



Алгоритм определения минимального тягового усилия при протаскивании трубопровода

Криони И.Н. *, Семёнова А.В. *, Киреев В.Н.**

* Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

** Башкирский государственный университет, Уфа

В статье рассматривается процесс протаскивания трубопровода через канал. При моделировании данного процесса учитываются взаимодействия между трубопроводом, буровой штангой, почвой и бентонитовым буровым раствором. Протаскиванию трубопровода через скважину препятствуют силы трения трубопровода и буровой штанги о почву, а также сила сопротивления трубопровода при его движении в буровой жидкости. При построении математической модели учтено влияние этих сил. Для определения сил трения трубопровод и буровая штанга рассматривались как гибкая нерастяжимая нить. Создан и реализован алгоритм определения тягового усилия. Отдельный этап работы посвящен учету баллаستировки трубопровода.

Ключевые слова: протаскивание, трубопровод, тяговое усилие, горизонтально-направленное бурение, буровой раствор, математическое моделирование

1. Введение

При прокладывании подземных коммуникаций методом горизонтально-направленного бурения возникает вопрос о тяговом усилии, необходимом для протаскивания трубопроводов, канализаций, водопроводов, газопроводов или футляров для кабелей связи через канал. Знание величины этого усилия позволяет принять решение о мощности буровой установки, направляемой на объект.

В процессе протаскивания трубопровода через канал определяющим фактором является взаимодействие между трубопроводом, буровой штангой, расширителем, почвой и буровой жидкостью. Сведения о форме канала получены из данных инклинометрии.

Для решения задачи о протаскивании трубопровода необходимо рассмотреть следующие силы: силу сопротивления, оказываемую на трубопровод бентонитовым буровым раствором, силу трения

бурильной штанги о свод канала, силу трения трубопровода о свод канала [1].

2. Совокупность сил, действующих на трубопровод

Для того чтобы оценить влияние сил трения на бурильную штангу в канале, рассмотрим штангу и трубопровод как нерастяжимую нить. Верхний свод канала представим как ось канала, которая поднята вверх на высоту радиуса. Саму ось канала аппроксимируем полиномом шестой степени, исходя из данных инклинометрии, предварительно проведя нормировку по величине высоты входного отверстия канала над уровнем моря.

Для решения задачи о тяговом усилии при протаскивании трубопровода через канал необходимо, в первую очередь, определить площади касания бурильной штанги и трубопровода со стенкой канала.

При протаскивании трубопровод и бурильная штанга будут вдавливаться в стенку канала на некоторую глубину δ_w , которая будет зависеть от действующих силовых факторов и, в частности, от приложенного тягового усилия. На рис. 1 схематически изображен трубопровод, частично вдавленный в

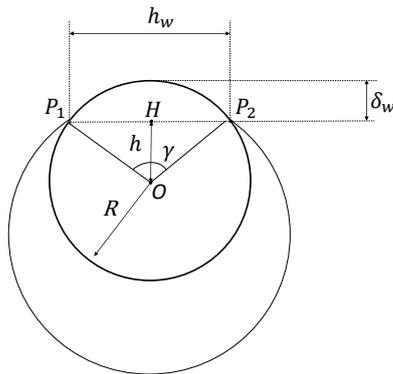


Рис. 1. Схема контакта трубопровода и стенки канала

стенку канала.

Для нахождения δ_w рассмотрим задачу Герца о давлении двух соприкасающихся тел [2]: два твердых тела соприкасаются в точке и в этой точке они имеют общую касательную плоскость. Предполагается, что оба тела сдавливаются приложенными к ним силами, в результате чего они сближаются на некоторое малое расстояние.

Тогда δ_w определяется из формулы, полученной в результате решения задачи Герца для контакта двух цилиндров с параллельными осями [3]:

$$\delta_w = \frac{2\sigma_n}{\pi} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \left(\ln \left(\frac{2R_1}{b} \right) + 0.407 \right) + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \left(\ln \left(\frac{2R_2}{b} \right) + 0.407 \right) \right],$$

где E_1 — модуль упругости грунта; E_2 — модуль упругости материала трубопровода; R_1 — радиус канала; R_2 — наружный радиус трубопровода; ν_1 — коэффициент Пуассона для грунта; ν_2 — коэффициент Пуассона для трубопровода; σ_n — нагрузка на единицу длины грунта.

Величина b вычисляется по формуле:

$$b = 1.128 \sqrt{\eta \sigma_n \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}},$$

где η — упругая постоянная соприкасающихся грунта и трубопровода, рассчитываемая следующим образом:

$$\eta = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}.$$

Точки P_1 и P_2 , изображенные на рис. 1 — это крайние точки касания трубопровода с грунтом. Возникающая при протаскивании сила трения будет пропорциональна площади контакта, поэтому необходимо определить дуги контакта $\delta_D = P_1 P_2$.

Искомую длину дуги можно вычислить по формуле:

$$\overset{\frown}{P_1 P_2} = R\gamma,$$

где γ — центральный угол, соответствующий дуге $\overset{\frown}{P_1 P_2}$, выраженный в радианах; R — внешний радиус трубопровода.

Величину угла γ можно найти следующим образом:

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{h_w}{2h},$$

где $h = R - \delta_w$. Тогда

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{h_w}{2(R - \delta_w)} \right).$$

Из простых геометрических соображений можно получить выражение для h_w :

$$h_w = 2\sqrt{R^2 - (R - \delta_w)^2}.$$

Тогда получаем, что длина дуги касания трубопровода и стенки канала будет рассчитываться по следующей формуле:

$$\delta_D = 2R \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{R^2 - (R - \delta_w)^2}}{R - \delta_w} \right), \quad (1)$$

где δ_w — глубина вдавливания трубопровода в грунт.

Длина дуги касания буровой штанги и стенки канала δ_d находится аналогично формуле (1).

Площадь контакта трубопровода с грунтом находится по формуле:

$$S_{CD} = \begin{cases} \delta_D(s - s_{st}^D), & s_{st}^D < s < s_{end}^D, \\ 0, & s \leq s_{st}^D, \\ \delta_D(s_{end}^D - s_{st}^D), & s \geq s_{end}^D, \end{cases} \quad (2)$$

где δ_D — длина дуги касания; s — длина части трубопровода, находящейся в канале; s_{st}^D, s_{end}^D — положения точек начала и конца касания трубопровода и грунта.

Длина дуги касания δ_d для буровой штанги вычисляется аналогично формуле (1), а площадь касания буровой штанги с грунтом — по следующей формуле:

$$S_{cd} = \begin{cases} \delta_d(s_{end}^d - s), & s_{st}^d < s < s_{end}^d, \\ \delta_d(s_{end}^d - s_{st}^d), & s \leq s_{st}^d, \\ 0, & s \geq s_{end}^d, \end{cases} \quad (3)$$

где δ_d — длина дуги касания; s_{st}^d, s_{end}^d — положения точек начала и конца касания буровой штанги и грунта.

Точки s_{st}^d, s_{end}^d находятся по алгоритму, аналогичному для точек s_{st}^D, s_{end}^D .

Для решения задачи о протаскивании трубопровода необходимо рассмотреть следующие силы: силу сопротивления, оказываемую на трубопровод бентонитовым буровым раствором, силу буровой штанги о свод канала, силу трения трубопровода о свод канала.

Прикладываемое тяговое усилие для протаскивания должно превосходить все вышеперечисленные силы, которые препятствуют протаскиванию трубопровода.

Сила сопротивления, оказываемая на трубопровод бентонитовым буровым раствором, вычисляется по следующей формуле [1]:

$$f_{res} = \pi D_n s \tau_{res}, \quad (4)$$

где τ_{res} — предельное динамическое напряжение сдвига бурового раствора; D_n — наружный диаметр трубопровода.

Сила трения для трубопровода при контакте с грунтом будет определяться следующим образом:

$$f_{fr}^D = S_{CD} \tau_D, \quad (5)$$

где S_{CD} — вычисленная площадь контакта, а τ_D вычисляется по формуле:

$$\tau_D = \sigma_n^D \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (6)$$

где σ_n^D — нагрузка на единицу длины грунта при контакте с трубопроводом; φ — угол внутреннего трения; c — удельное сцепление.

Для буровой штанги сила трения f_{fr}^d вычисляется аналогично.

3. Алгоритмы расчета

3.1. Вспомогательный алгоритм определения области касания

Для нахождения точек касания s_{st}^D, s_{end}^D для трубопровода и точек s_{st}^d, s_{end}^d для буровой штанги используется следующий алгоритм:

- 1) *Задание начала и конца канала на оси.*
Задаются две точки $Start$ и End — точки, лежащие на оси канала в начале и в конце канала соответственно.
- 2) *Поиск касательных.*
Методом касательных (Ньютона) из данных точек $Start, End$ проводятся касательные к верхней стенке канала.
- 3) *Нахождение точек s_{st}^D, s_{end}^D .*
Найденные точки касания — искомые точки начала и конца касания трубопровода и грунта.

Описанный выше алгоритм был реализован авторами на языке C#.

3.2. Алгоритм расчета тягового усилия

Опишем алгоритм определения минимального тягового усилия F_{pull}^{\min} :

- 1) *Задание исходных данных.*
Задается длина части трубопровода s (в метрах), находящейся в канале на данный момент.
- 2) *Вычисление силы сопротивления.*
Вычисляется сила сопротивления по формуле (4).
- 3) *Вычисление площади контакта.*
Для вычисления сил трения необходимо определить геометрические характеристики контакта буровой штанги и трубопровода с грунтом. Площади контакта с грунтом трубопровода и буровой штанги находятся согласно формулам (2) и (3).
- 4) *Вычисление сил трения.*
С использованием полученных на предыдущем шаге геометрических характеристик соответствующих контактов, вычисляются силы трения трубопровода и штанги по формулам (5) и (6).
- 5) *Вычисление тягового усилия.*
В итоге, можно вычислить искомое минимальное тяговое усилие F_{pull}^{\min} следующим образом:

$$F_{pull}^{\min} = f_{res} + f_{fr}^D + f_{fr}^d.$$

Для решения задачи поиска необходимого минимального усилия, требуемого для протаскивания трубопровода через канал, в соответствии с описанным алгоритмом авторами была написана программа на языке C#.

4. Результаты расчетов

Численные расчеты проводились при следующих параметрах: наружный диаметр трубопровода $D = 325$ мм; материал — сталь; $\tau_{res} = 30$ Па; $E_1 = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $E_2 = 7 \cdot 10^6$ Па; $\nu_1 = 0.26, \nu_2 = 0.3$; $\varphi = 19.29$ градусов; $c = 0.024 \cdot 10^6$ Па.

На рис. 2 показаны графики тягового усилия и составляющих его сил (сил трения и силы сопротивления бурового раствора) в зависимости от длины находящейся в канале плети трубопровода при протаскивании по прямолинейному каналу.

Теперь рассмотрим реальный канал, траектория которого была аппроксимирована полиномом

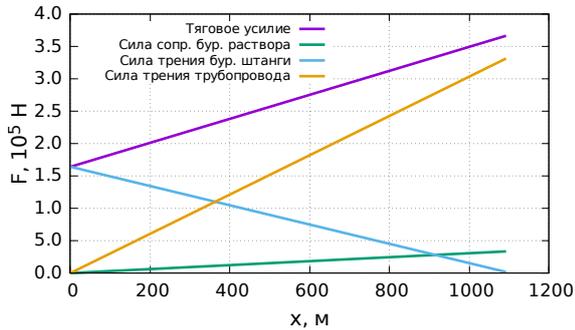


Рис. 2. Тяговое усилие и составляющие его силы в случае прямолинейного канала

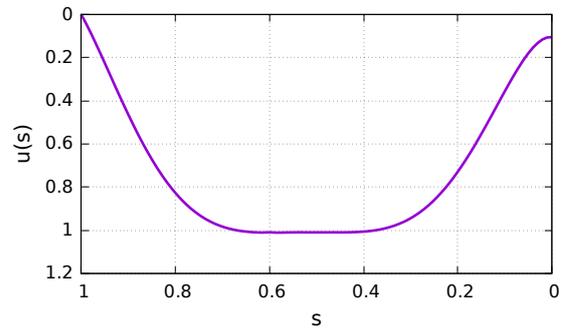


Рис. 3. Аппроксимация оси канала полиномом шестой степени

шестой степени. Результат аппроксимации представлен на рис. 3.

Результаты численного моделирования протаскивания трубопровода по реальному каналу показаны на рис. 4.

Были выполнены расчеты для трубопроводов различных диаметров, используемых при прокладывании подземных коммуникаций. Результаты расчетов показаны на рис. 5.

В табл. 1 приведены количественные оценки максимальных тяговых усилий для трубопроводов различных диаметров.

Часто при прокладывании подземных коммуникаций методом горизонтально-наклонного бурения предусматривают балластировку трубопровода для уменьшения величины плавучести трубопровода и снижения тяговых усилий [1].

На рис. 6 приведены результаты расчетов зависимости максимального тягового усилия от балластировки для трубопроводов различных диаметров. Значению балластировки 0 соответствует пустой трубопровод, значению 1 – трубопровод, полностью заполненный балластировочной жидкостью.

5. Заключение

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что в случае прямолинейного канала необходимое тяговое усилие оказывается большим, чем для поставленной задачи. Это вызвано тем, что при протаскивании трубопровода по прямолинейному каналу силы трения действуют на протяжении всей

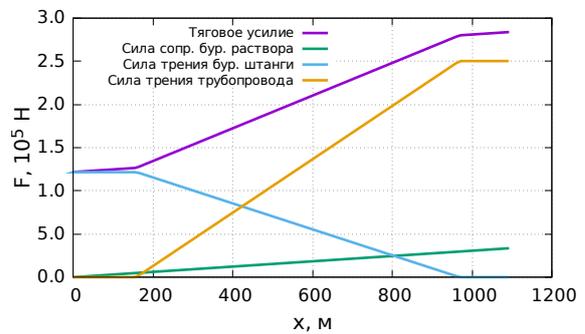


Рис. 4. Тяговое усилие и его составляющие для трубопровода диаметром 325 мм

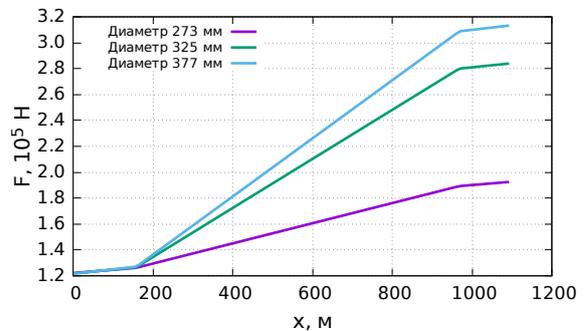


Рис. 5. Тяговое усилие для трубопроводов различных диаметров

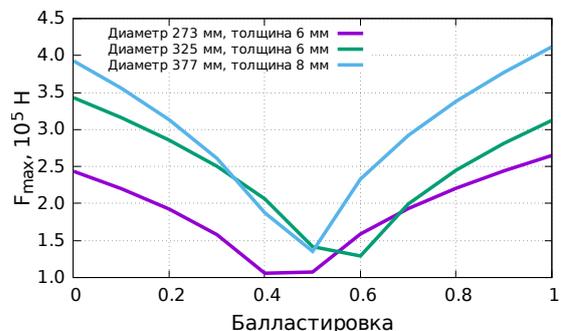


Рис. 6. Тяговое усилие для трубопроводов различных диаметров в зависимости от степени балластировки

Таблица 1. Максимальные тяговые усилия для трубопроводов разных диаметров

Диаметр трубопровода, мм	273	325	377
Макс. тяговое усилие, кН	193	284	313

Таблица 2. Оптимальная балластировка для трубопроводов различных диаметров

Диаметр трубопровода, мм	273	325	377
Степень балластировки	0.4	0.6	0.5
Макс. тяговое усилие, кН	106	129	135

длины канала. Кроме того, полученные результаты дают возможность оценить вклад следующих сил: силы сопротивления, оказываемой на трубопровод бентонитовым буровым раствором, силы трения буровой штанги и трубопровода о свод канала.

До точки начала касания трубопровода и верхней стенки канала наибольший вклад вносит сила трения буровой штанги о верхнюю стенку канала.

Далее, с момента начала касания плети трубопровода и верхней стенки канала и до окончания протаскивания трубопровода наибольший вклад

вносит сила трения трубопровода о верхнюю стенку канала.

Результаты вычислений демонстрируют, что для трубопроводов большего диаметра требуется и большее тяговое усилие.

Для каждого диаметра существует оптимальная степень балластировки, при которой тяговое усилие минимально. В табл. 2 приведены количественные оценки этих значений.

Список литературы

- [1] Сальников А.В., Зорин В.П., Агиней Р.В. Методы строительства подводных переходов газопроводов на реках Печорского бассейна: Учебное пособие. Ухта: УГТУ, 2008. 108 с.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика в 10 томах. Том 7. Теория упругости. М.: Физматлит, 2003. 260 с.
- [3] Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Том 2. М.: Машиностроение, 1968. 463 с.



The algorithm for determining the pulling force while dragging a pipeline

Krioni I.N.*, Semenova A.V.*, Kireev V.N.**

* Ufa State Aviation Technical University, Ufa

** Bashkir State University, Ufa

This article describes the process of dragging a pipeline through a channel. In the simulation of this process, the interactions between the pipeline, the drill rod, the soil and the bentonite mud are taken into account. Dragging of the pipeline through the well is hampered by frictional forces of the pipeline and the drill rod against the soil, as well as the drag force of the pipeline when it moves in the drilling fluid. In the construction of a mathematical model, the influence of these forces is taken into account. To determine the frictional forces, the pipeline and the drill rod were considered as a flexible non-stretch filament. An algorithm for determining the tractive effort is created and implemented. A separate stage of the work is devoted to the accounting of ballasting of the pipeline.

Keywords: pulling, pipeline, pulling force, horizontal directional drilling, drilling mud, mathematical modeling