Metal-Polymer Pipes Using an Equivalent Two-Layer Model. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2021;(1-2):84-90. (In Russ.)

лической трубы (ГПМТ) как конкретного случая АМПТ ранее была предложена эквивалентная двухслойная модель [12]: многослойная конструкция трубы была выражена в виде двухслойной математической модели с ортотропными механическими свойствами слоев (рис. 2).

В данной статье авторами предложен унифицированный алгоритм расчета АМПТ на прочность, основанный на том, что большинству подобных конструкций вне зависимости от отличий, обусловленных назначением АМПТ и особенностями производства, присущи наличие внутреннего и внешнего полимерных слоев, каркаса и грузонесущих слоев (рис. 1).

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА АРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ

Алгоритм расчета согласно предлагаемой методике включает следующие этапы:

- 1) определение основных несущих слоев АМПТ, воспринимающих радиальную и осевую растягивающую нагрузки, их геометрических параметров (толщина, диаметр, угол навивки) и материального исполнения;
- 2) выбор геометрических параметров (толщина, диаметр) слоев эквивалентной двухслойной модели, определение характера нагрузок, воспринимаемых слоями эквивалентной модели. Как правило, наиболее приближенной к реальным конструкциям АМПТ будет эквивалентная модель, в которой внутренний слой воспринимает радиальные нагрузки от внутреннего давления, а внешний – растягивающие осевые нагрузки. Рекомендуется принимать толщины эквивалентных слоев равными толщинам наиболее прочных слоев в каждом направлении;
- 3) определение механических свойств слоев эквивалентной модели исходя из геометрических параметров и механических свойств несущих слоев АМПТ;
- 4) расчет АМПТ на прочность с использованием полученной эквивалентной модели по методикам расчета тонкостенных цилиндров по уравнениям Лапласа.

Выбор несущих слоев АМПТ, свойства которых будут характеризовать механические свойства слоев эквивалентной модели, следует осуществлять исходя из свойств материала наиболее прочного слоя, воспринимающего радиальные и/или осевые нагрузки, а также слоев, значения механических свойств которых отличаются не более чем на порядок от свойств наиболее прочного слоя. Слои АМПТ, свойства которых больше чем на порядок отличаются от свойств самых прочных слоев, не учитываются в расчете. Например, в расчете осевой прочности АМПТ с грузонесущими слоями, выполненными из металлической проволоки или металлокорда, нет необходимости учитывать влияние герметизирующих полимерных камер. В то же время в случае выполнения грузонесущих слоев из полимерных материалов (например, полипропилена) полимерная камера (полиэтиленовая или виниловая) может вносить существенный вклад в общую прочность конструкции.

В общем виде уравнения, описывающие прочность эквивалентных слоев, представлены системами (1) и (2).

Уравнения системы (1) описывают механические свойства внутреннего слоя эквивалентной модели, воспринимающего радиальные нагрузки:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{в.рад} &= \frac{a_1 \cdot \sigma_{в.каркас1} \cdot t_{каркас1} + a_2 \cdot \sigma_{в.каркас2} \cdot t_{каркас2} + \dots + a_n \cdot \sigma_{в.каркас_n} \cdot t_{каркас_n}}{t_{экв.внутр}}, \\ \sigma_{т.рад} &= \frac{a_1 \cdot \sigma_{т.каркас1} \cdot t_{каркас1} + a_2 \cdot \sigma_{т.каркас2} \cdot t_{каркас2} + \dots + a_n \cdot \sigma_{т.каркас_n} \cdot t_{каркас_n}}{t_{экв.внутр}}, \\ E_{рад} &= a_{max} \cdot E_{каркас_max}, \\ \sigma_{в.ос} &= 0, \\ \sigma_{т.ос} &= 0, \\ E_{ос} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\sigma_{в.рад}$ ,  $\sigma_{т.рад}$  и  $E_{рад}$  – предел прочности, МПа, предел текучести, МПа, и модуль Юнга, МПа, внутреннего слоя эквивалентной модели в радиальном направлении;  $a_1, a_2, a_n$  – безразмерные коэффициенты, получаемые путем применения метода заполненного периметра (коэффициенты характеризуют отношение механических свойств внутреннего слоя эквивалентной модели и материалов АМПТ, воспринимающих радиальные нагрузки от внутреннего давления, в случае монолитного слоя коэффициент  $a = 1$ );  $\sigma_{в.каркас1}, \sigma_{в.каркас2}, \sigma_{в.каркас_n}$  – пределы прочности, МПа, входящих в конструкцию АМПТ материалов, воспринимающих радиальные нагрузки от внутреннего давления;  $\sigma_{т.каркас1}, \sigma_{т.каркас2}, \sigma_{т.каркас_n}$  – пределы текучести, МПа, входящих в конструкцию АМПТ материалов, воспринимающих радиальные нагрузки от внутреннего давления;  $t_{каркас1}, t_{каркас2}, t_{каркас_n}$  – толщины слоев, мм, входящих в конструкцию АМПТ материалов, воспринимающих радиальные нагрузки от внутреннего давления;  $t_{экв.внутр}$  – толщина внутреннего слоя эквивалентной модели, мм;  $E_{каркас_max}$  – максимальный модуль Юнга, МПа, среди материалов АМПТ, воспринимающих внутренние радиальные нагрузки;  $a_{max}$  – коэффициент  $a$ , полученный при применении метода заполненного периметра к слою с максимальным значением модуля Юнга;  $\sigma_{в.ос}, \sigma_{т.ос}$  и  $E_{ос}$  – предел прочности, МПа, предел текучести, МПа, и модуль Юнга, МПа, внутреннего слоя эквивалентной модели в осевом направлении (поскольку слою эквивалентной модели имеют ортотропные механические свойства, эти значения принимаются равными нулю).

Уравнения системы (2) описывают механические свойства внешнего слоя эквивалентной модели, воспринимающего осевые растягивающие нагрузки:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma'_{в.рад} &= 0, \\ \sigma'_{т.рад} &= 0, \\ E'_{рад} &= 0, \\ \sigma'_{в.ос} &= \frac{b_1 \cdot \sigma_{в.групп1} \cdot S_{групп1} + b_2 \cdot \sigma_{в.групп2} \cdot S_{групп2} + \dots + b_n \cdot \sigma_{в.групп_n} \cdot S_{групп_n}}{S_{экв.внеш}}, \\ \sigma'_{т.ос} &= \frac{b_1 \cdot \sigma_{т.групп1} \cdot S_{групп1} + b_2 \cdot \sigma_{т.групп2} \cdot S_{групп2} + \dots + b_n \cdot \sigma_{т.групп_n} \cdot S_{групп_n}}{S_{экв.внеш}}, \\ E'_{ос} &= b_{max} \cdot E_{групп_max}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $\sigma'_{в.ос}$ ,  $\sigma'_{т.ос}$  и  $E'_{ос}$  – предел прочности, МПа, предел текучести, МПа, и модуль Юнга, МПа, внешнего слоя эквивалентной модели в осевом направлении;  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_n$  – безразмерные коэффициенты, получаемые путем применения метода заполненного периметра (коэффициенты характеризуют отношение механических свойств внешнего слоя эквивалентной модели и материалов АМПТ, воспринимающих растягивающие осевые нагрузки, в случае монолитного слоя коэффициент  $b = 1$ );  $\sigma_{в.гpyз1}$ ,  $\sigma_{в.гpyз2}$ ,  $\sigma_{в.гpyз_n}$  – пределы прочности, МПа, входящих в конструкцию АМПТ материалов, воспринимающих растягивающие осевые нагрузки (грузонесущих материалов);  $\sigma_{т.гpyз1}$ ,  $\sigma_{т.гpyз2}$ ,  $\sigma_{т.гpyз_n}$  – пределы текучести, МПа, входящих в конструкцию АМПТ материалов, воспринимающих растягивающие осевые нагрузки;  $S_{гpyз1}$ ,  $S_{гpyз2}$ ,  $S_{гpyз_n}$  – площади поперечных сечений, мм<sup>2</sup>, входящих в конструкцию АМПТ материалов, воспринимающих растягивающие осевые нагрузки;  $S_{эkv.внеш}$  – площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>, внешнего слоя эквивалентной модели;  $E_{гpyз\_max}$  – максимальный модуль Юнга, МПа, среди материалов АМПТ, воспринимающих растягивающие осевые нагрузки;  $b_{max}$  – коэффициент  $b$ , полученный при применении метода заполненного периметра к слою с максимальным значением модуля Юнга;  $\sigma'_{в.рад}$ ,  $\sigma'_{т.рад}$  и  $E'_{рад}$  – предел прочности, МПа, предел текучести, МПа, и модуль Юнга, МПа, внешнего слоя эквивалентной модели в радиальном направлении (поскольку слои эквивалентной модели имеют ортотропные механические свойства, эти значения принимаются равными нулю).

Определение коэффициентов  $a$  и  $b$  может проходить как аналитически, с использованием метода заполненного периметра [12], так и при помощи конечноэлементного моделирования [12, 13].

В случае сопоставимости значений пределов прочности и текучести допускается принимать предел текучести эквивалентного слоя условно равным пределу прочности. В таком случае проводить прочностной расчет по уравнению Лапласа допустимо только по критерию прочности.

### ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКОЙ

Рассмотрим применимость алгоритма на примере реальной АМПТ производства одной из российских компаний, выпускающих гибкие металлополимерные трубы типоразмеров DN50, DN75 и DN100 с проволочным каркасом, используемые на нефтяных промыслах в качестве выкидных трубопроводов систем сбора и систем поддержания пластового давления. Гибкая труба данной конструкции представлена на рис. 3. Паспортные технические характеристики гибкой трубы DN100 приведены в таблице.

#### Определение основных несущих слоев АМПТ

Основными прочностными элементами рассматриваемой конструкции являются спиральный стальной проволочный каркас для восприятия нагрузки в радиальном направлении и грузонесущие повивы из полипропиленового (ПП) шпагата для восприятия нагрузки в осевом направлении.

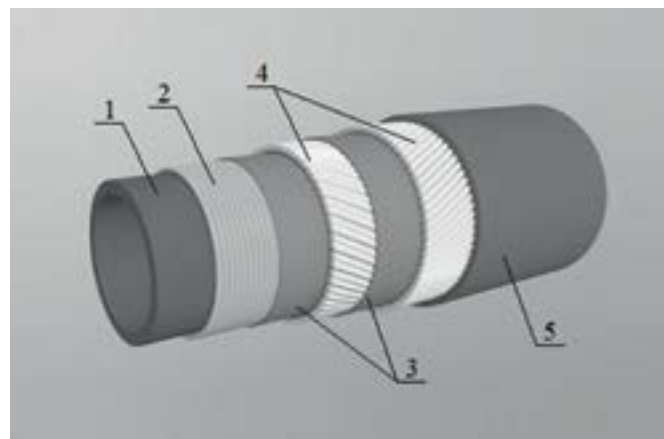


Рис. 3. Общий вид армированной металлополимерной трубы с проволочным каркасом:

1 – внутренняя камера из полиэтилена низкого давления; 2 – проволочный стальной каркас; 3 – гидроизолирующие слои из поливинилхлорида; 4 – грузонесущие слои из полипропиленового шпагата; 5 – внешняя защитная камера из полиэтилена высокого давления

Fig. 3. General view of a reinforced metal-polymer pipe with a wire frame: 1 – inner chamber made of low pressure polyethylene; 2 – wire steel frame; 3 – waterproofing layers of polyvinyl chloride; 4 – load-bearing layers of polypropylene twine; 5 – external protective chamber made of high pressure polyethylene

Толщина стальной проволоки составляет 3 мм, ее материальное исполнение – углеродистая конструкционная сталь 65, максимальный шаг навивки – 3,2 мм. Поскольку полимерные материалы, входящие в конструкцию, имеют пренебрежительно малые прочностные свойства относительно углеродистой стали, их влиянием на радиальную прочность конструкции следует пренебречь.

Толщина ПП шпагата – 4 мм, угол навивки – 25 ° к оси трубы, количество слоев ПП шпагатов – 2. Поскольку механические свойства [14] полипропилена сопоставимы со свойствами полиэтилена низкого (ПНД) и высокого давления (ПВД) и поливинилхлорида (ПВХ), из которых выполнены прочие полимерные слои конструкции, необходимо учесть их вклад в осевую прочность всей гибкой трубы исходя из следующих допущений:

- согласно [14] механические свойства поливинилхлорида хуже, чем полиэтилена и полипропилена, а толщина слоев винила <1 мм, следовательно, участием этих слоев в восприятии осевых нагрузок можно пренебречь;
- в силу защитной функции внешнего полиэтиленового слоя в нем допустимо наличие местных дефектов, что противоречит условию обеспечения осевой прочности в каждом поперечном сечении трубы, поэтому учет данного слоя приведет к неоправданному завышению расчетных результатов.

Отсюда следует, что слоями ГПМТ, воспринимающими осевую нагрузку, будут являться описанные слои ПП шпагатов, а также внутренняя камера из ПНД, толщина которой составляет 10 мм.

## Выбор геометрических параметров слоев эквивалентной модели

Учитывая конструктивные особенности рассматриваемой модели АМРТ, следует принять внутренний слой эквивалентной модели, воспринимающий радиальные нагрузки, геометрически равным слою стального проволочного каркаса ГПМТ, т. е. внутренний диаметр слоя составит 110 мм, толщина – 3 мм. Внешний слой эквивалентной модели, воспринимающий осевые нагрузки, принимаем равным двум слоям ПП шпата как наиболее прочного слоя ГПМТ в осевом направлении, его внутренний диаметр составит 116 мм, толщина – 8 мм (2 по 4 мм).

## Определение механических свойств слоев эквивалентной модели

Определение свойств слоев эквивалентной модели производится при помощи метода заполненного периметра [12]. Прочностные свойства внутреннего слоя эквивалентной модели в общем виде описываются системой уравнений (1). В рассматриваемом частном случае радиальные нагрузки воспринимает один слой ГПМТ (стальной проволочный каркас), поэтому система (1) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{в.рад}} = \frac{a \cdot \sigma_{\text{в.каркас}} \cdot t_{\text{каркас}}}{t_{\text{экв.внутр}}}, \\ \sigma_{\text{т.рад}} = \frac{a \cdot \sigma_{\text{т.каркас}} \cdot t_{\text{каркас}}}{t_{\text{экв.внутр}}}, \\ E_{\text{рад}} = a \cdot E_{\text{каркас}}, \\ \sigma_{\text{в.ос}} = 0, \\ \sigma_{\text{т.ос}} = 0, \\ E_{\text{ос}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{в.рад}}$ ,  $\sigma_{\text{т.рад}}$  и  $E_{\text{рад}}$  – предел прочности, МПа, предел текучести, МПа, и модуль Юнга, МПа, внутреннего слоя эквивалентной модели в радиальном направлении;  $a = 0,74$  [12];  $\sigma_{\text{в.каркас}} = 980$  МПа (предел прочности стали 65);  $\sigma_{\text{т.каркас}} = 785$  МПа (предел текучести стали 65);  $t_{\text{каркас}} = 3$  мм (толщина стальной проволоки);  $t_{\text{экв.внутр}} = 3$  мм (толщина внутреннего слоя эквивалентной модели);  $E_{\text{каркас\_тах}} = 205$  ГПа (модуль Юнга стали 65).

Отсюда получим:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{в.рад}} = 725 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\text{т.рад}} = 581 \text{ МПа}, \\ E_{\text{рад}} = 151 \text{ ГПа}, \\ \sigma_{\text{в.ос}} = 0, \\ \sigma_{\text{т.ос}} = 0, \\ E_{\text{ос}} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Система равенств (4) описывает механические свойства внутреннего слоя эквивалентной модели как сплошного тонкостенного цилиндра с ортотропными свойствами.

По аналогии прочностные свойства внешнего слоя эквивалентной модели выражаются системой уравнений (5).

Технические характеристики гибкой металлополимерной трубы с проволочным каркасом

Technical characteristics of wire cage flexible metal polymer pipe

Параметр Characteristic	Значение Value
Внутренний диаметр (номинальный), мм Inner diameter (nominal), mm	100
Внутренний диаметр (фактический), мм Inner diameter (actual), mm	90
Толщина внутренней камеры из полиэтилена низкого давления, мм The thickness of the inner chamber made of polyethylene of low pressure, mm	10
Диаметр стальной проволоки, мм Steel wire diameter, mm	3
Толщина слоев из поливинилхлорида, мм Thickness of layers of polyvinyl chloride, mm	<0,8
Толщина грузонесущих слоев (диаметр полипропиленового шпата), мм Thickness of load-bearing layers (diameter of polypropylene twine), mm	4
Толщина внешнего слоя из полиэтилена высокого давления, мм Thickness of the outer layer of high pressure polyethylene, mm	3
Максимальное рабочее давление, МПа Maximum working pressure, MPa	10
Испытательное давление, МПа Test pressure, MPa	15

Поскольку осевые нагрузки воспринимаются двумя слоями [12], система принимает вид:

$$\begin{cases} \sigma'_{\text{в.рад}} = 0, \\ \sigma'_{\text{т.рад}} = 0, \\ E'_{\text{рад}} = 0, \\ \sigma'_{\text{в.ос}} = \frac{b_1 \cdot \sigma_{\text{в.пп}} \cdot S_{\text{пп}} + b_2 \cdot \sigma_{\text{в.пнд}} \cdot S_{\text{пнд}}}{S_{\text{экв.внеш}}}, \\ \sigma'_{\text{т.ос}} = \frac{b_1 \cdot \sigma_{\text{т.пп}} \cdot S_{\text{пп}} + b_2 \cdot \sigma_{\text{т.пнд}} \cdot S_{\text{пнд}}}{S_{\text{экв.внеш}}}, \\ E'_{\text{ос}} = E_{\text{пп}}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sigma'_{\text{в.ос}}$ ,  $\sigma'_{\text{т.ос}}$  и  $E'_{\text{ос}}$  – предел прочности, МПа, предел текучести, МПа, и модуль Юнга, МПа, внешнего слоя эквивалентной модели в осевом направлении;  $b_1 = 0,65$ ,  $b_2 = 1$  [12];  $\sigma_{\text{в.пп}} = 73,80$  МПа,  $\sigma_{\text{в.пнд}} = 23,06$  МПа;  $\sigma_{\text{т.пп}} = 69,39$  МПа,  $\sigma_{\text{т.пнд}} = 23,02$  МПа [14];  $S_{\text{пп}} = 3157 \text{ мм}^2$ ,  $S_{\text{пнд}} = 3142 \text{ мм}^2$ ;  $S_{\text{экв.внеш}} = 3109 \text{ мм}^2$ ;  $E_{\text{груз\_тах}} = 1362$  МПа.

Отсюда получим:

$$\begin{cases} \sigma'_{\text{в.рад}} = 0, \\ \sigma'_{\text{т.рад}} = 0, \\ E'_{\text{рад}} = 0, \\ \sigma'_{\text{в.ос}} = 72,01 \text{ МПа}, \\ \sigma'_{\text{т.ос}} \sim \sigma'_{\text{в.ос}}, \\ E'_{\text{ос}} = 1362 \text{ МПа}. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) описывает механические свойства внешнего слоя эквивалентной модели как сплошного тонкостенного цилиндра с ортотропными свойствами. Поскольку авторами [14] был установлено соответствие значений  $\sigma'_{т.ос}$  и  $\sigma'_{в.ос}$  при прочностном расчете рассматриваемой конструкции сделаем вывод о недопустимости проведения прочностного расчета по критерию текучести.

При определении указанных параметров и в ходе рассмотрения условий статики гибких труб и их напряженного состояния были сделаны следующие допущения:

- 1) величина натяга проволоки стального каркаса при изготовлении ГПМТ в расчетах не учитывается;
- 2) изгибающие и крутящие моменты грузонесущих элементов не учитываются. Аналогичное допущение имеет место в методиках расчета таких похожих на ГПМТ конструкций, как многослойные канаты [15];
- 3) при любом рассматриваемом внутреннем давлении радиальные смещения элементов не учитываются, поскольку жесткость спирального каркаса весьма велика, а увеличение его диаметра пренебрежимо мало.

#### **Расчет ГПМТ на прочность с использованием эквивалентной модели**

На основе данных, полученных в ходе решения систем уравнений (4) и (6), можно выполнить прочностной расчет ГПМТ с применением методики расчета тонкостенных цилиндров по уравнениям Лапласа.

Уравнения Лапласа необходимо преобразовать до уравнений, определяющих значение критического внутреннего давления для кольцевых  $P_{кр1}$  и продольных  $P_{кр2}$  напряжений, МПа, в тонкостенной оболочке (эквивалентной модели) для ГПМТ выбранного диаметра:

$$P_{кр1} = \frac{2t \cdot \sigma_{в.рад}}{d_{н1}}, \quad (7)$$

$$P_{кр2} = \frac{4t \cdot \sigma'_{в.ос}}{d_{вн2}}, \quad (8)$$

и применить к ним значения  $\sigma_{в.рад}$  и  $\sigma'_{в.ос}$ , представленные в системах уравнений (4) и (6), а также значения наружного диаметра  $d_{н1}$ , мм, внутреннего слоя эквивалентной модели и внутреннего диаметра  $d_{вн2}$ , мм, наружного слоя эквивалентной модели, определенные в п. 1 алгоритма.

Получим:

$$P_{кр1} = \frac{2 \cdot 0,003 \cdot 725}{0,116} = 37,5 \text{ МПа}, \quad (9)$$

$$P_{кр2} = \frac{4 \cdot 0,008 \cdot 72,01}{0,116} = 19,9 \text{ МПа}. \quad (10)$$

Полученные значения  $P_{кр1}$  и  $P_{кр2}$  коррелируют с аналогичными значениями расчета ГПМТ на прочность с использованием традиционных методик, основанных на расчетах стальных канатов [12, 13, 16], составляющими 39,3 и 17,5 МПа соответственно. В данном случае расхождение результатов расчета по различным методикам составило 12 %.

Больше на сайте  
[neftegas.info](http://neftegas.info)



Подписывайтесь на нас в



Таким образом, предложенная методика позволяет рассчитывать на прочность АМПТ любой применяемой в нефтяной промышленности конструкции с приемлемой точностью. Ее преимуществом является возможность проведения проч-

ностного расчета по одному алгоритму для любой армированной металлополимерной трубы вне зависимости от количества и материального и конструктивного исполнения ее слоев.

### Литература:

1. Sævik S. Theoretical and Experimental Studies of Stresses in Flexible Pipes // *Computers & Structures*. 2011. Vol. 89. Iss. 23–24. P. 2273–2291.
2. Yang X., Sævik S., Sun L. Numerical Analysis of Buckling Failure in Flexible Pipe Tensile Armor Wires // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 108. P. 594–605.
3. Østergaard N., Lyckegaard A., Andreasen J.H. A Method for Prediction of the Equilibrium State of a Long and Slender Wire on a Frictionless Toroid Applied for Analysis of Flexible Pipe Structures // *Engineering Structures*. 2012. Vol. 34. Iss. 1. P. 391–399.
4. Østergaard N., Lyckegaard A., Andreasen J.H. Imperfections Analysis of Flexible Pipe Armor Wires in Compression and Bending // *Applied Ocean Research*. 2012. Vol. 38. P. 40–47.
5. Vaz M.A., Rizzo N.A.S. A Finite Element Model for Flexible Pipe Armor Wire Instability // *Marine Structures*. 2011. Vol. 24. Iss. 3. P. 275–291.
6. Tang M., Yang Ch., Yan J., Yue Q. Validity and Limitation of Analytical Models for the Bending Stress of a Helical Wire in Unbounded Flexible Pipes // *Applied Ocean Research*. 2015. Vol. 50. P. 58–68.
7. Сальников А.Ф., Аношкин А.Н., Щелудяков А.М. Исследование работоспособности трубопроводов из ПАТ (МПТ) в технологических линиях добычи нефти и газа // *Трубопроводный транспорт (теория и практика)*. 2018. № 2 (66). С. 8–14.
8. Сальников А.Ф., Осокин В.М. Методика прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов из полимерно-армированных труб по образцам-свидетелям // *Инженерная практика*. 2018. № 9. С. 56–60.
9. Пепеляев В.С., Тараканов А.И. Эффективность применения полиэтиленовых армированных синтетическими нитями труб в нефтегазовом комплексе // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2008. № 1. С. 36–39.
10. Изосимов А.М., Опарин В.Б. К вопросу упорядочения проектирования технологических трубопроводов из гибких полимерно-металлических труб // *Бурение и нефть*. 2009. № 10. С. 65–66.
11. Людвиницкая А.Р. Совершенствование дозирочной системы подачи химических реагентов в скважину с использованием металлополимерных трубопроводов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2010. 228 с.
12. Синюгин А.А., Опарин В.Б. Применение эквивалентной модели при оценке прочности гибких труб // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2016. № 5. С. 68–72.
13. Синюгин А.А., Папировский В.Л., Опарин В.Б. Оптимизация моделирования спирального банджа гибкой полимерно-металлической трубы в ANSYS // *Бурение и нефть*. 2014. № 7–8. С. 39–41.
14. Синюгин А.А., Опарин В.Б., Петровская М.В. Определение механических характеристик полимерных материалов, входящих в конструкцию гибкой полимерно-металлической трубы // *Вестник Самарского государственного технического университета*. (Сер. «Технические науки»). 2015. № 4. С. 116–123.
15. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Изд-во «Техника», 1966. 326 с.
16. Изосимов А.М. Некоторые исследования в области непрерывного спуско-подъема бурильной колонны: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1967. 248 с.

### References:

1. Sævik S. Theoretical and Experimental Studies of Stresses in Flexible Pipes. *Computers & Structures*. 2011;89(23–24):2273–2291.
2. Yang X., Sævik S., Sun L. Numerical Analysis of Buckling Failure in Flexible Pipe Tensile Armor Wires. *Ocean Engineering*. 2015;108:594–605.
3. Østergaard N., Lyckegaard A., Andreasen J.H. A Method for Prediction of the Equilibrium State of a Long and Slender Wire on a Frictionless Toroid Applied for Analysis of Flexible Pipe Structures. *Engineering Structures*. 2012;34(1):391–399.
4. Østergaard N., Lyckegaard A., Andreasen J.H. Imperfections Analysis of Flexible Pipe Armor Wires in Compression and Bending. *Applied Ocean Research*. 2012;38:40–47.
5. Vaz M.A., Rizzo N.A.S. A Finite Element Model for Flexible Pipe Armor Wire Instability. *Marine Structures*. 2011;24(3):275–291.
6. Tang M., Yang Ch., Yan J., Yue Q. Validity and Limitation of Analytical Models for the Bending Stress of a Helical Wire in Unbounded Flexible Pipes. *Applied Ocean Research*. 2015;50:58–68.
7. Salnikov A.F., Anoshkin A.N., Shcheludyakov A.M. Study of the Performance of Pipelines made of Polymer-Reinforced Pipes (Metal-Polymer Pipes) in Oil and Gas Production Lines. *Truboprovodnyi transport (teoriya i praktika) [Pipeline Transport: Theory and Practice]*. 2018;2(66):8–14. (In Russ.)
8. Salnikov A.F., Osokin V.M. Methodology for Predicting the Residual Resource of Polymer-Reinforced Pipelines using Witness Samples. *Inzhenernaya praktika [Engineering Practice]*. 2018;(9):56–60. (In Russ.)
9. Pepelyaev V.S., Tarakanov A.I. Efficiency of Using Polyethylene Pipes Reinforced with Synthetic Threads in Oil and Gas Industry. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa [Equipment and Technologies for Oil and Gas Industry]*. 2008;(1):36–39. (In Russ.)
10. Izosimov A.M., Oparin V.B. On Regulating of Designing of Technologic Pipelines Made of Flexible Polymeric-Metallic Pipes. *Burenie i neft' [Drilling and Oil]*. 2009;(10):65–66. (In Russ.)
11. Lyudvinickaya A.R. Improvement of the Dosage System of Chemicals in the Well using Metal-Polymer Pipes. Ph.D. thesis in Engineering Science. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University; 2010. (In Russ.)
12. Sinyugin A.A., Oparin V.B. Application of Equivalent Model in Evaluating the Strength of Flexible Pipes. *Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]*. 2016;(5):68–72. (In Russ.)
13. Sinyugin A.A., Papirovsky V.L., Oparin V.B. Ansys Modeling Optimization of Spiral Band of Polymeric-Metallic Pipe. *Burenie i neft' [Drilling and Oil]*. 2014;(7–8):39–41. (In Russ.)
14. Sinyugin A.A., Oparin V.B., Petrovskaya M.V. The Determination of Mechanical Characteristics of Polymer Comprising a Flexible Pipe. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik of Samara State Technical University]. Seriya "Tekhnicheskie nauki" [Technical Sciences Series]*. 2015;(4):116–123. (In Russ.)
15. Glushko M.F. Steel Hoisting Ropes. Kiev: Tekhnika Publ.; 1966. (In Russ.)
16. Izosimov A.M. Some Studies in the Field of Continuous Running of the Drill String. Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow; 1967. (In Russ.)