

ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 620.162.4

С. Н. Гольшев, М. А. Донченко, С. Н. Ермаков

РАСЧЕТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРМИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Рассматриваются методики проведения предварительных проектировочных расчетов и испытаний армированной полимерной трубы для транспортировки жидкостей или газов под давлением. Основное внимание уделено вопросу влияния геометрических параметров армирующего слоя на прочностные свойства трубы.

Ключевые слова: полимерная армированная труба, прочность, давление, армирование стальной проволокой.

Армированные полимерные трубы находят широкое применение там, где требуется передача жидкостей или газов под давлением. Например, для транспортировки нефти, газа или других технологических жидкостей (Шайдаков, 2009, С. 98–101). Эти трубы имеют ряд преимуществ, по сравнению со стальными:

- полимерный материал более стоек к коррозионному воздействию, чем сталь, применяемая для изготовления трубки;
- отсутствует сварной шов, который является концентратором напряжения и может быть негерметичным;
- наружная полимерная оболочка обеспечивает надежную защиту от внешней среды;
- конструкция обеспечивает демпфирование колебаний давления жидкости возникающих от работы подающего насоса и приводящего к разрушению внутреннего канала.

Главным сравнительным недостатком является более низкая стойкость к внутреннему и внешнему гидростатическому давлению разрушения. Повышение стойкости к давлению трубы происходит за счет введения армирующих элементов различной формы и материалов.

Армирование полимерных труб в первую очередь проводится для увеличение их прочностных свойств, что способствует повышению рабочего давления в трубопроводе. Необходимость повышения прочностных свойств вызвана условиями эксплуатации трубопроводов: высокие значения внутреннего давления технологической среды, подаваемой по трубопроводу; высокие значения наружного давления среды, что может привести к «схлопыванию трубы»; вы-

сокие температуры, что приводит к повышенной пластичности полимера, из которого выполнена труба и т. п.

Физико-механические свойства труб определяются свойствами материалов армирующего каркаса и оболочки (наполнителя). Высокопрочными материалами армирующих элементов выступают стальная проволока или лента, стекловолокно или синтетические нити.

Рассмотрим армированную полимерную трубу, представляющую собой сложную конструкцию, изготовленную из полимера и армированную двумя слоями повива стальной высокопрочной проволоки (рис. 1).

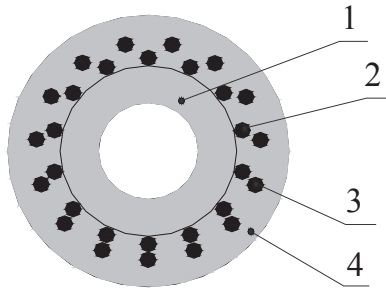


Рис. 1. Конструкция армированной полимерной трубы:

- 1 — внутренняя полимерная труба (является непосредственно гидроканалом);
- 2 — первый повив брони;
- 3 — второй повив брони;
- 4 — наружная оболочка из полимерного материала

Размеры и технические характеристики трубы устанавливаются для конкретных условий эксплуатации.

Для рассматриваемой трубы заданы следующие параметры: рабочее давление в трубе не менее 20 МПа, при условии, что температура рабочей среды может достигать 90°C; внешний диаметр 15 мм; внутренний диаметр 5 мм. Разрушающее гидростатическое давление должно составить 30 МПа.

На этапе проектирования трубы проводились предварительные прочностные расчеты, для определения основных конструктивных параметров, компьютерное моделирование условий нагружения трубы, для предварительной оценки прочностных характеристик трубопровода, а также механические испытания макетов. Ниже предложены результаты этапов проектирования.

Очевидно, что основную часть нагрузки от внутреннего давления воспринимают витки армирующего слоя, поэтому важными параметрами при производстве трубы являются шаг и угол повива, а также диаметр проволоки. Регулирование указанных параметров обеспечивает заданную анизотропию физико-механических свойств материала, как по направлению, так и по величине. Исходя из конструкции трубы, армирующие элементы (повивы брони) расположены по винтовой линии (с определенным углом и шагом) в два противоположно направленных слоя для одновременного повышения прочности в осевом и радиальном направлениях.

На рис. 2 приведена упрощенная расчетная схема трубы, одним слоем армирующей проволоки под углом ϕ к оси трубы.

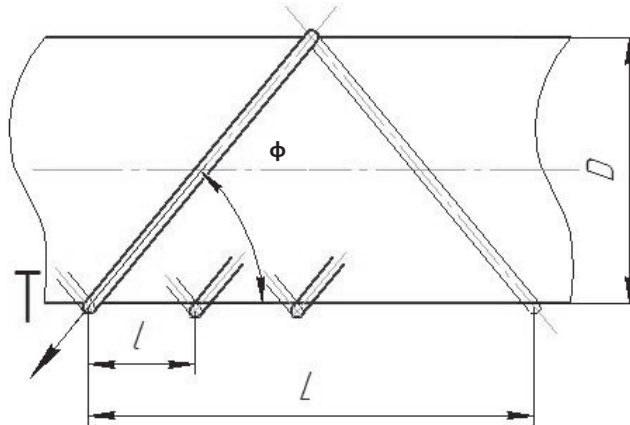


Рис. 2. Расчетная схема армирующих элементов

Исходя из схемы осевая нагрузка на проволоку определяется по формуле (Гориловский, 2002, С. 22–25)

$$T = \frac{D \times L \times p}{2N \sin \phi}, \quad (1)$$

где T — осевая нагрузка на проволоку, Н; D — наружный диаметр внутренней оболочки (диаметр армирования), мм; $L = l \times N$ — шаг укладки проволоки, мм; l — шаг проволоки между соседними витками, мм; N — количество проволок; p — внутреннее давление в трубе, МПа; ϕ — угол укладки проволоки.

Из формулы видно, что осевая нагрузка на проволоку зависит от угла погиба последней. На рис. 3 представлена качественная зависимость осевой нагрузки на проволоку от угла навивки проволоки.

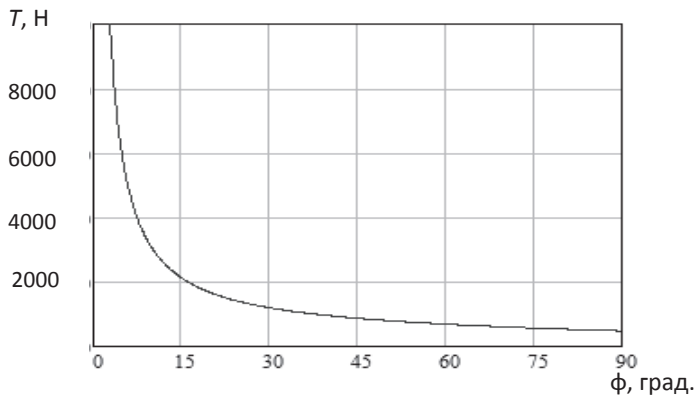


Рис. 3. График зависимости осевой нагрузки в проволоке от угла ее погиба

Найдем осевую нагрузку в проволоке 1-го повива для трубы. Максимальный шаг скрутки $L = 55 + 5 = 60$ мм (согласно конструкции трубы, исходя из технологии ее производства). Шаг скрутки (согласно рис. 2) находится по формуле

$$L = \frac{D}{0,5 \times \operatorname{tg} \varphi}. \quad (2)$$

Из формулы (2) найдем

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{D}{L \times 0,5} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{9}{60 \times 0,5} \right) = 16,87^\circ.$$

Тогда осевая нагрузка в соответствии с формулой (1) будет равна

$$T = \frac{9 \times 60 \times 25}{2 \times 14 \times \sin 16,87^\circ} = 1661,4 \text{ Н}.$$

Площадь поперечного сечения проволоки

$$F_{\text{пр}} = \pi \times R^2 = \pi \times 0,375^2 = 0,442 \text{ мм}^2. \quad (3)$$

Напряжения, возникающие в проволоке, с учетом (3) будут равны

$$\sigma = \frac{T}{F} = \frac{1661,4}{0,442} = 3758,8 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Допускаемые напряжения для проволоки стальной нагартованной составляет 60% от предела прочности ($\sigma_b = 1860$ МПа) $[\sigma] = 0,6 \times 1860 = 1116$ МПа.

Из решения (4) следует, что условие прочности ($\sigma < [\sigma]$) не соблюдается. Это указывает на необходимость снижения нагрузки в проволоке путем увеличения шага скрутки, при этом увеличивается угол повива. Из графика (рис. 3) следует, что можно получить необходимые значения по осевой и радиальной составляющих нагрузки, изменяя угол повива проволоки.

Другим вариантом повышения надежности трубы является введение второго армирующего слоя, повитого в другом направлении. Два слоя проволоки, уложенные во взаимно противоположных направлениях, обеспечивают равнопрочность системы армирования к действию внутреннего давления в осевом и радиальном направлении.

Для проверки заявленных характеристик трубы проводились исследования, заключающиеся в создании твердотельной модели и изучении ее поведения при различных внешних воздействиях (Пепеляев, 2006). Для исследования использовался программный комплекс SolidWorks 2011 и инструмент Solid-Work Simulation. Данный инструмент использует метод конечных элементов для проведения прочностного статического анализа деталей и сборок.

Исследовалось влияние следующих внешних воздействий на картину нагруженно-деформированного состояния:

- внутреннее статическое и динамическое давление;
- внешнее статическое и динамическое давление;
- продольное разрывное усилие;
- внешняя и внутренняя температура.

На рис. 4 представлен внешний вид твердотельной модели трубы, состоящей из следующих элементов: трубка внутренняя из полиэтилена низкого давления, первый повив армирующего слоя из стальной проволоки, второй повив армирующего слоя из стальной проволоки, оболочка внешняя из полиэтилена низкого давления (на рисунке прозрачна).

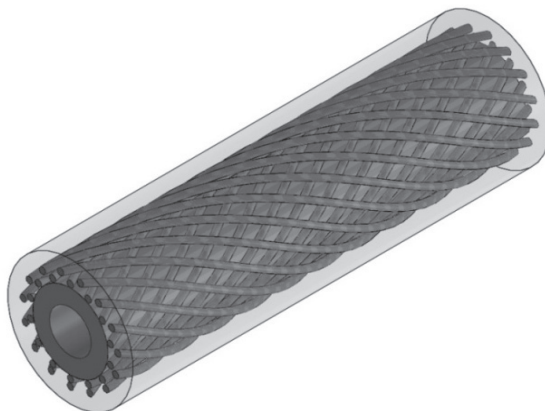


Рис. 4. Вид твердотельной имитационной модели

Результаты моделирования процессов нагружения трубы позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшие нагрузки возникают при воздействии разрывного усилия значением 30 кН и внутреннего давления 20 МПа (напряжения в материале проволоки достигают 655 МПа).

2. Основную нагрузку при воздействии внутреннего давления и разрывного усилия воспринимают повивы брони.

3. Наименьший запас прочности наблюдается при воздействии разрывного усилия, а высокий запас прочности — при воздействии внутреннего давления и внешнего давления.

Таким образом, труба устойчива к воздействию как внешнего, так и внутреннего давления.

При проведении механических испытаний (при температуре 23°C) на образцах трубы были выявлены некоторые закономерности, придающие особые требования к условиям эксплуатации. Испытание на стойкость к внутреннему давлению проводилось согласно требованиям ГОСТ 24157. Образец длиной 3 м подвергался воздействию внутреннего давления, равном 25 МПа, что на 25% превышает предполагаемое рабочее давление, равное 20 МПа. При постепенном росте давления, наблюдалось увеличение внешнего диаметра трубы. При достижении давления 25...26 МПа дальнейшее его увеличение было прекращено, и образец выдерживался в течение 60 мин. При этом давление упало до 22...23 МПа, а внешний диаметр увеличился максимально на 30,1%. После снятия давления наблюдалась максимальная остаточная деформация трубы в поперечном сечении (по диаметру), составившая 17%.

Разрушающее давление для образцов трубы составило 28...30 МПа. На рис. 5 показано место разрушения трубы. Характер разрушения указывает на механизм образования места прорыва.



Рис. 5. Место разрушения трубы

В месте образования трещины наблюдается выраженное увеличение диаметра, изменение положений проволоки и, соответственно, изменение угла ее погиба φ (рис. 2). Место прорыва представляет собой трещину в полимерной оболочке трубы (рис. 5), расположенную между проволоками погиба армирующего каркаса.

Расстояние между проволоками, находящимися по сторонам трещины, увеличено, по сравнению со всей конструкцией. Таким образом, при повышении давления, происходит увеличение диаметра и, как следствие, увеличивается угол наклона погиба φ (рис. 2). Изменение геометрии приводит к изменению соотношений радиальной и осевой составляющих нагрузки в проволоке и напряжений в полимерной оболочке. При наличии дефектов (неоднородность материала, размеров, отсутствии адгезии на поверхности раздела полимерная оболочка-проволока) изменение геометрии происходит неравномерно, что приводит к образованию трещины в полимерной оболочке. Такие изменения вызывают снижение максимального разрушающего давления.

Соответственно, при максимально возможном сохранении геометрии можно получить более высокие значения разрушающего давления и меньшую деформацию в поперечном сечении по диаметру.

Для подтверждения этого предположения, было проведено испытание на определение разрушающего давления при предварительном нагружении растягивающим усилием, что наиболее приближено к условиям эксплуатации. Предварительное натяжение составило 3 кН. После достижения давления в трубе до 26 МПа и выдержки, внешний диаметр увеличился в среднем на 1,56%. Разрушающее давление составило порядка 30...32 МПа.

Применение стальной упрочненной проволоки в качестве армирующих элементов, расположенных по винтовой линии, позволяет получить низкие значения коэффициента линейного удлинения. Для исследуемой трубы коэффици-

ент линейного удлинения составил 8,91 мм на длине 1 м при нагружении массой 1 т или, без присутствия внутреннего давления, которое уменьшает значение данного коэффициента.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы. Для более эффективного использования прочностных ресурсов трубы при эксплуатации необходимо создать осевое натяжение (обеспечивается собственным весом трубы), позволяющее сохранить в допустимых пределах конструктивные параметры трубы и повысить разрушающее давление. Очевидно, что при превышении некоторых значений натяжения, возникающие в материале трубы напряжения, в присутствии давления, приведут к разрушению. При слишком малых значениях (это характерно для концевой участка трубы, расположенного внизу скважины) разрушение произойдет при меньших значениях давлений.

Для повышения стойкости к внутреннему и внешнему давлению необходимо вводить в конструкцию трубы дополнительный армирующий слой, с геометрическими параметрами, рассчитанными для восприятия радиальной и тангенциальной нагрузок.

Литература

1. Шайдаков В. В. Капиллярные системы для предотвращения солеотложений в нефтедобыче // Инженерная практика. 2009. № 12. С. 98–101.
2. Горилловский М., Гвоздев И., Швабауэр В. К вопросу прочностного расчета армированных полиэтиленовых труб // Полимерные трубы. 2002. № 2. С. 22–25.
3. Пепеляев В. С., Тараканов А. И. Выбор методики испытаний промысловых трубопроводов из полиэтиленовых армированных синтетическими нитями труб // ООО «Технология композитов». URL: <http://www.tk.perm.ru/upload/iblock/d0d/metodika-ispytanii.pdf>.

S. N. Golyshev, M. A. Donchenko, S. N. Ermakov

CALCULATION, SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF POLYMER REINFORCED PIPE FOR TRANSPORTATION OF LIQUIDS AND GASES UNDER PRESSURE

The procedure for preliminary design calculations and method of polymer-reinforced pipe for transportation of liquids and gases under pressure. Particular attention is paid to the influence of geometrical parameters of reinforcing layer upon the strength properties of the pipe.

Keywords: polymer-reinforced pipe, strength, pressure, reinforcing steel wire.

Гольшев Сергей Николаевич — инженер ООО НИП «Дельта-Т».

Донченко Михаил Александрович — директор ООО НИП «Дельта-Т», канд. техн. наук, доцент, +7 (8112) 79-77-26, delta-t.dma@mail.ru.

Ермаков Сергей Николаевич — инженер ООО НИП «Дельта-Т».