



## Определение допустимого максимального размера препятствия при протаскивании трубопровода

Семёнова А.В., Криони И.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

В статье рассматривается процесс преодоления трубопроводом каменистого препятствия при протаскивании через канал. В зависимости от размеров канала и самого трубопровода определяется максимально допустимый размер препятствия, которое трубопровод может преодолеть, не упираясь в верхнюю часть канала. Для решения этой задачи трубопровод условно разделяется на два участка: участок, находящийся до препятствия и опирающийся на него, и свободный участок, находящийся после препятствия. Непосредственно на процесс протаскивания через препятствие влияют силы и моменты, действующие на трубопровод. Исходя из уравнений равновесия моментов для различных точек трубопровода, а также из уравнения изгиба балки проводится оценка величины препятствия.

**Ключевые слова:** трубопровод, протаскивание трубопровода, подземные коммуникации, математическое моделирование

### 1. Введение

В процессе строительства подземных инженерных коммуникаций трубопровод часто прокладывают методом протаскивания [1]. При протаскивании трубопровода по каналу возникает проблема накопления в канале грунта, оставшегося после бурения, образуется каменистое препятствие, при преодолении которого под небольшим уклоном трубопровод упирается в верхнюю часть канала. Но так как трубопровод обладает собственным весом, его часть, прошедшая препятствие, может прогибаться до момента непосредственного контакта с верхней частью канала, вследствие чего трубопровод может свободно преодолеть препятствие.

### 2. Силы и моменты

Для исследования процесса протаскивания трубопровода через препятствие условно разделим трубопровод на два участка: один находится до препятствия и опирается на него, второй — свобод-

ный участок, находится после препятствия. Сначала рассмотрим участок, опирающийся на препятствие (рис. 1). Препятствие представим как вершину высотой  $h$ . Считаем, что трубопровод тянут с силой  $F$ , а плотность материала  $\rho$  и площадь поперечного сечения  $S$  известны.

Точка  $A$  на рис. 1 находится на месте контакта трубопровода с вершиной препятствия, а точка  $C$  — на месте контакта трубопровода и нижней стенки канала.

При протаскивании трубопровода возникают силы реакции  $Q_A$ ,  $N_A$ ,  $Q_C$  и момент  $M_0$ .

Величины  $N_C = \pm F$ ,  $q = \rho g S$ ,  $h$ ,  $M_0$  также считаем заданными. Кроме того, известны диаметр канала  $D_C$  и наружный диаметр трубопровода  $D_T^H$ . Уравнение прогиба участка трубопровода, опирающегося на возвышение высотой  $h$ , имеет вид [2]:

$$EJ \frac{d^4 w}{dx^4} = q,$$

где  $w$  — величина прогиба трубопровода;  $E$  — модуль упругости материала трубопровода;  $J$  — момент инерции,

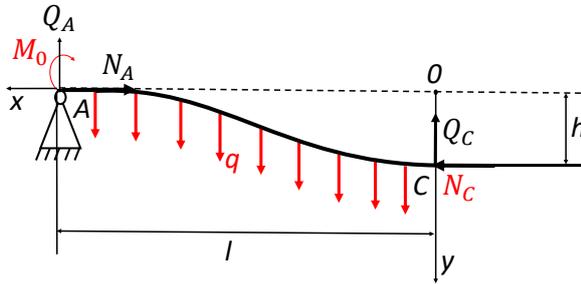


Рис. 1. Участок трубопровода, находящийся до препятствия

Граничные условия:

$$x = 0 : w = h, \frac{dw}{dx} = 0,$$

$$x = l : w = 0, \frac{d^2w}{dx^2} = -M_0, \frac{dw}{dx} = \varphi_A,$$

где  $\varphi_A$  — угол между осью трубопровода и осью абсцисс в точке A.

На рис. 1 ось  $x$  проходит через вершину возвышения, при этом основным предположением является соотношение:  $\frac{h}{l} \ll 1$ , где  $l$  — длина участка до препятствия.

Для произвольной точки на оси трубопровода запишем уравнение момента сил [2]:

$$EJ \frac{d^2w}{dx^2} = m(x).$$

Определим силы реакции на опорах в точках A и C, для чего составим уравнения равновесия по осям координат:

$$\sum Q_y = 0 : -Q_A - Q_C + ql = 0;$$

$$\sum N_x = 0 : N_C - N_A = 0;$$

$$\sum \text{mom}_A = 0 : Q_C l - \frac{ql^2}{2} - N_C h - M_0 = 0.$$

Из данных выражений получим следующие соотношения:

$$N_C = N_A;$$

$$Q_A = \frac{ql}{2} - \frac{h}{l} N_C - \frac{M_0}{l};$$

$$Q_C = \frac{ql}{2} + \frac{h}{l} N_C + \frac{M_0}{l}.$$

Построим выражение для моментов:

$$m(x) = Q_C x - \frac{1}{2} q x^2 - N_C (h - w).$$

С учетом выражения для силы  $Q_C$ , имеем:

$$m(x) = \frac{ql}{2} x + \frac{h N_C}{l} x + \frac{M_0}{l} x - \frac{1}{2} q x^2 - N_C (h - w).$$

Отсюда получим выражение и для перерезывающей силы в каждой точке:

$$Q(x) = \frac{ql}{2} + \frac{h N_C}{l} + \frac{M_0}{l} - qx + w' N_C.$$

Приведем приблизительную оценку расстояния  $l$  от опоры A до точки C касания грунта рассматриваемым участком трубы. В соответствии с методикой, изложенной в [3], пренебрежем силовыми факторами  $Q_C$  и  $N_C$ , кроме того будем считать  $M_0 = 0$ . Тогда

$$m(x) = -\frac{1}{2} q x^2.$$

Отсюда

$$EJ \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{q x^2}{2}.$$

Дважды интегрируя это уравнение, с учетом граничных условий, получаем итоговую формулу для прогиба:

$$w = -\frac{q x^4}{24EJ} + h.$$

Учитывая, что при  $x = l : w = 0$ , получаем необходимую оценку для  $l$ :

$$l = \sqrt[4]{\frac{24EJh}{q}}.$$

При этом угол между осью трубопровода и осью абсцисс в точке A будет равен:

$$\varphi_A = -\frac{1}{6EJ} q l^3.$$

Рассмотрим теперь участок, находящийся после препятствия (рис. 2).

Запишем выражения, соответствующие уравнениям равновесия в системе координат, сопоставленной с консольной частью трубы. Три уравнения соответствуют трем неизвестным силам реакции опоры  $V_A, H_A, M_A$ :

$$\sum V_y = 0 : V_A - f_v \cos \alpha - ql \cos \alpha = 0;$$

$$V_A = (f_v + ql) \cos \alpha;$$

$$\sum H_x = 0 : -H_A - ql \sin \alpha - f_v \sin \alpha = 0;$$

$$H_A = -(f_v + ql) \sin \alpha;$$

$$\sum M_A = 0 : -M_A + f_v \cos \alpha l + ql \cos \alpha \frac{l}{2} = 0;$$

$$M_A = \left( f_v + \frac{ql}{2} \right) l \cos \alpha;$$

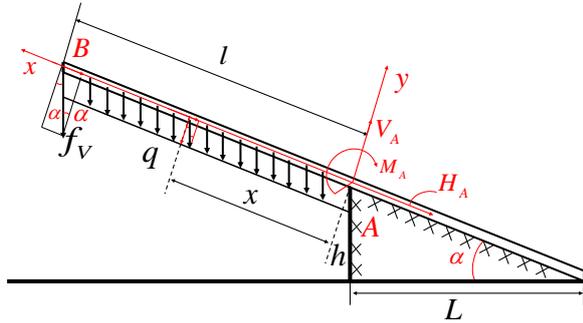


Рис. 2. Участок трубопровода, находящийся после препятствия

$$\begin{aligned} M_x &= -M_A - qx \cos \alpha \frac{x}{2} + V_A x = \\ &= -\left(f_V + \frac{ql}{2}\right) l \cos \alpha - \\ &\quad - \frac{qx^2}{2} \cos \alpha + (f_V + ql) \cos \alpha x; \\ x = l: M_B &= -f_V l \cos \alpha - \frac{ql^2}{2} \cos \alpha - \\ &\quad - \frac{ql^2}{2} \cos \alpha + f_V l \cos \alpha + ql^2 \cos \alpha = 0, \end{aligned}$$

где  $f_V$  – вертикальная составляющая тяговой силы.

Прогиб определим исходя из дифференциального уравнения прогиба трубы [2]:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M_x}{EJ}.$$

$$\text{Тогда: } \theta = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{EJ} \int M_x dx, \text{ при } \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$\text{и } w = \int \theta dx, \text{ при } w|_{x=0} = 0.$$

Получим для значения прогиба при  $x = l$ :

$$w_{\max} = -\frac{l^3 \cos \alpha}{EJ} \left( \frac{f_V}{3} + \frac{ql}{8} \right).$$

В исходном состоянии для недеформированной трубы уравнение для ее оси соответствует прямой линии:  $y_0 = kx + b$ , где  $k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{L}$ ,  $b = h$ .

Перемещение оси трубы с учетом ее деформируемости изменит положение ее конца в соответствии с соотношением:

$$u = y_0 + w.$$

Используя ограничение на положение консольной части трубы длиной  $l$ , запишем неравенство, учитывая диаметр канала  $D_C$  и диаметр трубы  $D_T$ :

$$y_0 + w + \frac{D_T}{2} < D_C.$$

В развернутом виде определяющее неравенство будет иметь вид:

$$kl + h - \frac{l^3 \cos \alpha}{EJ} \left( \frac{f_V}{3} + \frac{ql}{8} \right) + \frac{D_T}{2} < D_C.$$

Из чего, в свою очередь, следует ограничение для высоты конечной преграды  $h$ :

$$h < D_C - kl - \frac{D_T}{2} \cos \alpha + \frac{l^3 \cos \alpha}{EJ} \left( \frac{f_V}{3} + \frac{ql}{8} \right), \quad (1)$$

$$l = \frac{D_C - D_T \cos \alpha - h}{\sin \alpha}, \quad (2)$$

где  $f_V = F_{\text{pull}} \sin \psi$ ;  $q = \rho g S_T$ ;  $S_T$  – площадь поперечного сечения трубы;  $F_{\text{pull}}$  – тяговая сила;  $\psi$  – угол, образуемый штангой, соединяющей расширитель с концом трубопровода, и осью канала, его величина вычисляется из геометрических соотношений:

$$\psi = \arcsin \left( \frac{D_C}{2l_{\text{vert}}} - \frac{D_T}{2l_{\text{vert}}} \cos \alpha \right),$$

где  $l_{\text{vert}}$  – длина вертлюга.

Выражение (1), с учетом (2), можно свести к алгебраическому неравенству с полиномом 4-ой степени относительно критической высоты препятствия:

$$\begin{aligned} l &= \frac{D_C - D_T \cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{h}{\sin \alpha} = A_l - B_l h, \\ A_l &= \frac{D_C - D_T \cos \alpha}{\sin \alpha}, B_l = \frac{1}{\sin \alpha}, \end{aligned}$$

тогда:

$$\begin{aligned} h &< D_C - D_T - A_l k - B_l kh + \\ &+ \frac{(A_l - B_l h)^3 \cos \alpha}{EJ} \left( \frac{f_V}{3} + \frac{q(A_l - B_l h)}{8} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

С другой стороны, можно получить выражение относительно длины  $l$ , если учесть, что:

$$h = \frac{A_l - l}{B_l}.$$

В этом случае неравенство (3) представим в виде алгебраического неравенства четвертого порядка относительно длины  $l$  участка трубопровода от местоположения препятствия до касания верхней стенки канала с учетом силы тяжести и вертикальной компоненты усилия протаскивания:

$$\begin{aligned} \frac{q \cos \alpha}{8EJ} l^4 + \frac{f_V \cos \alpha}{3EJ} l^3 + \left( \frac{1}{B_l} - k \right) l + \\ + \left( D_C - D_T - \frac{A_l}{B_l} \right) > 0. \end{aligned}$$

Таблица 1. Результаты расчетов для трубопроводов и каналов различных диаметров

Диаметр канала, мм	Диаметр трубопр., мм	Тяговая сила, кН	Высота препятствия, м	$l$ из геом. огранич., м	$l$ из кубич. уравнения, м
345	273	193	0.0208	6.4187	6.3993
410	325	284	0.0260	6.8329	6.7952
475	377	313	0.0279	8.2875	8.2448

Полученное условие позволяет определить длину участка трубопровода достаточную для обеспечения протаскивания трубопровода. Однако анализ этого неравенства представляется достаточно трудоемким и, в этой связи, рассмотрим другой вариант условия протаскивания через препятствие.

Запишем выражение для момента в произвольной точке на участке трубопровода слева от препятствия:

$$m_x = m_A + \frac{qx^2}{2} - Q_A x.$$

Выражение для момента, следующее из его определения, даст уравнение относительно второй производной прогиба  $w$ :

$$EJ \frac{d^2 w}{dx^2} = \left( f_V + \frac{ql}{2} \right) l \cos \alpha + \frac{qx^2}{2} \cos \alpha - (f_V + ql) \cos \alpha x.$$

Отсюда, с учетом условия  $x = 0 : \frac{dw}{dx} = 0$ , получим:

$$EJ \frac{dw}{dx} = \left( f_V + \frac{ql}{2} \right) l \cos \alpha x + \frac{qx^3}{6} \cos \alpha - (f_V + ql) \cos \alpha \frac{x^2}{2}.$$

Найдем значение координаты  $x$ , при котором выполняется условие равенства производной от функции прогиба тангенсу угла наклона оси трубопровода к горизонту или, иначе говоря, условие параллельности свободного конца трубопровода и оси канала:

$$\frac{dw}{dx} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Таким образом, определение условия возможности протаскивания трубопровода через препят-

ствие сведено к решению кубического уравнения:

$$ax^3 - bx^2 + cx - d = 0,$$

где

$$a = \frac{q \cos \alpha}{6}, \quad b = \frac{(f_V + ql) \cos \alpha}{2}, \\ c = \left( f_V + \frac{ql}{2} \right) l \cos \alpha, \quad d = EJ \operatorname{tg} \alpha.$$

Величина  $l$ , полученная при решении данного уравнения, не должна превышать значения, полученного из геометрического ограничения (2).

### 3. Результаты расчетов

В табл. 1 приведены результаты расчетов, позволяющие определить допустимый максимальный размер препятствия для различных размеров трубопровода и канала.

### 4. Заключение

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что для каждого соотношения диаметров трубопровода и канала существует допустимый максимальный размер препятствия, причем зависимость между размером этого препятствия и размером канала явно нелинейная.

### Список литературы

- [1] Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. М.: «Недра», 1977. 407 с.
- [2] Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учебник. М.: Изд-во МАИ, 1994. 512 с.
- [3] Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Урманчиев С.Ф. Работоспособность бурильной колонны при строительстве подводных переходов трубопроводов методом наклонно направленного бурения // Нефтяное хозяйство. 2018. № 5. С. 88-92. (DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-88-92)



## Determination of the allowable maximum size of the obstacle while dragging a pipeline

Krioni I.N., Semenova A.V.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa

In this article, the process of overcoming the stony obstacle while dragging pipeline through the channel is considered. Depending on the size of the duct and the pipeline itself the permissible size of the obstacle that the pipeline can overcome without resting against the upper part of the channel, is considered. To solve this problem, the pipeline is conditionally divided into two sections: the site located up to the obstacle and resting on it, and a free area that is after the obstacle. Directly on the process of dragging through an obstacle are acting the forces and moments which have influence on the pipeline. Starting from the equations of moment equilibrium for different points of the pipeline, and also from the equations of bending beams the value of the obstacle is evaluated.

**Keywords:** pipeline, pipeline pulling, underground communications, mathematical modeling