

УДК 621.3.019.321

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ГИБКИХ ТРУБ ПРИ РЕМОНТЕ СТАЛЬНЫХ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Иванова Е.Ю.

ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет» Минобрнауки России,  
Тюмень, e-mail: i-ekaterina@mail.ru

Рассмотрен один из способов капитального ремонта стальных промысловых трубопроводов. Ремонт трубопроводов осуществляется с помощью полиэтиленовых труб, которые помещаются внутрь металлической трубы. Работы выполняются установками гибких труб. Цель исследования – определение скорости принудительной подачи полиэтиленовой трубы в ремонтируемый трубопровод при условии обеспечения ее прочности. При проведении ремонтных работ труба испытывает сложное напряженное состояние, при котором необходимо учитывать состояние изгиба, воздействие перерезывающей силы и усилие протяжки. К параметрам режима работы системы гибких труб на барабане относятся: диаметр сердечника барабана, диаметр трубы, толщина стенки трубы. Для направляющей при непосредственной подаче полиэтиленовой трубы в стальной трубопровод это – радиус направляющей, размеры поперечного сечения трубы, угол поворота сечений в зависимости от растяжения и изгиба. Выполнен анализ полученных результатов расчета напряженного состояния полиэтиленовой трубы при восстановлении поврежденных трубопроводов. Рекомендованы геометрические параметры установки гибких труб (диаметр сердечника барабана, радиус направляющей при непосредственной подаче полиэтиленовой трубы в стальной трубопровод), определена скорость принудительной подачи полиэтиленовой трубы в ремонтируемый трубопровод.

**Ключевые слова:** промысловые трубопроводы, полиэтиленовая гибкая труба, напряженное состояние

## THE STRESS CONDITION OF LONG FLEXIBLE PIPES AT REPAIR OF STEEL FIELD PIPELINES

Ivanova E.Y.

FSFEI of HVE «Tyumen state oil and gas university» of Ministry of Education and Science,  
Tyumen, e-mail: i-ekaterina@mail.ru

One way to overhaul the steel field pipelines is considered. The repair of pipelines is carried out by means of polyethylene pipes, which are located in a metal pipe. The work is performed by coiled tubing. The purpose of research is a definition of positive speed of a polyethylene pipe in the repaired pipeline under a condition of its strength. During repair, the pipe under goes complex stress state in which it is necessary to take into account the state of bending, shear force and impact force pulling. The parameters mode in system of flexible pipes on the drum include core diameter of the drum, pipe size, pipe wall thickness. The radius of the guide, cross-sectional dimensions of the pipe, the angle of rotation of the sections, depending on the stretching and folding-in rail for directs up ply of the polyethylene pipe in a steel pipe. The analysis of the calculation results of the stress state of polyethylene pipe during repairing of damaged pipes. Geometrical parameters of the unit of flexible pipes are recommended (diameter of the core of a drum, radius of the polyethylene pipe directing at direct giving in the steel pipeline), the speed of positive feed of a polyethylene pipe in the repaired pipeline is determined.

**Keywords:** field pipelines, polyethylene coiled tubing, stress condition

Основной из причин снижения надежности трубопроводов систем сбора нефти является местная внутренняя коррозия. Коррозия обусловлена высокой обводненностью нефти, достаточно высоким содержанием углекислого газа, наличием механических примесей.

У труб из углеродистой стали, которые традиционно используются в системах сбора нефти и закачки воды, срок службы весьма непродолжительный. Вследствие активной коррозии межремонтные сроки составляют 5–6 лет. Увеличение срока службы трубопроводов возможно благодаря проведению капитальных ремонтов.

В последние годы успешно внедряются способы ремонта трубопроводов с помощью полиэтиленовых труб [1, 2, 3]. Поли-

этиленовую трубу вводят в металлическую, прикрепляя ее к внутренней поверхности с помощью клейкой прослойки. Работы выполняются установками гибких труб (рис. 1). Применение имеющихся установок гибких труб потребовало исследования напряженного состояния полиэтиленовых труб на всех этапах их эксплуатации.

Целью проведения исследований является определение скорости принудительной подачи полиэтиленовой трубы в ремонтируемый трубопровод при условии обеспечения ее прочности.

При применении колтубинговых технологий полиэтиленовая труба испытывает сложное напряженное состояние, при котором необходимо учитывать состояние изгиба, воздействие перерезывающей силы

и усилие протяжки. Материал трубы временно работает в области пластических деформаций из-за относительно небольшого радиуса изгиба. Растягивающее усилие вызывает деформирование трубы, поэтому необходимо определить допустимый угол поворота сечения трубы при растяжении совместно с изгибом, при котором уровень напряжений не превышает предел текучести материала трубы.

Процесс деформирования гибких труб рассматривался по этапам технологического процесса протяжки [4]. На первом этапе труба, намотанная на барабан, подвергается изгибу. Далее труба проходит через направляющую, где она изгибается в обратном направлении. К параметрам режима работы установки гибких труб на барабане относятся: диаметр сердечника барабана, диаметр трубы, толщина стенки трубы.

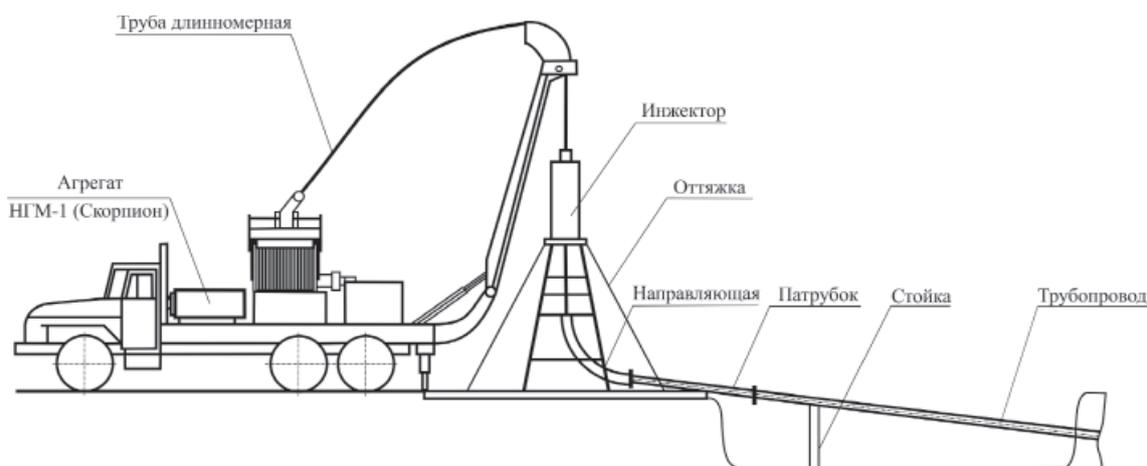


Рис. 1. Схема протяжки полиэтиленовой трубы в стальной трубопровод

Силы, действующие на полиэтиленовую трубу при прохождении по направляющей, представлены на рис. 2. В начале изгиба, при входе в криволинейную направляющую ( $\varphi = 0$ ), и в конце, на выходе из нее ( $\varphi = \pi/2$ ), действует комплекс нагрузок, определяющих краевые условия действия напряжений в полиэтиленовой трубе.

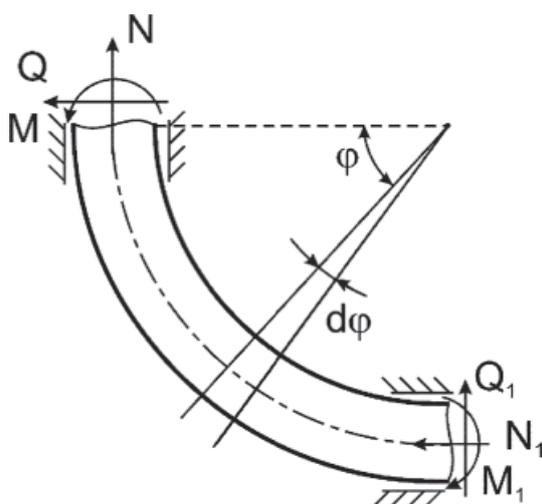


Рис. 2. Схема сил, действующих на трубу при прохождении через направляющую  
 $Q$  – перерезывающая сила,  $N$ ;  $N$  – усилие протяжки,  $M$ ;  $M$  – изгибающий момент,  $N$  –

Для направляющей при непосредственной подаче полиэтиленовой трубы в стальной трубопровод это – радиус направляющей, размеры поперечного сечения трубы, угол поворота сечений в зависимости от растяжения и изгиба.

При восстановлении поврежденных участков стальных трубопроводов полиэтиленовыми трубами способом протяжки с помощью установки гибких труб «Coiled-tubing» необходимо убедиться в возможности использования барабана имеющегося диаметра для намотки на него полиэтиленовой трубы.

Для этого необходимо знать напряженно-деформированное состояние полиэтиленовой трубы на барабане с учетом физической нелинейности работы материала. На основе математической модели напряженного состояния криволинейного стержня в форме дифференциальных уравнений [5] был разработан алгоритм и составлена компьютерная программа на ПЭВМ.

Значение величины напряжений при работе материала длинномерной трубы из полиэтилена на барабане зависит от величины диаметра барабана, а также диаметра самой трубы. Так, при радиусе барабана 500 мм и диаметре трубы 80 мм максимальные напряжения при изгибе на барабане составляют 16,3 МПа, что не превышает предела текучести (21,4 МПа). Расчеты выполнены

при различных параметрах рассматриваемой конструкции. Рекомендуемыми параметрами (радиус барабана, наружный диаметр трубы) являются те из них, при которых расчетные напряжения не превышают допустимых значений предела текучести материала трубы.

На основе анализа результатов расчета напряженного состояния многослойных длинномерных гибких труб, намотанных на барабан, рекомендуются следующие параметры конструкции: при наружном диаметре трубы  $d = 140$  мм и толщине стенки  $h = 16,5$  мм – радиус барабана  $R \geq 700$  мм; при наружном диаметре трубы  $d = 80$  мм и толщине стенки  $h = 11$  мм – радиус барабана  $R \geq 520$  мм.

С учетом того, что стандартный диаметр сердечника барабана установки гибких труб составляет 1700 мм, она может использоваться для выполнения ремонтных работ по восстановлению стальных промысловых трубопроводов.

Наиболее опасным участком разрушения гибких труб при подаче их в стальной трубопровод является направляющая. В работе исследовано напряженное состояние полиэтиленовых труб при прохождении их через направляющую с учетом двух факторов: действия изгиба и растяжения. Расчет напряженного состояния осуществлялся по математической модели [5, 6].

Расчеты проведены в зависимости от радиуса направляющей, размеров поперечного сечения трубы, углов поворота сечений от растяжения и изгиба.

На графиках, представленных на рис. 3, рассмотрено влияние радиуса направляющей на величину напряжений гибкой трубы.

На основе анализа полученных зависимостей можно определить рабочий радиус изгиба направляющей дуги для различных диаметров гибких труб. Критерием оценки является обеспечение напряжений, не превышающих допустимые (предел текучести). При подаче полиэтиленовой гибкой трубы в стальной трубопровод через направляющую дугу необходимо обеспечить совпадение линейной скорости ее движения с линейной скоростью разматывания ее с барабана. Однако возможны некоторые несовпадения этих скоростей из-за неравномерности вращения барабана, изнашивания механизмов и т.д.

Математическая модель расчета напряженного состояния гибкой трубы при ее подаче в трубопровод через направляющую дугу позволяет выполнить расчеты изменения напряжений в зависимости от изменения углов поворота сечений от растяжения, возникающих при несовпадении скорости подачи трубы и скорости вращения барабана.

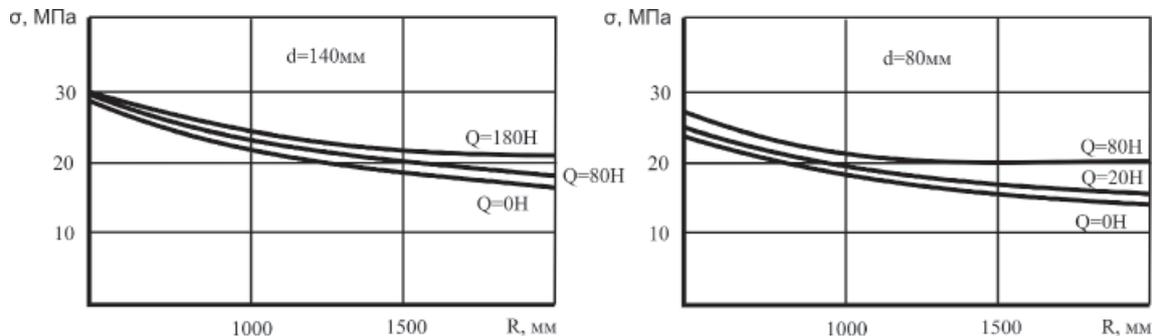


Рис. 3. Зависимость напряжений на участке направляющей от радиуса изгиба  $Q$  – перерезывающая сила;  $R$  – радиус направляющей

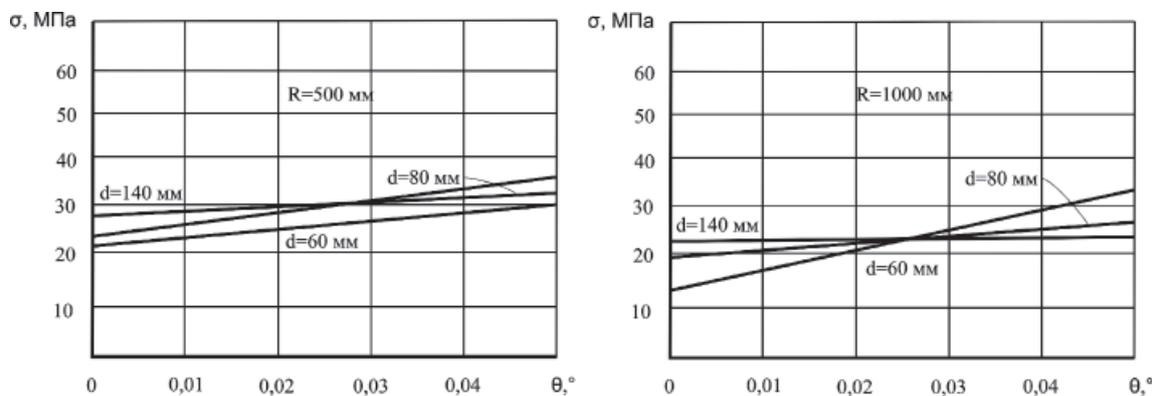


Рис. 4. Зависимость напряжений на участке направляющей при растяжении:  $\theta$  – угол поворота сечения трубы;  $R$  – радиус направляющей

На рис. 4 представлены результаты расчетов влияния на напряжения угла поворота сечений трубы, возникающего при растяжении.

Из зависимостей видно, что при больших радиусах кривизны влияние изменения угла поворота сечений сказывается намного значительнее, чем при меньших радиусах кривизны. Изменение угла поворота на  $0,01^\circ$  при  $R = 1000$  мм и  $d = 60$  мм приводит к напряжениям, равным 18 МПа, а на  $0,05^\circ$  – 34 МПа. В то же время значения напряжений для трубы этого диаметра при  $R = 500$  мм составляют соответственно: на  $0,01^\circ$  – 22 МПа, на  $0,05^\circ$  – 30 МПа. Такая закономерность объясняется тем, что при больших диаметрах направляющей изменение угла поворота трубы на определенный угол приводит к большим ее деформациям, нежели при малых диаметрах этой направляющей.

В целом можно утверждать (рис. 4), что для достижения гарантированного обеспечения требований гибкой армированной трубе по прочностным показателям изменение угла поворота сечения от растягивающих усилий не должно быть более чем  $\theta = 0,01^\circ$ .

Таким образом, исследовано напряженное состояние гибких труб при прохождении через направляющую дугу от радиуса трубы, радиуса направляющей дуги, угла поворота сечения трубы от растяжения. Результаты этих исследований позволяют ориентироваться в выборе рациональных численных значений геометрических (диаметр трубы, радиус изгиба) и кинематических параметров (скорость подачи) исходя из уровня напряжений.

С целью избежания растягивающих усилий необходимо определиться с величиной скорости принудительной подачи трубы ( $V$ ) через направляющую дугу.

В процессе эксплуатации принудительная подача полиэтиленовой трубы в стальной трубопровод осуществляется инжектором при нейтральном положении привода барабана. В случае нештатной ситуации (заклинивания барабана) произойдет удлинение трубы, которое должно быть лимитировано максимально возможным углом поворота сечения трубы ( $\theta = 0,01^\circ = 0,000176$  рад). Если принять кратковременное торможение движения барабана равное  $0,05$  с при этом задаваясь радиусом направляющей дуги, по которой труба подается в трубопровод ( $R = 1,0$  м), то можно найти максимальное расстояние, на которое может переместиться труба, чтобы не превысить указанный угол поворота сечения:

$$\Delta L = \theta \cdot R = 0,000176 \cdot 1000 = 0,176 \text{ мм}$$

и максимально возможную скорость движения транспортера

$$V = \Delta L / t = 0,176 / 0,05 = 3,52 \text{ мм/с} = 0,00352 \text{ м/с} = 12,7 \text{ м/ч.}$$

Таким образом, с позиции обеспечения прочности гибкой армированной трубы и не

возникновения в ней напряжений, превышающих допустимые, можно рекомендовать, чтобы максимальная скорость движения транспортера не превышала  $0,00352$  м/с.

#### Выводы

– рекомендованы параметры сердечника барабана: при наружном диаметре трубы  $d = 140$  мм и толщине стенки  $h = 16,5$  мм – диаметр сердечника барабана  $D \geq 1400$  мм;  
– для достижения гарантированного обеспечения требований гибкой армированной трубе по прочностным показателям изменение угла поворота сечения от растягивающих усилий не должно быть более чем  $\theta = 0,01^\circ$ ;  
– скорость движения транспортера установки гибких труб  $V \leq 0,00352$  м/с.

#### Список литературы

1. Вайншток С.М., Некрасов В.И., Молчанов А.Г. Опыт эксплуатации установок с длиномерной трубой на барабане // Нефть и капитал. – М.: ЗАО Издат. дом «Нефть и капитал». – 1998. – № 1. – С. 71–75.
2. Временный регламент проведения работ при ремонте трубопроводов методом футеровки полиэтиленовой трубой // ООО ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь, ТПП «Когалымнефтегаз». – Когалым. 2002. – 19 с.
3. Зозуля Г.П., Гейхман М.Г., Кустышев А.В. и др. Перспективы применения колтюбинговых технологий при капитальном ремонте скважин // Изв. Вузов. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. – № 6. – С. 55–59.
4. Якубовская С.В., Иванова Е.Ю. Устройство для установки длиномерных гибких труб // Патент России № 43033. 2004. Бюл. № 36.
5. Якубовская С.В., Серебренников Д.А. Математическая модель напряженно-деформированного состояния гибких полиэтиленовых труб // Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – № 6. – С. 37–42.
6. Якубовская С.В., Савченко Н.Ю. Оценка конструктивной надежности муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов // Oil & Gas Journal Russia. – 2011. – № 4. – С. 86.

#### References

1. Vajnshtok S.M., Nekrasov V.I., Molchanov A.G. Opyt jekspluatacii ustanovok s dlinnomernoj truboj na barabane // Neft i kapital. M.: ZAO Izdat. dom «Neft i kapital». 1998. no. 1. pp. 71–75.
2. Vremennyj reglament provedenija rabot pri remonte truboprovodov metodom futerovki polijetilenovoj truboj / ООО LUKOJL Zapadnaja Sibir, TPP «Kogalymneftegaz». Kogalym. 2002. 19 p.
3. Zozulja G.P., Gejhman M.G., Kustyshev A.V. i dr. Perspektivy primenenija koltjubingovyh tehnologij pri kapitalnom remonte skvazhin // Izv. Vuzov. Neft i gaz.- Tjumen: TjumGNGU, 2001. no. 6. pp. 55–59.
4. Jakubovskaja S.V., Ivanova E.Ju. Ustrojstvo dlja ustanovki dlinnomernyh gibkih trub // Patent Rossii no. 43033. 2004. Bjul. no. 36.
5. Jakubovskaja S.V., Serebrennikov D.A. Matematicheskaja model naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija gibkih polijetilenovyh trub // Izvestija vuzov. Neft i gaz. Tjumen: TjumGNGU, 2003. no. 6. pp. 37–42.
6. Jakubovskaja S.V., Savchenko N.Ju. Ocenka konstruktivnoj nadezhnosti muftovyh soedinenij polijetilenovyh truboprovodov // Oil & Gas Journal Russia. 2011. no. 4. pp. 86.

#### Рецензенты:

Двойников М.В., д.т.н., зав. кафедрой «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;  
Мерданов Ш.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Транспортные и технологические системы», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 10.03.2015.