

КОНСТРУКТИВНАЯ НАДЕЖНОСТЬ МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

¹Якубовская С.В., ¹Сильницкая Н.Ю., ²Гладенко А.А., ¹Подорожников С.Ю.

¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет Минобрнауки России», Тюмень, Россия (625039, Тюмень, ул. Володарского, 38), sv5508@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет Минобрнауки России», Омск, Россия (644050, Омск, пр-т Мира, 11), info@omgtu.ru

Представлена методика оценки конструктивной надежности муфтовых соединений промышленных полиэтиленовых трубопроводов с позиции теории вероятностей, учитывающая уровень напряженного состояния конструкции. Надежность конструкции соединений полиэтиленовых трубопроводов характеризуется критерием отказа, что является достижение предельного состояния, которое приводит к разрушению трубопроводов. Для реализации предлагаемой методики по определению уровня конструктивной надежности соединений армированных полиэтиленовых трубопроводов электромуфтой необходимо знать прочностные характеристики и напряженное состояние при их эксплуатации. Определены вероятностно-статистические значения основных прочностных параметров соединений полиэтиленовых труб электромуфтой на основе экспериментальных исследований. Разработана математическая модель оценки конструктивной надежности муфтовых соединений трубопроводов. Выполнено численное исследование влияния типов соединений полиэтиленовых трубопроводов на уровень их надежности. Определены уровень надежности и коэффициент запаса для конкретных соединений.

Ключевые слова: полиэтиленовый трубопровод; цилиндрическая оболочка; муфтовое соединение; внутреннее давление; уровень надежности.

CONSTRUCTIVE RELIABILITY COUPLING OF POLYETHYLENE PIPELINES

¹Yakubovskaya S.V., ¹Silnitskaya N.Y., ²Gladenko A.A., Podorozhnikov S.Y.

¹FSFEI of HVE «Tyumen state oil and gas university of Ministry of Education and Science», Tyumen, Russia(625039, Tyumen, Volodarskogo st., 38), sv5508@mail.ru

²FSFEI of HVE "Omsk State Technical University, Ministry of Education of Russia", Omsk, Russia (644050, Omsk, Mira, 11), info@omgtu.ru

The technique of an assessment of constructive reliability the muftovykh of connections of field polyethylene pipelines from a probability theory position considering design tension level is presented. Reliability of a design of connections of polyethylene pipelines is characterized by criterion of refusal that achievement of a limit state which leads to destruction of pipelines is. For realization of the offered technique by determination of level of constructive reliability of connections of the reinforced polyethylene pipelines the electrocoupling it is necessary to know strength characteristics and a tension at their operation. Probabilistic and statistical values of the key strength parameters of connections of polyethylene pipes by the electrocoupling on the basis of pilot studies are defined. The mathematical model of an assessment of constructive reliability the muftovykh of connections of pipelines is developed. Numerical research of influence of types of connections of polyethylene pipelines on the level of their reliability is executed. Level of reliability and coefficient of a stock for concrete connections are determined.

Keywords: polyethylene pipeline; cylindrical cover; muftovy connection; internal pressure; reliability level.

Трубопроводы XXI века должны эксплуатироваться на принципиально более высоком техническом и технологическом уровне. Это должны быть надежные, долговечные и экологически безопасные сооружения, а это во многом зависит от правильного выбора муфты в качестве соединения. Как известно, надежность соединений полиэтиленовых трубопроводов закладывается на стадии проектирования. Поэтому целью работы является разработка методики оценки конструктивной надежности муфтовых соединений

полиэтиленовых трубопроводов. Научная новизна состоит в том, что выявлена статистическая зависимость уровня надежности муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов от эксплуатационных нагрузок и конструктивных параметров исследуемой конструкции. Практическая ценность - разработано прикладное программное обеспечение для оценки уровня надежности и коэффициента запаса муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов при их эксплуатации.

Объектом исследования является соединение армированных трубопроводов с помощью электромуфты (рис.1).

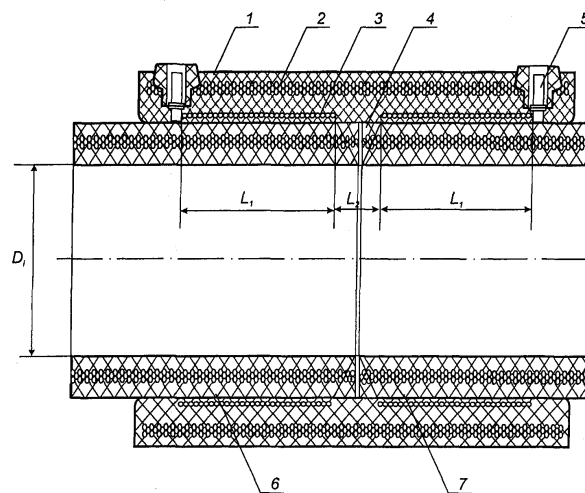


Рис.1. Схема электромуфты с нагревательными элементами

1 - электромуфта; 2 - армирование муфты; 3 - электроспираль муфты; 4 - экструзионный шов стыка труб; 5 - клемма электроподвода; 6, 7 - соединяемые армированные трубы; L_1 - длина электроспирали; L_2 - ширина шва; D_1 - внутренний диаметр труб.

Для определения уровня конструктивной надежности соединений армированных полиэтиленовых трубопроводов электромуфтой необходимо знать прочностные характеристики и напряженное состояние при их эксплуатации. В качестве расчетных моделей рассматривается условие предельных состояний, определяющее прочность соединений полиэтиленовых трубопроводов.

Повышенные требования к качеству эксплуатации предопределяют и условия работы соединений трубопроводов, связанные с большой недогрузкой, требующие принятия неординарных и экономически целесообразных решений. Возросшие требования к эксплуатационному персоналу предполагают необходимость повышения теоретического уровня специалистов и знаний ими современных технологий и приемов, позволяющие добиться максимальной эффективности эксплуатации соединений трубопроводов, при минимуме риска нанести ущерб обслуживающему персоналу и природе.

После установки муфты в стенке трубопровода, примыкающей к муфте, происходит повышение напряжения в результате действия краевого эффекта, что вызывает разрушение трубопровода в этом месте. От правильного выбора муфты в качестве соединения полиэтиленовых трубопроводов зависит прочность, надежность и долговечность работы трубопровода при его эксплуатации. В настоящее время происходит большое количество аварий и отказов соединений полиэтиленовых трубопроводов при эксплуатации, поэтому задача обеспечения надежности соединений полиэтиленовых трубопроводов является актуальной. В соответствии с теоретическими положениями О.М. Иванцова, А.Р. Ржаницына разработан метод оценки конструктивной надежности соединений полиэтиленовых трубопроводов. В работе рассматривается надежность конструкции соединений полиэтиленовых трубопроводов с позиции теории вероятностей по предельным состояниям.

Для надежности конструкции соединений полиэтиленовых трубопроводов критерием отказа является достижение предельного состояния, которое приводит к разрушению трубопроводов. За меру надежности принимается не наступление ни одного из возможных предельных состояний при заданных условиях эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов.

Надежность работы конструкции оценивается по условию [3]:

$$\vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}_2 \geq 0, \quad (1)$$

где \vec{U} - функция надежности; \vec{U}_1 - факторы, определяющие несущую способность соединений полиэтиленового трубопровода, которые зависят от физико-механических свойств материала; \vec{U}_2 - факторы условий работы соединений трубопровода, характеризующие воздействие нагрузок.

$$\vec{U}_1 \Rightarrow \left[\sigma_T; \sigma_{вр} \right]; \quad \vec{U}_2 \Rightarrow \left[\sigma_{расч}; \sigma_{эксpl} \right],$$

где σ_T - предел текучести (МПа); $\sigma_{вр}$ - предел прочности (МПа); $\sigma_{расч}$ - расчетные напряжения (МПа); $\sigma_{эксpl}$ - напряжения при эксплуатации (МПа).

Учитывая случайный характер величин U_1 и U_2 , соблюдение неравенства (1) означает надежность работы соединения полиэтиленового трубопровода лишь с определенной вероятностью. Величина этой вероятности является количественным показателем надежности конструкции соединения полиэтиленового трубопровода и зависит от соотношения числовых характеристик U_1 и U_2 , как функций многих случайных аргументов. Величина коэффициента запаса или коэффициента надежности при эксплуатации соединения трубопровода, исходя из вероятностного понятия надежности, определяется по формуле

$$k = m_{U_1} / m_{U_2},$$

где m_{U_1} и m_{U_2} - математические ожидания показателей U_1 и U_2 как случайных величин.

Расчетный уровень надежности соединения полиэтиленового трубопровода определяется по соотношению

$$H = 0,5 \cdot [1 + \Phi(z)], \quad (2)$$

где $\Phi(z)$ - интеграл вероятности, который зависит от полученного закона распределения случайных величин.

При решении задачи надежности соединений промышленных трубопроводов рассматриваем факторы U_1 и U_2 как случайные и относим их к категории случайных функций. Для определения функции надежности в качестве случайных факторов принимаются результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик соединений полиэтиленовых труб (U_1) - предел прочности (σ_{ep}) и уровень напряженного состояния соединений промышленных трубопроводов при эксплуатации (U_2).

Экспериментальные исследования для определения вероятностно- статистических значений прочностных параметров соединений армированных полиэтиленовых труб (U_1) [2] проводились на базе отраслевого института. Были проведены испытания соединений полиэтиленовых труб на действие внутреннего давления от 4 МПа до $P_{кр}$ (до разрыва) по методике, адаптированной к условиям работы трубопровода.

После обработки экспериментальных данных, согласно методике, изложенной в [1], были получены среднестатистические значения напряжений, при которых происходит разрушение муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов (табл.1).

Таблица 1

Среднестатистические результаты испытаний соединений армированных труб на внутреннее давление

| | |
|--|------|
| Номинальный наружный диаметр трубы d , мм | 140 |
| Номинальная толщина стенки трубы δ_1 , мм | 16,5 |
| Разрушающее давление ($P_{кр}$) при 20 °С, МПа | 8,4 |
| Напряжение σ_{ep} , МПа | 27,3 |

Таким образом, можно сделать вывод о соответствии фактора U_1 как случайной величины пределу прочности ($\sigma_{ep} = 27,3$ МПа) исследуемых муфтовых (электромукфта) соединений армированных полиэтиленовых трубопроводов. Для оценки уровня конструктивной надежности соединений промышленных армированных полиэтиленовых трубопроводов электромукфтой при эксплуатации учитываются свойства ортотропии [6]. Это

свойство дает возможность эксплуатации соединений армированных полиэтиленовых трубопроводов при высоких давлениях (до 8,4 МПа).

Для определения фактора U_2 были использованы статистические данные изменения величины внутреннего давления при эксплуатации соединений промышленных трубопроводов [2]. Перепады давлений при эксплуатации трубопроводов для определения вероятностно-статистических значений эксплуатационных параметров соединений армированных полиэтиленовых труб (U_2) замерялись на месторождениях. Перепады внутреннего давления при эксплуатации трубопроводов изменялись от 3,5 МПа до 5,5 МПа.

Таким образом, был определен фактор U_2 как случайная величина равная максимальным напряжениям, возникающим при эксплуатации промышленных трубопроводов ($\sigma_{\text{эсп}} = 14,5$ МПа).

После обработки данных, согласно методике, изложенной в [1], были получены среднестатистические значения напряжений, возникающих при эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов (табл.2).

Таблица 2

Среднестатистические результаты замеров величины внутреннего давления при эксплуатации промышленных трубопроводов

| | |
|---|------|
| Номинальный наружный диаметр трубы d , мм | 140 |
| Номинальная толщина стенки трубы δ_1 , мм | 16,5 |
| Давление при эксплуатации P , МПа | 4,5 |
| Напряжение при эксплуатации $\sigma_{\text{эсп}}$, МПа | 14,5 |

Таким образом, был определен фактор U_2 как случайная величина равная максимальным напряжениям, возникающим при эксплуатации промышленных трубопроводов ($\sigma_{\text{эсп}} = 14,5$ МПа).

При проектировании соединений армированных полиэтиленовых трубопроводов с помощью электромuffты необходимо знать уровень напряжений, возникающих от действия внутреннего давления и изгиба конструкции. Такой тип соединения с позиции расчета на прочность рассматривается как двухслойная конструкция. Расчет мuffтового соединения выполняется с позиции теории составных оболочек.

Для определения уровня напряжений двухслойной конструкции была разработана математическая модель, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений в сочетании с краевыми условиями [4,5].

Далее были выполнены расчеты напряженного состояния по нормальному закону распределения нагрузки и получены среднестатистические значения расчетных напряжений (табл.3).

Таблица 3

Среднестатистические результаты по определению расчетных параметров соединений армированных труб электромуфтой

| | |
|--|------|
| Номинальный наружный диаметр трубы d , мм | 140 |
| Номинальная толщина стенки трубы δ_1 , мм | 16,5 |
| Давление P , МПа | 4,5 |
| Расчетное напряжение $\sigma_{расч}$, МПа | 15,2 |

Таким образом, был определен фактор U_2^1 как случайная величина равная расчетным напряжениям ($\sigma_{расч}=16,2$ МПа).

Оценка надежности проводилась при следующих данных: модуль упругости труб из армированного полиэтилена – 3010 МПа; диаметры труб – $d = 140$ мм; рабочее давление P (3,5 – 5,5 МПа). Математическое ожидание фактора $U_1 - m_{U_1}=27,3$ МПа, фактора $U_2^1 - m_{U_2^1}=16,2$ МПа (расчетные напряжения); фактора $U_2 - m_{U_2}=14,5$ МПа (напряжения при эксплуатации); средние квадратические отклонения случайных величин $\sigma_{U_1}=4,41$; $\sigma_{U_2^1}=1,30$; коэффициенты вариации случайных величин - $\nu_{U_1}=0,16$, $\nu_{U_2^1}=0,09$. Результаты расчета представлены на рис.2, табл.4.

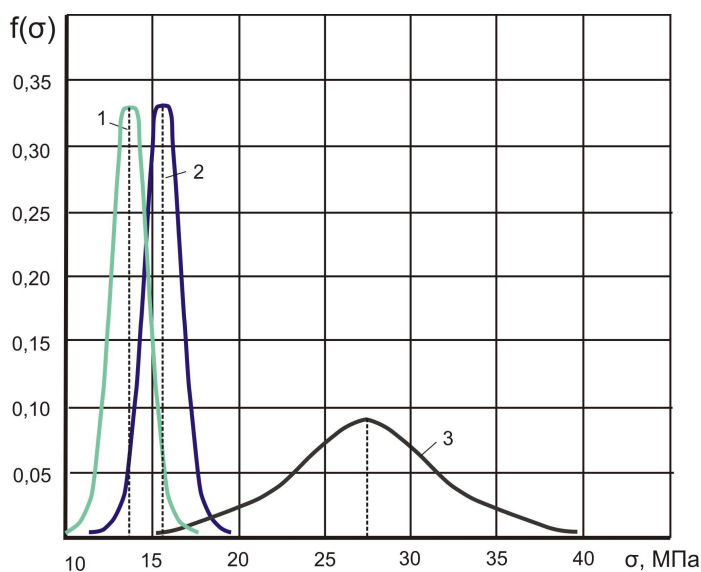


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей напряжений

$f(\sigma_{\text{экспл}})$ - (1) при эксплуатации соединений промысловых трубопроводов ($d=140$ мм; $P=4,5$ МПа); $f(\sigma_{\text{расч}})$ - (2) расчетных характеристик соединений промысловых трубопроводов ($P=4,5$ МПа); $f(\sigma_{\text{сп}})$ - (3) прочностных характеристик ($P=8,4$ МПа)

Таблица 4

Показатели надежности муфтовых соединений

| Наименование показателей | Значение |
|--------------------------|----------|
| Коэффициент запаса, k | 1,79 |
| Уровень надежности, H | 0,965 |

Разработанная методика позволяет оценить уровень надежности муфтовых соединений промысловых трубопроводов из армированного полиэтилена с достаточной точностью при их различных эксплуатационных параметрах.

В результате исследований: выявлена статистическая зависимость уровня надежности муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов от эксплуатационных нагрузок и конструктивных параметров исследуемой конструкции; определены вероятностно-статистические значения основных прочностных параметров соединений полиэтиленовых труб электромuftой на основе экспериментальных исследований; выполнено численное исследование влияния типов соединений полиэтиленовых трубопроводов на уровень их надежности.

Список литературы

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 272 с.
2. Сильницкая Н.Ю., Якубовская С.В. Экспериментальные исследования прочностных свойств муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов//Фундаментальные исследования. 2015. № 2-15. С.3285-3288.
3. Якубовская С.В. Теоретические основы повышения надежности полимерных газораспределительных и сборных сетей. Дис....докт.техн.наук. – Тюмень. – 2005.
4. Якубовская С.В., Зыкина Е.А. Напряженно-деформированное состояние муфтовых соединений промысловых полиэтиленовых трубопроводов//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2008. №5. С. 50-55
5. Якубовская С.В., Платонов А.Н., Гольцов В.С. Математическая модель напряженно-деформированного состояния восстановленного участка магистрального трубопровода по

муфтовой технологии//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2002. № 4. С. 60-65.

6. Якубовская С.В., Сильницкая Н.Ю., Иванова Е.Ю. Явление ползучести и релаксации армированных полиэтиленовых трубопроводов//Фундаментальные исследования. 2015. № 2-8. С.1676-1680.

Рецензенты:

Соколов С.М., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Торопов С.Ю., д.т.н., профессор, профессор, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.