

УДК 62-97/-98

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА БЕСТРАНШЕЙНОГО ТРУБОУКЛАДЧИКА

**Серебренников А.А., Серебренников Д.А., Хакимов З.Р.**

*ФГБОУ ВО «Тюменский государственный индустриальный университет»,  
Тюмень, e-mail: general@tsogu.ru*

Одним из вариантов сооружения водо- и газопроводов между населенными пунктами является способ бестраншейной прокладки полиэтиленовых труб за счет использования специальной техники, рабочий процесс которой основан на использовании упругих свойств полиэтилена. Прямо из транспортировочной бухты труба укладывается на нужную глубину за счет рабочего органа трубоукладчика. При этом полиэтиленовая труба подвергается кратковременному изгибу, испытывая значительные деформационные воздействия. Кроме того, тяга базовой машины создает растягивающие усилия. Несмотря на эти воздействия должны быть гарантированно сохранены физико-механические характеристики трубы после прокладки. В статье изложены результаты изучения допустимых нагрузок на полиэтиленовые трубопроводы различных диаметров. Разработана математическая модель, проведены и экспериментально проверены аналитические расчеты напряженного состояния полиэтиленовой трубы. Сформулированы требования, необходимые для обеспечения эксплуатационных качеств сооруженного трубопровода.

**Ключевые слова:** бестраншейный трубоукладчик, полиэтиленовая труба, физико-механические характеристики, математическая модель, аналитические расчеты, экспериментальные исследования

## TO DETERMINATION OF PARAMETERS OF WORKING BODY TRENCHLESS OF THE PIPE-LAYER

**Serebrennikov A.A., Serebrennikov D.A., Khakimov Z.R.**

*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen»,  
Tyumen, e-mail: general@tsogu.ru*

One option for the construction of water and gas pipelines between settlements is a process for trenchless laying of polyethylene pipe through the use of special equipment, workflow which is based on the elastic properties of the polyethylene. The pipe keeps within on the necessary depth at the expense of working body of the pipe-layer. the polyethylene pipe is exposed to a short-term bend, experiencing considerable deformation influences. In addition, the thrust base machine creates tensile forces. Physicomechanical characteristics of a pipe after laying have to be guaranteed kept. The article presents the results of the study of allowable loads on the plastic pipes of different diameters. A mathematical model and experimentally verified performed analytical calculations of the stress state of the polyethylene pipe. The formulated requirements necessary to ensure the performance of the construction of pipelines.

**Keywords:** trenchless pipe-layer, polyethylene pipe, the physical and mechanical characteristics, mathematical model, analytical calculations, experimental studies

При выборе способа сооружения трубопровода в первую очередь руководствуются экономической целесообразностью, особенностью рельефа местности и грунтовых условий, наличием на пути строительства трубопровода инженерных сооружений, климатических условий, удобства дальнейшего обслуживания и т.д. [1].

Процесс сооружения полиэтиленовых трубопроводов, в отличие от металлических, может иметь характерные только для них способы прокладки, основанные на специфических физических свойствах полиэтилена (упругость, пластичность, ударостойкость). В частности, широкое распространение получили способы бестраншейной прокладки, использование которых обусловлено упругостью трубы. Применяемые для реализации такого способа оригинальные машины и устройства, используя эти свойства, не должны создавать нагрузки, превышающие предельные

значения, при которых ухудшатся эксплуатационные качества сооруженного трубопровода (надежность, долговечность) [2, 3].

Мировые и российские компании имеют продолжительный опыт строительства и эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов. При этом значительное внимание уделяется совершенствованию техники и технологии производства работ.

Известно, что в тех случаях, когда на пути строящегося трубопровода отсутствуют инженерные сооружения и другие препятствия (например, между населенными пунктами), целесообразно использование специальных механизмов [4, 5], осуществляющих погружение трубы на нужную глубину за один проход.

В частности, изготовлено и испытано технологическое средство (рис. 1), представляющее собой базовую машину, на которой располагается бухта (1) с полиэтиленовой трубой (4). Сзади располагается

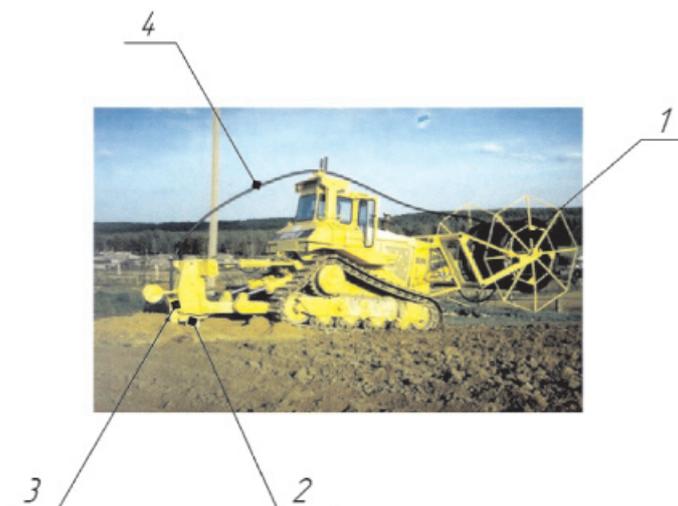


Рис. 1. Общий вид бестрапцовой трубоукладчика

нож-рыхлитель (2) и короб (3), в который подается труба по мере продвижения машины, оказываясь на нужной глубине закладки, задаваемой ножом-рыхлителем.

При использовании такой техники полимерная труба подвергается кратковременному изгибу и испытывает значительные напряжения (деформационные воздействия).

Известно требование, в соответствии с которым полиэтиленовые трубы могут изгибаться, наматываясь на бухты, диаметр которых должен быть не менее 20 диаметров самой трубы ( $D_{\text{бухты}} \geq 20d_{\text{трубы}}$  или  $d_{\text{трубы}} / D_{\text{бухты}} \leq 5\%$ ). Это требование гарантирует, что при транспортировке и хранении такой изгиб не повлияет на прочностные характеристики трубы, т.е. после сматывания с бухты труба не будет деформирована. Однако выполнение такого соотношения при конструировании рабочего оборудования трубоукладчика привело бы к значительному увеличению размеров направляющего короба и, следовательно, усилий, необходимых для его продвижения в грунте.

Таким образом, необходимо изучение возможности кратковременных изгибов трубы на меньшие радиусы при гарантированном обеспечении требуемых физико-механических характеристик. Кроме того, необходимо знание прилагаемых при этом нагрузок, которые требуются с целью расчетов напряжений, возникающих в трубе и для определения тягового усилия базового трактора [4, 5, 6].

Изучение прочностных характеристик полиэтиленовой трубы при изгибе проводилось в сертифицированной лаборатории завода «Сибгазаппарат» (г. Тюмень) – одном из крупнейших предприятий по производству полиэтиленовых труб в России. С этой целью было изготовлено приспособление, которое устанавливалось на силовую установку (рис. 2).

На первом этапе проводились статические испытания (рис. 2, а). Образец устанавливался на приспособление и закреплялся одним концом полиэтиленовой трубы на быстроразъемной опоре при помощи струбцин. Другой конец трубы во время эксперимента прижимался к направляющей по всей поверхности изгиба подвижной траверсой за счет тяговой системы.

Авторами исследований разработана и обоснована методика [7, 8], в основе которой обратимость деформации принята в качестве критерия отсутствия нарушений физико-механических характеристик после приложения изгибающей нагрузки. Обратимость деформации доказывалась через выполнение условий обеспечения возврата:

- 1) до величины первоначальных размеров диаметра деформируемой трубы;
- 2) до соотношения  $d_{\text{трубы}} / D_{\text{бухты}} \leq 5\%$  величины прогиба трубы.

На втором этапе проводились динамические испытания с целью проверки обратимости деформации при движении трубы. Направляющая переворачивалась в приспособлении для изгиба (рис. 2, б). Труба крепилась к подвижной траверсе одним концом и протягивалась изгибаясь по направляющей. Силовой измерительной системой фиксировались величины усилий, необходимые для принудительной подачи полиэтиленовых труб с различным диаметром по направляющим с разными радиусами изгиба этих труб.

Величина усилия в каждом конкретном случае позволяла определить величину изгибающего момента:

$$M = N_s \left( R + \frac{d}{2} \right) + Q \left( R + \frac{d}{2} \right) = N \left( R + \frac{d}{2} \right) \cdot (\cos \varphi + \sin \varphi). \quad (1)$$

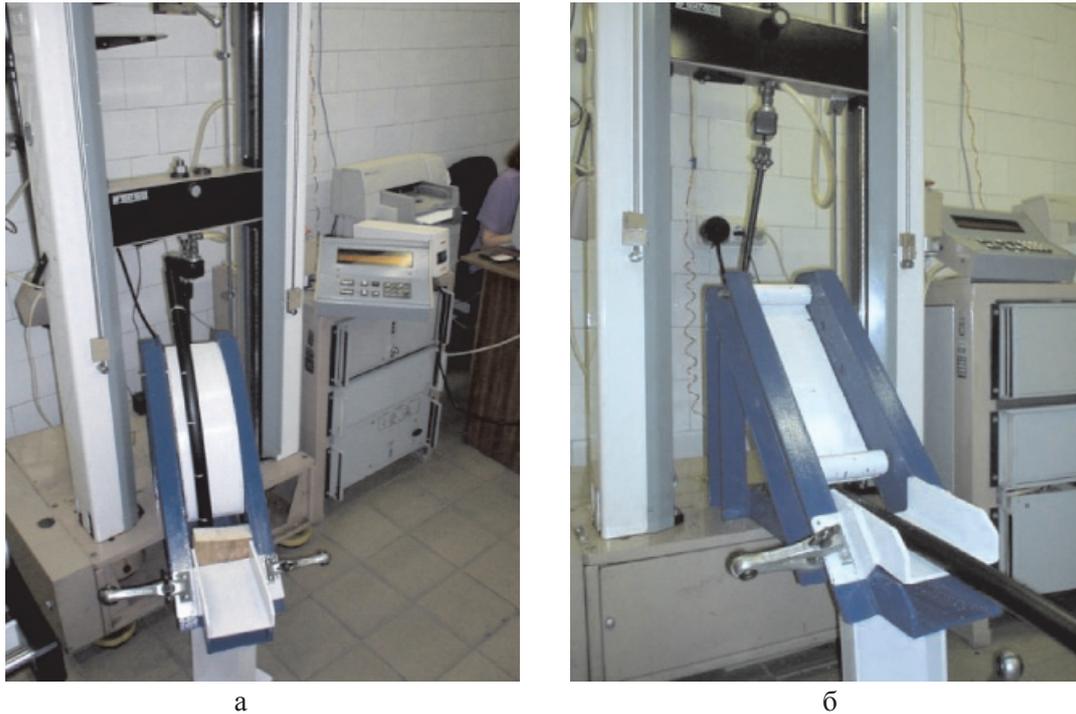


Рис. 2. Установка для проведения испытаний:  
 а – статические испытания; б – динамические испытания;  
 1 – приспособление для изгиба; 2 – силовая установка; 3 – подвижная траверса;  
 4 – силоизмерительная система

Далее рассчитывались возникающие в трубе напряжения по зависимости

$$\sigma_s = \frac{Mz}{KJ} \left[ 1 - \beta \left( \frac{z}{r} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $z$  – координата по высоте поперечного сечения трубы;  $K$  – коэффициент снижения жесткости сечения;  $J$  – осевой момент инерции;  $b$  – коэффициент сплющивания;  $r$  – наружный радиус исследуемого образца трубы.

Учет влияния сплющивания тонкостенного сечения при изгибе на зависимость между изгибающим моментом и изменением кривизны осуществляется коэффициентом снижения жесткости сечения ( $K$ ), который определялся из выражения

$$K = \frac{1 + 12\lambda^2}{10 + 12\lambda^2}, \quad (3)$$

где  $l$  – геометрический коэффициент трубы.

В свою очередь геометрический коэффициент трубы ( $l$ ) может быть рассчитан по формуле

$$\lambda = \frac{\delta R}{r^2}, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус кривизны кронштейна;  $r$  – наружный радиус исследуемого образца трубы.

Коэффициент сплющивания ( $b$ ) учитывает тот факт, что координата ( $z$ ) по высоте поперечного сечения трубы изменяет свою величину относительно нейтральной оси и определяется по соотношению

$$\beta = \frac{6}{5 + 6\lambda^2}. \quad (5)$$

Динамические испытания образцов труб с различными диаметрами позволили проверить достоверность аналитических расчетов, сравнив их с результатами экспериментальных исследований.

Для аналитического определения напряжений, возникающих в полиэтиленовых трубах разного диаметра при изгибах, была разработана математическая модель и алгоритм расчета. Поскольку длина трубы намного превышает ее диаметр, то в основу вывода уравнений положена теория криволинейных стержней и кривых тонкостенных труб.

Учет нелинейных свойств материала трубы производился через переменный (сжимающий) модуль ( $E_c$ ), который определялся по следующему соотношению [7]:

$$E_c = \frac{E_0}{1 + b\sigma_{in}^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{in}$  – интенсивность напряжений;  $E_0$  – мгновенный модуль упругости материала;

$b$  – коэффициент зависимости жесткости материала от деформации.

Интенсивность напряжений может быть определена из формулы

$$\sigma_{in} = \sqrt{\frac{\sigma^2 + \sigma_T^2}{2}}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжения по оси трубы;  $\sigma_T$  – радиальные напряжения, отсутствующие при сооружении трубопровода, но возникающие при наличии внутреннего давления в период эксплуатации.

Если рассмотреть элемент кривого стержня кольцевого сечения длиной  $dS$  (рис. 3), то напряжения связаны с деформацией при изгибе зависимостью

$$\sigma = E_c \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

где  $E_c$  – секущий модуль, МПа;  $\varepsilon$  – относительная деформация.

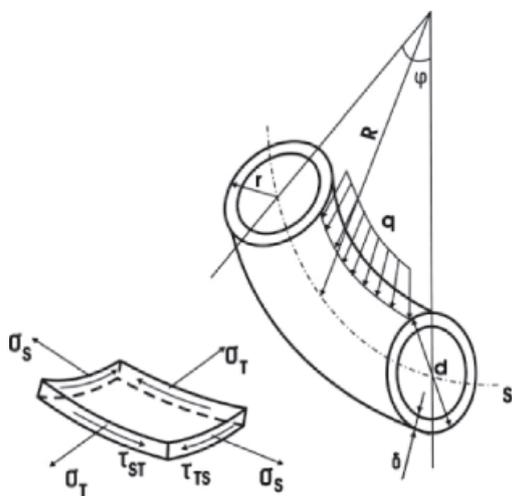


Рис. 3. Напряжения, действующие на элемент трубы

Относительная деформация является совокупностью относительных деформаций:  $\varepsilon_r$  – при изгибе прямого участка трубы;  $\varepsilon_s$  – от изгибных нагрузок искривленного участка трубы;  $\varepsilon_N$  – от действия растягивающего усилия ( $N$ );  $\varepsilon_M$  – от действия изгибающего момента ( $M$ ).

Специально составленная программа позволила провести на ПЭВМ аналитический расчет полиэтиленовых труб на прочность с учетом пластических деформаций [8, 9].

Значения напряжений, полученных в результате экспериментов, сравнивались со значениями, полученными в результате аналитических расчетов.

В результате комплекса исследований установлена зависимость (рис. 4), позволяющая задавать параметры рабочего органа бестраншейного трубоукладчика.

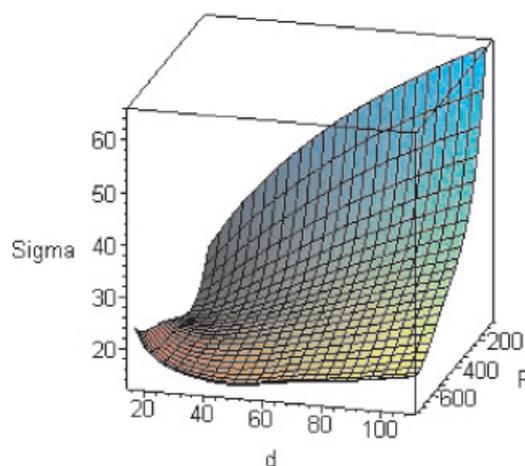


Рис. 4. Изменение напряжений (Sigma) для труб различного диаметра ( $d$ ) в зависимости от радиуса направляющего короба ( $R$ )

Доказана возможность использования техники, осуществляющей прокладку полиэтиленовой трубы с кратковременным изгибом выше значений, регламентированных условиями хранения и транспортировки ( $D_{\text{бухты}} \geq 20d_{\text{трубы}}$  или  $d_{\text{трубы}} / D_{\text{бухты}} \leq 5\%$ ).

Экспериментально подтверждено, что условием не нарушений физико-механических характеристик полиэтиленовой трубы является полная обратимость ее деформации после приложения изгибной нагрузки.

Экспериментально доказана правомерность аналитических расчетов, устанавливающих значения напряжений в зависимости от радиусов изгиба, для полиэтиленовых труб различного диаметра [10].

#### Список литературы

1. Антипов В.Н., Бахмат Г.В., Земенков Ю.Д. и др. Эксплуатация магистральных газопроводов. – Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2002. – 528 с.
2. Лавров И.Г., Серебrenников Д.А. Анализ конструкций машин и устройств для бестраншейной прокладки полиэтиленовых трубопроводов // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Тюмень, 2012. – С. 247–251.
3. Серебrenников Д.А., Лавров И.Г., Хакимов З.Р. Использование машин с плужным рабочим органом при сооружении полиэтиленовых трубопроводов // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2012. – С. 344–348.
4. Серебrenников А.А., Курочкин С.Г. Устройство для бестраншейной прокладки полиэтиленовых трубопроводов // Эксплуатация и обслуживание транспортно-технологических машин: межвузовский сборник научных трудов. – Тюмень, 2003. – С. 174–176.
5. Иванов В.А., Кочурова В.В., Серебrenников Д.А. Устройство для бестраншейной прокладки полиэтиленовых трубопроводов / Патент России RUS 2237783 21.01.2003.

6. Серебренников А.А., Хакимов З.Р. Методика и результаты определения силы сопротивления продвижению рабочего органа бестраншейного трубоукладчика // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 382.

7. Серебренников Д.А. Обоснование рабочих параметров машины для бестраншейной прокладки полиэтиленовых газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2004.

8. Серебренников Д.А., Лавров И.Г. Методика эксперимента по определению изгибных напряжений полиэтиленовых трубопроводов // Интерстроймех-2005: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2005. – С. 130–134.

9. Лавров И.Г., Серебренников Д.А. Экспериментальная оценка величины деформации полиэтиленовых труб при изгибе // Проблемы эксплуатации систем транспорта: сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, посвященной 45-летию со дня основания Тюменского индустриального института им. Ленинского комсомола / отв. ред. В.И. Бауэр. – 2008. – С. 178–181.

10. Серебренников А.А., Лавров И.Г., Хакимов З.Р., Колесников Р.А. выбор и обоснование методик расчета сил сопротивления, возникающих при прокладке полиэтиленовых трубопроводов машинами с ножевым рабочим органом // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. Е.А. Григорьян. – 2010. – С. 172–174.

### References

1. Antipev V.N., Bahmat G.V., Zemenkov Ju.D. i dr. Jekspluatacija magistralnyh gazoprovodov. Tjumen: Izd-vo «Vektor Buk», 2002. 528 p.

2. Lavrov I.G., Serebrennikov D.A. Analiz konstrukcij mashin i ustrojstv dlja bestranshejnoj prokladki polijetilenovyh truboprovodov // Problemy funkcionirovanija sistem transporta: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh. Tjumen, 2012. pp. 247–251.

3. Serebrennikov D.A., Lavrov I.G., Hakimov Z.R. Ispolzovanie mashin s pluzhnyhym rabochim organom pri

sooruzhenii polijetilenovyh truboprovodov / Problemy funkcionirovanija sistem transporta: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh. Tjumen: Izd-vo TjumGNGU, 2012. pp. 344–348.

4. Serebrennikov A.A., Kurochkin S.G. Ustrojstvo dlja bestranshejnoj prokladki polijetilenovyh truboprovodov // Jekspluatacija i obsluzhivanie transportno-tehnologicheskijh mashin: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Tjumen, 2003. pp. 174–176.

5. Ivanov V.A., Kochurova V.V., Serebrennikov D.A. Ustrojstvo dlja bestranshejnoj prokladki polijetilenovyh truboprovodov / Patent Rossii RUS 2237783 21.01.2003.

6. Serebrennikov A.A., Hakimov Z.R. Metodika i rezultaty opredelenija sily soprotivlenija prodvizheniju rabocheho organa bestranshejnogo truboukladchika // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzhja. 2012. no. 6. pp. 382.

7. Serebrennikov D.A. Obosnovanie rabochih parametrov mashiny dlja bestranshejnoj prokladki polijetilenovyh gazoprovodov: dis. ... kand. tehn. nauk. Tjumen, 2004.

8. Serebrennikov D.A., Lavrov I.G. Metodika jeksperimenta po opredeleniju izgibnyh naprjazhenij polijetilenovyh truboprovodov // Interstrojmeh-2005: sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. Tjumen, 2005. pp. 130–134.

9. Lavrov I.G., Serebrennikov D.A. Jeksperimentalnaja ocenka velichiny deformacii polijetilenovyh trub pri izgibe // Problemy jekspluatacii sistem transporta: sbornik materialov vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 45-letiju so dnja osnovanija Tjumenskogo industrialnogo instituta im. Leninskogo komsomola / отв. ред. V.I. Baujer. 2008. pp. 178–181.

10. Serebrennikov A.A., Lavrov I.G., Hakimov Z.R., Kolesnikov R.A. vybor i obosnovanie metodik rascheta sil soprotivlenija, vznikajushhijh pri prokladke polijetilenovyh truboprovodov mashinami s nozhevym rabochim organom // Novye tehnologii neftegazovomu regionu: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchennyh / pod obshh. red. E.A. Grigorjan. 2010. pp. 172–174.