УДК 622.692.4.07

https://doi.org/10.24411/0131-4270-2020-10409

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПРОТАСКИВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРУБОПРОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ НАКЛОННО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ

METHOD FOR PREDICTING TRACTION FORCES IN THE CONSTRUCTION OF PIPELINE CROSSINGS BY HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING

Р.Д. Овчинников, Р.Р. Хасанов

Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, г. Уфа, Россия

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4737-7185 E-mail: roma.4ufa@yandex.ru

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6244-7532 E-mail: hasanov25@mail.ru

Резюме: Целью работы является совершенствование методики определения усилия протаскивания при проектировании трубопроводных переходов. Авторами выполнен анализ трех существующих методик расчета усилия протаскивания трубопровода при строительстве переходов наклонно направленным бурением: методика АО «Гипротрубопровод», методика канадского Университета Уотерлоу, методика согласно СП 42-101-2003. В результате сравнения результатов расчетов по существующим методикам с фактическими значениями усилий протаскивания были выявлены преимущества и недостатки методик, влияющие на конечный результат расчета. Авторами была предложена собственная методика расчета усилия протаскивания трубопровода. При сравнении результатов расчетов с фактическими значениями усилий уже построенных переходов средняя погрешность расчета по предложенной методике оказалась наиболее точной среди существующих методик и составила 16%.

Ключевые слова: горизонтально направленное бурение, наклонно направленное бурение, трубопровод, усилие протаскивания, моделирование.

Для цитирования: Овчинников Р.Д., Хасанов Р.Р. Определение усилия протаскивания при строительстве трубопроводных переходов методом наклонно направленного бурения // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 4. С. 49–56.

DOI:10.24411/0131-4270-2020-10409

Roman D. Ovchinnikov, Rustyam R. Khasanov

Ufa State Petroleum Technological University, 450062, Ufa, Russia

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4737-7185, E-mail: roma.4ufa@yandex.ru

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6244-7532, E-mail: hasanov25@mail.ru

Abstract: The aim of the work is to improve the methodology for determining the pulling force in the design of pipeline crossings. The authors performed an analysis of the three existing methods for calculating the pulling force of a pipeline during the construction of crossings by tilt directional drilling: the method of Giprotruboprovod JSC, the methodology of the Canadian University of Waterloo, the methodology according to SP 42-101-2003. As a result of comparing the results of calculations by existing methods with the actual values of pulling efforts, the advantages and disadvantages of the methods that affect the final result of the calculation were identified. The authors proposed their own methodology for calculating the pulling force of the pipeline. When comparing the calculation results with the actual values of the efforts of already constructed transitions, the average calculation error by the proposed method turned out to be the most accurate among existing methods and amounted to 16%.

Keywords: horizontal directional drilling, tilt directional drilling, pipeline, pulling force, modeling.

For citation: Ovchinnikov R.D., Khasanov R.R. METHOD FOR PREDICTING TRACTION FORCES IN THE CONSTRUCTION OF PIPELINE CROSSINGS BY HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING. Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons. 2020, no. 4, pp. 49–56.

DOI:10.24411/0131-4270-2020-10409

Трубопроводный транспорт нефти и газа – важнейшая и неотъемлемая составляющая топливно-энергетического комплекса России. На всем своем протяжении трубопроводные магистрали пересекают множество различных естественных и искусственных препятствий, основную часть данных пересечений составляют подводные переходы трубопроводов через водные препятствия (реки, озера, водохранилища). Примерно 94% всех подводных переходов прокладывается по траншейным технологиям. Однако ввиду ряда недостатков открытого (траншейного) способа строительства, к нему на смену приходят закрытые способы строительства, одним из таких является метод наклонно направленного бурения (ННБ).

При строительстве трубопроводных переходов по методу ННБ основными технологическими операциями являются: 1) бурение пилотной скважины; 2) расширение скважины до проектного диаметра; 3) калибровка скважины; 4) протаскивание рабочего трубопровода в скважину [1].

Процесс протаскивания трубы в скважину является одной из наиболее ответственных технологических операций строительства перехода. Остановка протаскивания из-за обрушения стенок скважины, резкого увеличения усилий и обрыва колонны может привести к сложным аварийным работам.

Проблемы определения усилия протаскивания трубопровода в скважину в основном связаны с неточностью применяемых расчетных моделей, недооценка реальных условий строительства приводит к тому, что в 10% случаев сооружения переходов возникают трудности с протаскиванием трубопровода.

С целью увеличения надежности и уменьшения риска удорожания строительства перехода в настоящей работе предлагается разработать новую методику расчета усилия протаскивания трубопровода и применять ее на этапе проектирования.

Для того чтобы теоретическое значение усилия протаскивания имело наименьшую погрешность по отношению к фактическому, в расчете необходимо учесть условия прокладки (характеристики грунта и буровой промывочной жидкости), геометрию перехода, а также усилие на протаскивание буровых штанг.

Расчет проектного усилия протаскивания трубопровода при сооружении переходов методом ННБ с наименьшей погрешностью к фактическому значению усилия является актуальной задачей для трубопроводного транспорта.

В настоящей работе авторами представлена методика расчета усилия протаскивания, которая позволит снизить вероятность ошибки при определении усилия протаскивания, что в перспективе приведет к увеличению надежности всей трубопроводной системы.

Применение предложенной расчетной методики на практике даст возможность минимизировать риски при реализации проекта перехода методом ННБ. Усилие протаскивания, рассчитанное с наименьшей погрешностью, делает возможным прогноз напряженно-деформированного состояния трубопровода на этапе проектирования перехода. Буровая установка, подобранная без неоправданно завышенного запаса по тяговому усилию, позволит снизить себестоимость проекта за счет применения менее дорогостоящего бурового оборудования.

Существующие расчетные методики определения усилия протаскивания имеют существенные различия в моделировании поведения трубопровода. Вследствие этого значения усилий протаскивания, получаемые при расчетах для одинаковых условий строительства перехода (диаметр трубопровода и скважины, геометрия скважины и др.) значительно отличаются. Следует провести анализ методик расчета усилия протаскивания и выяснить преимущества и недостатки рассматриваемых методов.

В России используется две основные методики определения усилия протаскивания: 1) методика расчета согласно СП 42–101-2003 [2]; 2) методика АО «Гипротрубопровод» [3]. За рубежом наиболее распространена методика расчета усилия протаскивания трубопровода канадского Университета Уотерлоу [4].

Для того чтобы провести сравнительный анализ между тремя существующими методиками, были выполнены расчеты для уже построенного перехода нефтегазосборного стального трубопровода Приобского месторождения через реку Евьяха методом ННБ (трубопровод диаметром D = 530 мм, толщиной стенки δ = 10 мм, протяженностью L = 844,5 м и фактическим усилием протаскивания T = 450 кН).

Результаты расчета изображены на графике зависимости величины усилия протаскивания от протяженности перехода (рис. 1).

Исходя из расчета следует, что усилие протаскивания по СП 42-101-2003 (4824 кН) дает наибольшую погрешность в сравнении с фактическим значением. Связано это с тем, что основным параметром, формирующим сопротивление протаскиванию, является увеличение силы трения от силы тяжести грунта зоны естественного свода равновесия.

Одним из решающих факторов высокой погрешности методики СП 42-101-2003 является учет в расчетной модели свода естественного обрушения, согласно теории М.М. Протодьяконова для благоприятных и неблагоприятных условий [5]. Его наличие приводит к аномально большому увеличению силы трения. Для более точных расчетов необходимо знать достоверные данные инженерно-геологических изысканий.

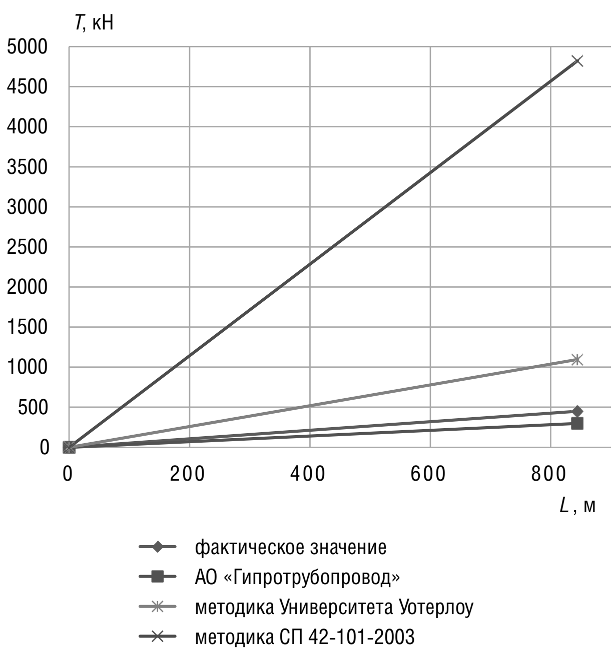
Методика, разработанная Канадским университетом Уотерлоу, в этом отношении более приемлема, так как расчетная модель основывается на упрощении профиля ствола скважины и замене криволинейных участков прямолинейными с известными углами наклона. Однако в данной методике возникает трудность достоверной оценки геометрических характеристик трубопровода при прохождении угловых участков ствола скважины, необходимых для расчета.

Расчетное значение по методике университета Уотерлоу составило 1096,5 кН, что значительно больше, чем фактическое. Однако эта методика дает в данном случае погрешность 144%, а результат по СП 42-101-2003 – 972%.

Высокая погрешность по методике университета Уотерлоу связана с большим количеством факторов. Жесткость трубопровода при изгибе, его вес и изменения направления ствола скважины создают силы, приводящие к контакту трубопровода и грунта, что, в свою очередь, приводит к возникновению сил трения. Значения контактных напряжений зависят от геометрических характеристик скважины, величины межстенного пространства трубы и скважины, способности грунта к деформациям и веса трубы в буровом растворе. Допущения, принимаемые при расчетах, моделируют более жесткие условия, чем в действительности. Использование данной методики всегда приводит к большему расчетному усилию, чем натурное [6].

Относительно небольшую погрешность в расчете показала методика АО «Гипротрубопровод» (33,67%) со значением

Рис. 1. *Зависимость величины усилия протаскивания от протяженности перехода (р. Евьяха)*



усилия протаскивания 298,5 кН. Сопоставление результатов расчетов усилия протаскивания показывает, что полученные значения, определенные по различным методикам, имеют расхождение в несколько раз, что связано с принципиальными различиями расчетных моделей.

Исследование методик расчетов усилия протаскивания, применяемых в России (методика АО «Гипротрубопровод» и СП 42-101-2003) показало зависимость расчетного усилия протаскивания от наличия и количества прямолинейных и криволинейных сегментов ствола скважины. Следовательно, выбор методики для проведения расчетов необходимо производить на основании проектируемого профиля ствола скважины. Методика Университета Уотерлоу, согласно расчетной модели, упрощает профиль до прямолинейных участков с определенными углами наклона, тем самым моделируя более жесткие, чем в действительности, условия [7].

Расчетная модель методики АО «Гипротрубопровод» на прямолинейных участках учитывает усилия на преодоление трения трубопровода о стенки скважины, а также о буровой раствор. На искривленных участках дополнительно учитывается воздействие контактных сил от прижатия трубопровода к стенкам скважины, но не учитываются активные и пассивные силовые факторы, а также то, как меняется их значение в зависимости от изменения угла наклона протаскиваемого участка плети.

В предлагаемой нами методике расчета усилий протаскивания траектория скважины рассматривается не как последовательность прямолинейных и искривленных участков, а как кривая линия, дифференцированная на отрезки элементарной длины, имеющие различный наклон к линии горизонта, без разрыва сплошности самой линии. В качестве допущения принимается то, что силы реакции при взаимодействии трубопровода со стенкой скважины не влияют на значение тянущего усилия (то есть между трубой и скважиной не возникает распорных усилий).

Ввиду особенностей принятой на сегодняшний день технологии бурения наклонно направленных скважин, для каждого профиля перехода характерно наличие прямолинейных участков на входе и выходе скважины из массива грунта, а также наличие одного или нескольких искривленных участков (радиус упругого изгиба – $R \geq 1200 \cdot DN$ [8]). В зависимости от параметров перехода (длины в плане, глубины залегания трубопровода) различают два вида траектории бурения:

1-й вид – профиль из двух граничных прямолинейных участков и центрального искривленного по радиусу участка (три участка – рис. 2);

2-й вид – профиль из двух граничных прямолинейных участков, двух граничных искривленных участков и центрального прямолинейного участка (пять участков – рис. 3).

Вид траектории скважины ННБ будет влиять на конечный результат расчета усилия протаскивания.

При протаскивании трубопровода с помощью буровой установки методом «на себя» буровые штанги выбираются из скважины, а рабочий трубопровод попадает в скважину. В результате этого по мере увеличения длины протаскиваемого трубопровода усилие протаскивания буровых штанг уменьшается, а усилие на протаскивание трубопровода увеличивается.

Максимальное значение расчетных тяговых усилий при протаскивании буровых штанг соответствует начальному этапу протаскивания, и к завершению протаскивания оно снижается до значения, близкого к нулю.

Максимальное значение расчетных тяговых усилий при протаскивании трубопровода соответствует конечному этапу ввиду того, что методика расчета не учитывает возникновение дополнительных сопротивлений протаскиванию, обусловленных изменением кривизны скважины, сужением ее ствола за счет обрушений грунта и осаждения крупных фракций в нижней точке скважины.

Осевое тянущее усилие (T_i) (усилие протаскивания), возникающее на буровой установке при протаскивании, складывается из усилий на преодоление сил трения между: трубопроводом и стенками скважины; трубопроводом и струйным сопротивлением бурового раствора, текущего в свободной полости ствола скважины; буровыми штангами и стенками скважины; буровыми штангами и струйным сопротивлением бурового раствора, текущего в свободной

Рис. 2. *Схема продольного профиля скважины ННБ (1-й вид): L_1 – длина прямолинейного участка на входе скважины, м; L_3 – длина прямолинейного участка на выходе скважины, м; $L_{кр2}$ – длина центрального искривлённого участка скважины, м; R – радиус искривления, м; $\alpha_{вх}$ – угол входа оси скважины, относительно горизонта; $\alpha_{вых}$ – угол выхода оси скважины*

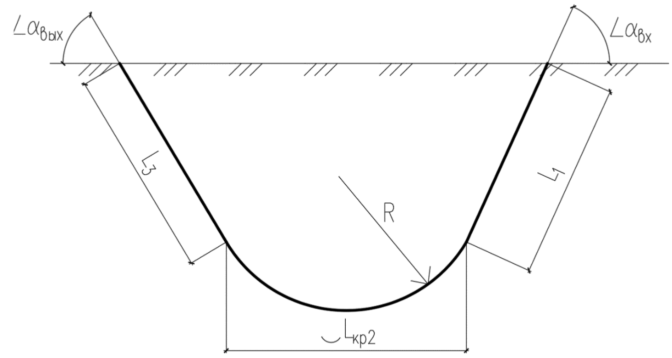
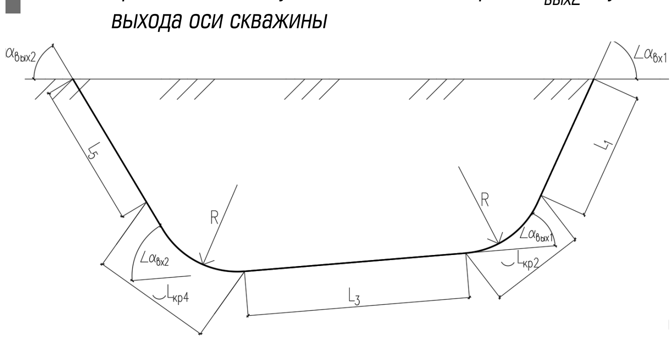


Рис. 3. *Схема продольного профиля скважины ННБ (2-й вид): L_1 – длина прямолинейного участка на входе скважины, м; L_3 – длина центрального прямолинейного участка, м; L_5 – длина прямолинейного участка на выходе скважины, м; $L_{кр2}$, $L_{кр4}$ – длины искривлённых участков скважины, м; R – радиус искривления, м; $\alpha_{вх1}$ – угол входа оси скважины (относительно горизонта), град; $\alpha_{вых1} = \alpha_{вх2}$ – угол наклона оси центрального прямолинейного участка скважины, град; $\alpha_{вых2}$ – угол выхода оси скважины*



полости ствола скважины; расширителем (риммером) и стенками скважины; замками бурильной колонны и стенками скважины (рис. 4).

Разбиение кривой линии на множество отрезков позволит более полно оценить влияние геометрии скважины (угол входа, угол выхода, упругий изгиб в вертикальной плоскости) на слагаемые усилия протаскивания, учитывая для каждого конкретного участка факторы, увеличивающие (пассивные) и уменьшающие (активные) усилие протаскивания.

Предлагаемый аналитический метод расчета усилия протаскивания трубопровода основывается на модели, аналогично методике АО «Гипротрубопровод», в основу которой положено взаимодействие трубопровода с криволинейными поверхностями ствола скважины, трения трубы, вызванного его весом, струйного сопротивления бурового раствора и изменения направления в угловых участках ствола скважины.

Установлены следующие допущения:

- ствол скважины состоит из прямолинейных участков с определенными углами наклона каждого сегмента;
- грунт принят абсолютно жесткой средой, то есть он не деформируется и не обваливается при взаимодействии с трубопроводом;
- между трубой и скважиной не возникает распорных усилий.

После проведения операции дифференцирования траектории скважины на отрезки определенной длины с собственным значением угла наклона к горизонту производится операция суммирования элементарных усилий протаскивания на отдельных отрезках по длине всего перехода.

Методика расчета позволяет вычислять усилия протаскивания как пустотелых трубопроводов, так и заполненных водой.

При расчетах используется эквивалентный вес единицы длины трубопровода. В этой характеристике учитывается заполнение трубопровода жидким балластом и действие выталкивающих сил при погружении трубопровода в жидкость (рис. 5).

Усилие протаскивания определяется для конечного момента протягивания трубопровода, то есть когда весь трубопровод находится в скважине, а колонна буровых штанг на берегу.

В общем виде формула по определению суммарного усилия протаскивания записывается так:

$$T = \sum_{c_i=0}^{L} (T_i) + T_0 + Q_{з.шт} + T_p, \qquad (1)$$

где T_0 – усилие, которое требуется приложить на начальном этапе протаскивания к трубопроводу, находящему вне скважины. Определяется по сопротивлению перемещению трубы, остающейся на роликах спусковой дорожки или на спусковой грунтовой дорожке, Н; $Q_{з.шт}$ – контактное усилие на замке буровой колонны, Н; T_p – растягивающее усилие, возникающее на расширителе в результате действия неуравновешенного давления бурового раствора на отверстия расширителя [9], Н; L – протяженность перехода по продольному профилю, м; T_i – усилие протаскивания на каждом элементарном участке (отрезке) c_i, Н.

Рис. 4. *Схема протаскивания трубопровода в скважину при ННБ*

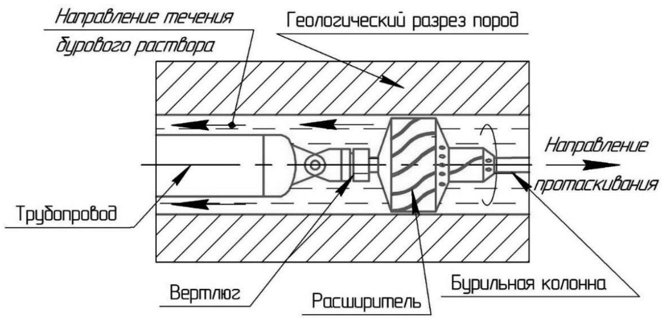
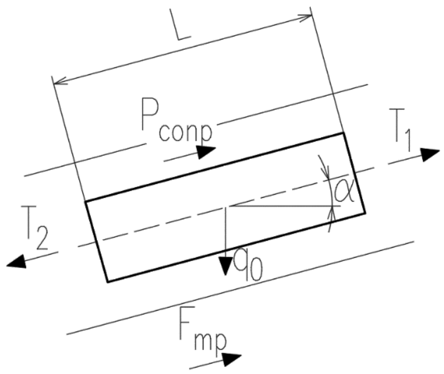


Рис. 5. *Расчетная схема участка трубопровода в скважине при протаскивании: T_2 – натяжение в левом конце участка, требуемое для преодоления сопротивления трению, T_1 – натяжение в правом конце отрезка, может быть нулевым или определяться по сопротивлению перемещению трубы, остающейся на роликах; $F_{ТР}$ – сила трения между трубой и грунтом; $P_{СОПР}$ – гидравлическое сопротивление между трубой и вязким буровым раствором; q_0 – эквивалентный вес единицы длины трубопровода; α – угол наклона оси прямолинейного отрезка относительно горизонтали; L – длина участка*



$$T_i = T_{i.тр.ТП} + P_{i.бр.ТП} + T_{i.тр.шт} + P_{i.бр.шт}, \qquad (2)$$

где $T_{i.тр.ТП}$ – сила трения между трубой и грунтом на каждом элементарном участке (отрезке)c_i, Н. Определяется по формуле

$$T_{i.тр.ТП} = f \cdot |q_{0.ТП}| \cdot \cos\alpha \pm q_{0.ТП} \cdot c_i \cdot \sin\alpha, \qquad (3)$$

где f – коэффициент трения трубопровода о стенки скважины, смоченные буровым раствором; $q_{0.ТП}$ – эффективный (погруженный) погонный вес 1 м трубопровода (ТП) и внутреннего содержимого (если ТП заполнен водой), находящегося в буровом растворе, Н/м; α – угол наклона оси отрезка относительно горизонтали ($\alpha_{вх}$ – угол входа трубопровода в скважину; $\alpha_{вых}$ – угол выхода трубопровода из скважины), град.

В слагаемом со знаком ± минус ставится тогда, когда вектор действия усилия направлен вниз по скважине (активный силовой фактор), а плюс, когда он направлен вверх по скважине (пассивный силовой фактор). Связано это с тем, что на участке протаскивания вниз по склону проекция силы тяжести направлена в сторону прикладываемого усилия протаскивания, чем частично компенсирует силу трения ТП о стенки скважины.

$P_{i.бр.ТП}$ – сила сопротивления перемещению ТП в вязкопластичном буровом растворе на единицу длины (c_i), Н. Определяется по формуле

$$P_{i.бр.ТП} = \pi \cdot D_H \cdot \tau_0, \qquad (4)$$

где τ_0 – динамическое напряжение сдвига бурового раствора, Па (параметр определяется лабораторными испытаниями); D_H – наружный диаметр ТП с учетом толщины изоляционного покрытия, м.

$T_{i.тр.шт}$ – сила трения между буровой штангой и грунтом на каждом элементарном участке (отрезке) c_i, Н. Определяется по формуле

$$T_{i.тр.шт} = f_{шт} \cdot |q_{0.шт}| \cdot \cos\alpha \pm q_{0.шт} \cdot c_i \cdot \sin\alpha, \qquad (5)$$

где $f_{шт}$ – коэффициент трения буровых штанг о стенки скважины; $q_{0.шт}$ – эффективный (погруженный) погонный вес 1 м буровых штанг, Н/м.

$P_{i.бр.шт}$ – сила сопротивления перемещению буровых штанг в вязкопластичном буровом растворе на единицу длины (c_i), Н.

$$P_{i.бр.шт} = \pi \cdot d_H \cdot \tau_0, \qquad (6)$$

где d_H – наружный диаметр ТП с учетом толщины изоляционного покрытия, м.

c_i – длина элементарного участка разбиения (для искривленного участка – длина хорды разбиения), м.

Для того чтобы определить значение c_i рассмотрим искривленный участок $L_{кр2}$ для 1-го вида профиля.

Участок $L_{кр2}$ представляет собой участок дуги окружности с центральным углом, равным сумме $\alpha_{вх}$ и $\alpha_{вых}$ (аналогично для профиля 2-го вида: $L_{кр2}$ – сумме углов $\alpha_{вх1}$ и $\alpha_{вых1}$; $L_{кр4}$ – сумме углов $\alpha_{вх2}$ и $\alpha_{вых2}$).

Рассмотрим более подробно представленный сегмент окружности с радиусом R (рис. 6).

Разделим дугу $АБ$ на равные сегменты с элементарными центральными углами β_i и хордами c_i (рис. 7).

Длина хорд разбиения будет определяться по формуле

$$c_i = \frac{L_{АБ}}{n}; \qquad (7)$$

где $L_{АБ}$ – длина дуги $АБ$:

$$L_{АБ} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \beta}{360°}; \qquad (8)$$

По мере протаскивания трубопровода через участок АБ от хорды i к хорде $i+1$ траектория будет поворачивать на угол, соответствующий значению элементарного центрального угла β_i, определяемого по формуле:

$$\beta_i = \frac{\beta}{n}; \qquad (9)$$

Расчет по предлагаемой методике предусматривает разбиение искривленного участка (дуги АБ) – на хорды в количестве n (рис. 7).

Проверочный расчет по предлагаемой методике выполнен с помощью Microsoft Office Excel.

Для того чтобы оценить результаты расчетного усилия, получаемого по предлагаемой методике, предлагается сравнить их с фактическими (натурными) значениями усилий, а также с расчетными значениями полученными по существующим методикам (АО «Гипротрубопровод», Канадского университета Уотерлоу, СП 42-101-2003).

Расчеты будут выполняться по натурным данным трех построенных подводных переходов: переход нефтегазосборного стального трубопровода Приобского месторождения через реку Евьяху методом ННБ; переход стального водовода Солкинского месторождения через протоку Сингапайская методом ННБ; переход стального нефтепровода Ельниковского месторождения через реку Каму методом ННБ.

Рис. 6. *Дуга окружности с радиусом R*

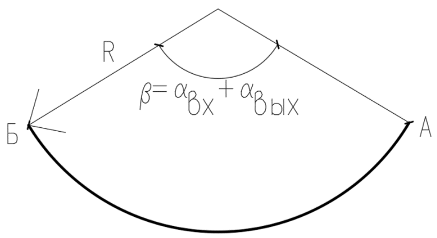


Рис. 7. *Разбиение дуги АБ на сегменты n – количество хорд разбиения дуги АБ; c_i – длина хорды i*

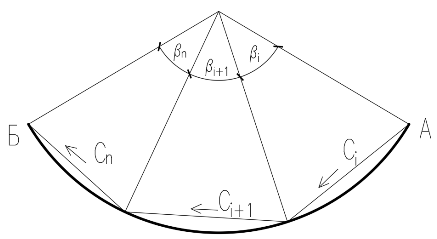


Таблица 1

Результаты расчетов усилий протаскивания для различных n-хорд

Наименование перехода	Фактическое усилие протаскивания, кН	Расчет усилия протаскивания по предложенной методике для n-хорд, кН								
		n = 4000	n = 3000	n = 2000	n = 1000	n = 400	n = 200	n = 100	n = 50	n = 25
Переход через р. Евьяху (стальная труба диаметром D = 530 мм, толщиной стенки δ = 10 мм, протяжённостью L = 844,5 м)	450	556,20	546,75	534,51	539,10	542,70	546,30	558,27	563,17	573,07
Переход через протоку Сингапайская (D = 720 мм, δ = 12 мм, L = 451,6 м)	399	349,32	361,81	367,20	352,96	336,56	320,80	307,63	304,84	296,14
Переход через реку Каму (D = 426 мм, δ = 10 мм, L = 1654 м)	686	855,37	837,26	826,01	825,33	836,65	841,72	860,11	898,87	906,49

Для обоснования выбора n – числа хорд разбиения криволинейных участков скважины следует произвести расчеты усилий протаскивания по предложенной методике для трех существующих переходов с различными значениями n (табл. 1).

В соответствии с расчетными данными табл. 1 зависимость погрешности определения расчетного усилия от числа хорд разбиения изображена на рис. 8.

В соответствии с диаграммой на рис. 8 число хорд n = 2000 является наиболее предпочтительным для расчетов, так как оно дает наименьшее значение погрешности расчета усилия протаскивания.

Результаты расчетов усилий протаскивания по предложенной и трем существующим методикам приведены в табл. 2.

Погрешность расчетов по четырем методикам для перехода через реку Евьяху, протоку Сингапайская, реку Каму представлена на рис. 9.

В соответствии с данными рис. 9, во всех трех расчетных случаях предложенная методика даёт наиболее точное значение усилия протаскивания.

Рис. 8. *Зависимость погрешности определения расчетного усилия от n*

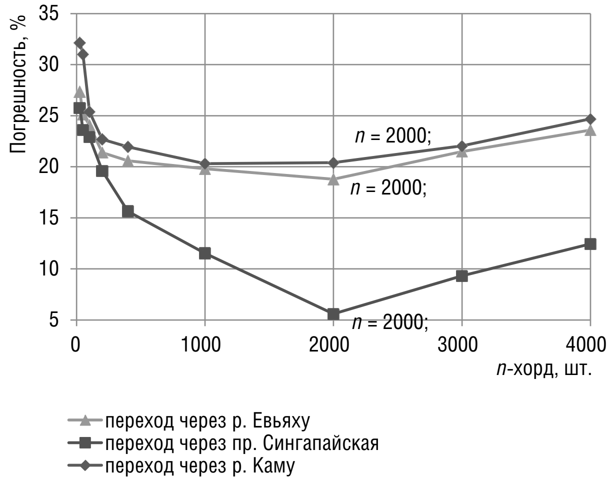


Таблица 2

Результаты расчетов усилий протаскивания

Наименование перехода	Методика расчета	Параметр: Фактическое усилие протаскивания, кН	Параметр: Расчетное усилие протаскивания, кН
Переход через р. Евьяху (труба D = 530 мм, δ = 10 мм, L = 844,5 м)	Предложенная методика	450	534,5
	АО «Гипротрубопровод»		298,5
	СП 42-101-2003		4824
	Университет Уотерлоу		1096,5
Переход через пр. Сингапайская (D = 720 мм, δ = 12 мм, L = 451,6 м)	Предложенная методика	399	367,2
	АО «Гипротрубопровод»		351,4
	СП 42-101-2003		6580
	Университет Уотерлоу		799
Переход через р. Кама (D = 426 мм, δ = 10 мм, L = 1654 м)	Предложенная методика	686	826
	АО «Гипротрубопровод»		536,7
	СП 42-101-2003		7217
	Университет Уотерлоу		1919

Рис. 8. *Расчет погрешности определения расчетного усилия по различным методикам*

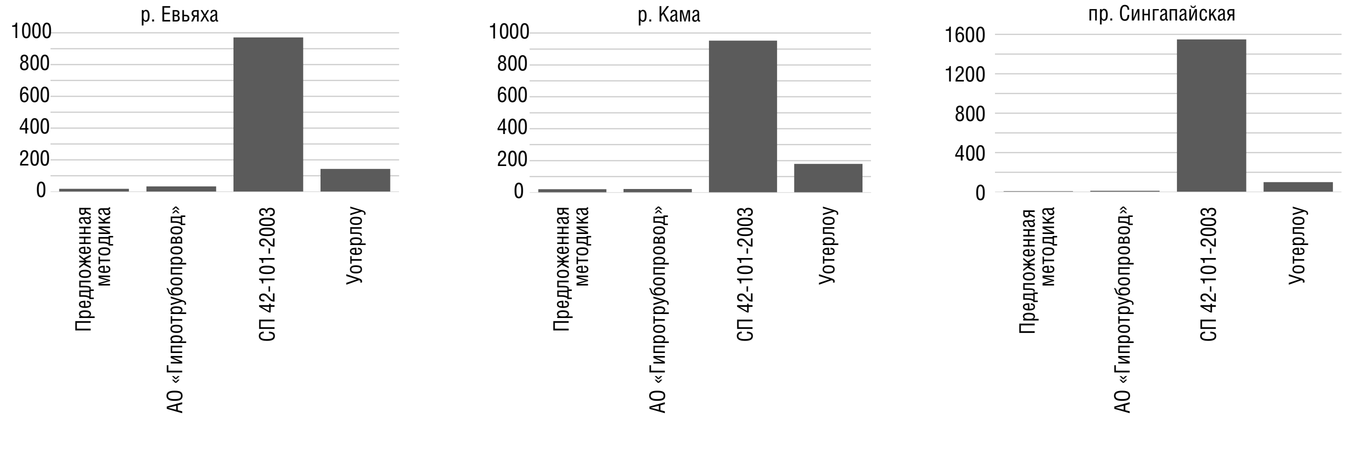
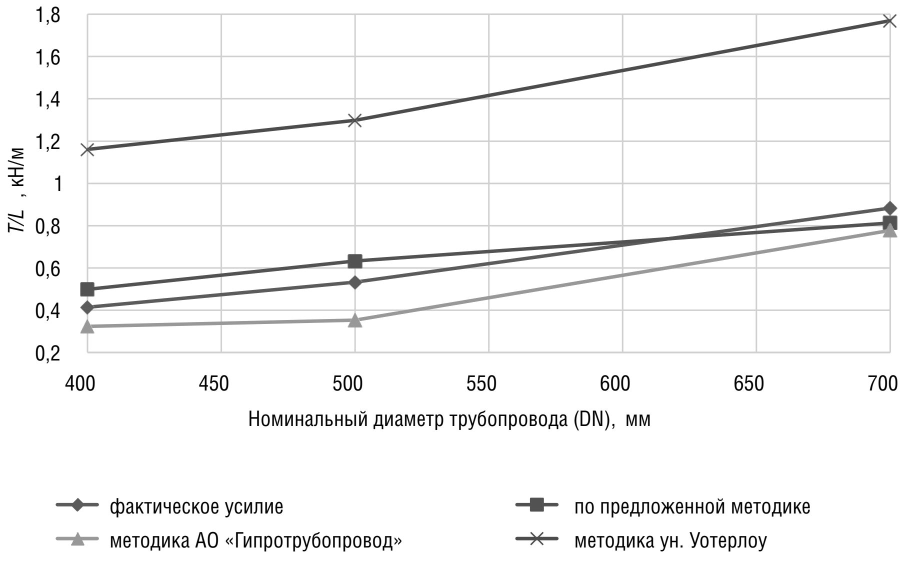


Рис. 10. *Зависимость величины усилия протаскивания 1 п.м. перехода от диаметра ТП*



Для того чтобы определить зависимость между величиной усилия протаскивания одного погонного метра (п.м.) перехода и значением диаметра протаскиваемого ТП по трем наиболее точным методикам (предложенная методика, методика АО «Гипротрубопровод», методика университета Уотерлоу) приведем результаты расчета в виде графика (рис. 10).

Во всех трех расчетных случаях наблюдается сходимость результатов расчетов по предложенной методике и методике АО «Гипротрубопровод». Этот факт связан с тем, что расчетная модель предложенной методики практически совпадает с моделью АО «Гипротрубопровод», за исключением дополнения связанного с учетом дополнительных пассивных и активных силовых факторов на искривленных участках профиля.

Из рис. 10 можно определить, что величина усилия, рассчитанного по предложенной методике, при диаметре 630 мм соответствует фактическому значению. При диаметре менее 630 мм расчетная методика дает завышенный результат, а с увеличением диаметра от 630 до 700 мм расчетное усилие уменьшается вследствие недоучета силовых факторов.

Точность расчета по предлагаемой методике в среднем на 7% выше, чем по методике АО «Гипротрубопровод». Средняя погрешность предложенной методики по отношению к фактическому значению составляет 16%. Средняя погрешность по методике АО «Гипротрубопровод» по отношению к фактическому значению составляет 23%.

Заключение

1. В работе произведен анализ существующих методик расчета усилия протаскивания трубопровода в скважину ННБ.
2. При сравнении результатов расчетов по существующим методикам с фактическими значениями усилий протаскивания выявлены преимущества и недостатки методик, влияющие на конечный результат расчета.
3. В основной части работы предложена собственная методика расчета усилия протаскивания.
4. В соответствии с теоретическими положениями предлагаемой методики выполнены расчеты усилий протаскивания для трех существующих переходов, построенных методом ННБ.
5. После сравнения расчетных усилий протаскивания ТП с фактическими (натурными) можно сделать вывод, что предлагаемая методика дает наиболее точный результат среди существующих расчетных методик. Средняя погрешность расчета по предлагаемой методике составляет 16 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков Л.И., Мустафин Ф.М., Рафиков С.К. и др. Типовые расчеты при сооружении газонефтепроводов. СПб.: Недра, 2011. 748 с.
2. СП 42-101-2003 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. М.: ИРЦ Газпром, 2003. 157 с.
3. Благов О.Н., Васильев Г.Г., Горяинов Ю.А. и др. Сооружение подводных переходов газонефтепроводов методом наклонно направленного бурения. М.: Лори, 2003. 288 с.
4. Polak M.A., Lasheen A. Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. Tunnelling and Underground Space Technology. 2002. № 16. P. 47–55.
5. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1979. 272 с.
6. Котов М.Ю., Быков Л.И. Анализ существующих расчетных методик определения усилия протаскивания при строительстве переходов трубопроводов методом наклонно направленного бурения // Нефтегазовое дело. 2011. № 9. С. 50-52.
7. Cai L., Xu G., Polak M.A., Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods – A critical review. Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. № 69. P. 85–93.
8. Шарафутдинов З.З., Спектор Ю.И., Скрепнюк А.Б. и др. Строительство переходов магистральных трубопроводов через естественные и искусственные препятствия. Новосибирск: Наука, 2013. 339 с.
9. Спектор Ю.И., Мустафин Ф.М., Лаврентьев А.Е. Строительство подводных переходов способом горизонтально направленного бурения: Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2001. 208 с.

REFERENCES

1. Bykov L.I., Mustafin F.M., Rafikov S.K. *Tipovyye raschety pri sooruzhenii gazonefteprovodov* [Typical calculations for the construction of gas and oil pipelines]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2011. 748 p.

2. *SP 42-101-2003 Obshchiye polozheniya po proyektirovaniyu i stroitel'stvu gazoraspredelitel'nykh sistem iz metallicheskikh i polietilenovykh trub* [SP 42-101-2003 General provisions for the design and construction of gas distribution systems made of metal and polyethylene pipes]. Moscow, IRTS Gazprom Publ., 2003. 157 p.
3. Blagov O.N., Vasil'yev G.G., Goryainov YU.A. *Sooruzheniye podvodnykh perekhodov gazonefteprovodov metodom naklonno napravlennogo bureniya* [Construction of underwater crossings of gas and oil pipelines using directed drilling]. Moscow, Lori Publ., 2003. 288 p.
4. Polak M.A., Lasheen A. Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002, no. 16, pp. 47–55.
5. Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 272 p.
6. Kotov M.YU., Bykov L.I. Analysis of the existing calculation methods for determining the pull-through force during the construction of pipeline crossings using the directional drilling method. *Neftegazovoye delo*, 2011, no. 9, pp. 50-52 (In Russian).
7. Cai L., Xu G., Polak M.A. Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods – A critical review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, no. 69, pp. 85–93.
8. Sharafutdinov Z.Z., Spektor YU.I., Skrepnyuk A.B. *Stroitel'stvo perekhodov magistral'nykh truboprovodov cherez yestestvennyye i iskusstvennyye prepyatstviya* [Construction of crossings of main pipelines through natural and artificial obstacles]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 339 p.
9. Spektor YU.I., Mustafin F.M., Lavrent'yev A.YE. *Stroitel'stvo podvodnykh perekhodov sposobom gorizontal'no napravlennogo bureniya* [Construction of underwater crossings by the method of horizontal directional drilling]. Ufa, Dizayn Poligraf Servis Publ., 2001. 208 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Овчинников Роман Дмитриевич, студент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Хасанов Рустям Рафикович, к.т.н., доцент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Roman D. Ovchinnikov, Student of the Department of Construction and Repair of Oil and Gas Pipelines and Gas and Oil Storage Facilities, Ufa State Petroleum Technological University.

Rustyam R. Khasanov, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Construction and Repair of Oil and Gas Pipelines and Gas and Oil Storage Facilities, Ufa State Petroleum Technological University.