

## **НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ**

Валеев А.Р., Зотов А.Н.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет  
e-mail: anv-v@yandex.ru*

*Рассмотрено воздействие различных типов сейсмических волн на сооружения. Рассмотрены существующие конструкционные методы обеспечения надежности трубопроводов в сейсмически активных районах. Предложена и рассчитана конструкция принципиально новой опоры трубопровода, обеспечивающая защиту объекта от вертикальной составляющей волн. Схематично показан способ ее реализации.*

Ключевые слова: *сейсмостойкость, сейсмические волны, надежность трубопровода, квазиулевая жесткость*

В настоящее время все больше нефтепроводов прокладываются в зонах с повышенной сейсмической опасностью. Северо-восток Сахалина и прилегающие к нему участки шельфа высокосейсмичны, также как и некоторые районы пролегания нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан».

При проектировании и сооружении в тектонических активных зонах выбираются благоприятные в сейсмическом отношении участки трасс и площадки строительства. Если это не удается, то применяют рациональные конструктивные решения и антисейсмические мероприятия. На участках пересечения трассой трубопровода активных тектонических разломов необходимо применять надземную прокладку [1].

При землетрясениях создаются различные сейсмические волны – разные по скорости распространения, амплитуде и разрушающим способностям [2]. Продольные и поперечные волны являются наиболее изученными. На сейсмограммах эти волны появляются первыми. Раньше всего регистрируются продольные волны, при прохождении которых каждая частица среды подвергается сначала сжатию, а затем снова расширяется, испытывая при этом возвратно-поступательное движение в продольном направлении. Эти волны называются также Р-волнами, или первичными волнами (рис. 1).

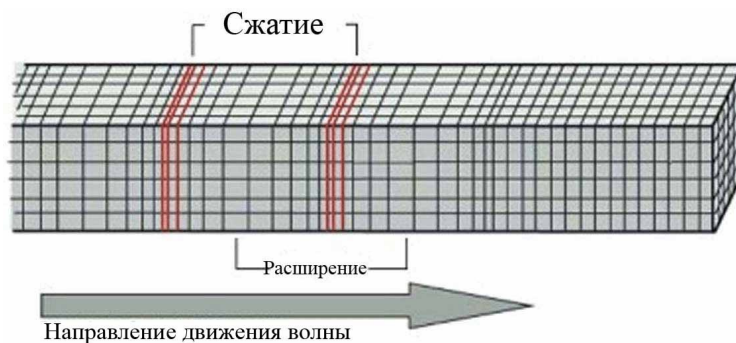


Рисунок 1. Продольные волны

Следующими регистрируются поперечные сейсмические волны, называемые также S-волнами, или вторичными волнами. При их прохождении каждая частица породы колеблется перпендикулярно направлению распространения волны (рис. 2).

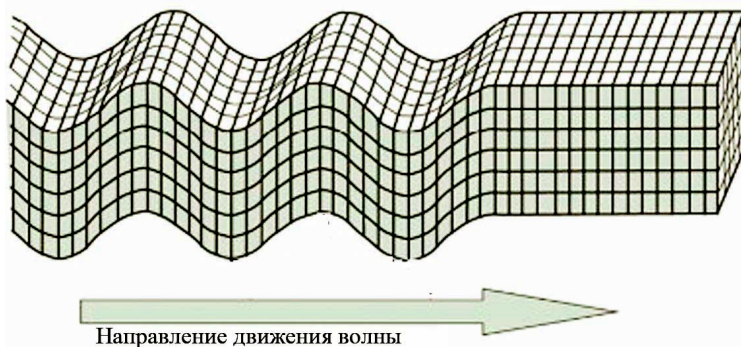


Рисунок 2. Поперечные волны

Поверхностные волны (L-волны) являются менее изученными. Они распространяются вдоль земной поверхности или параллельно ей и не проникают глубже 80-160 км. В этой группе выделяются волны Рэлея и волны Лява. При прохождении волн Рэлея частицы породы описывают вертикальные эллипсы, лежащие в очаговой плоскости (рис. 3).

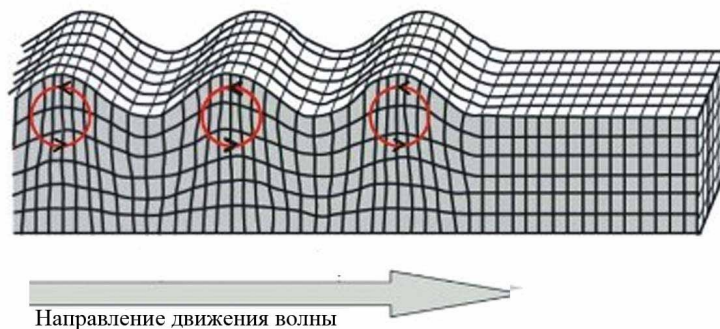


Рисунок 3. Волна Рэлея

В волнах Лява частицы породы колеблются перпендикулярно направлению распространения волн (рис. 4).

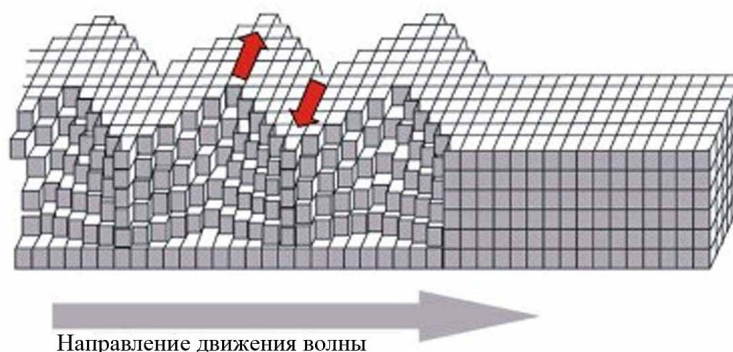


Рисунок 4. Волна Лява

Поверхностные волны являются наиболее разрушительными. Часто конструкции выдерживают толчки первых Р- и S-волн, но не могут противостоять меньшим по амплитуде, но более сложным поверхностным волнам. Опоры надземных трубопроводов должны защищать при воздействии всех указанных типов волн и обеспечивать свободное перемещение трубы во всех направлениях пространства.

Согласно рекомендациям проектирования [3], если надземные трубопроводы пересекают линии тектонических разломов, конфигурация их в горизонтальной и вертикальной плоскостях должна быть такой, чтобы обеспечивалось свободное перемещение (скольжение) трубопровода по опорам. Ригели опор, на которые опирается трубопровод, должны иметь упоры, ограничивающие перемещение свыше некоторого предельного значения, и препятствующее сбросу трубы с опор.

Свободное продольное перемещение трубы обеспечивается за счет установки различного рода компенсаторов по длине трубопроводов. К примеру, на нефтепроводе Транс-Аляска на участке с высокой сейсмичностью применена так называемая плоскопараллельная прокладка или прокладка с Z-образным компенсационными участками [3]. В сейсмических районах часто применяется прокладка трубопровода в виде «змейки».

При высокой сейсмической опасности необходимо также обеспечивать большую подвижность трубопровода в поперечном направлении [4]. Для этого

следует увеличивать длины ригелей продольно-подвижных опор и расширить зону возможных перемещений трубопровода по ригелю. Упоры-ограничители на ригелях продольно-подвижных опор должны быть установлены так, чтобы обеспечивалась нормальная работа трубопровода при обычных эксплуатационных нагрузках. Для активного гашения энергии сейсмических колебаний применяется конструкция опоры под названием «скользящий анкер», разработанного специально для трубопровода Транс-Аляска (рис. 5).

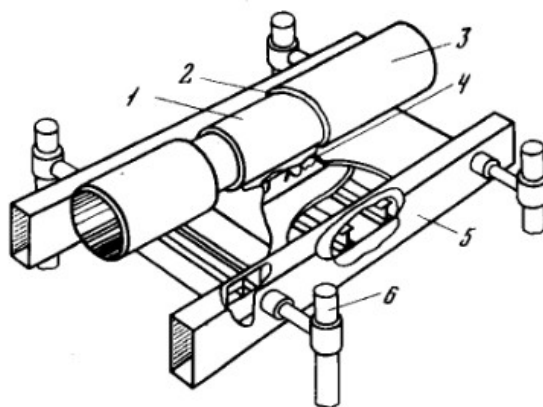


Рисунок 5. Общий вид устройства «скользящий анкер»:

1 - хомут; 2 – изоляция; 3 – труба; 4 – устройство для создания повышенного сопротивления перемещению трубопровода; 5 – несущая конструкция; 6 – свая

Также должно обеспечиваться свободное перемещение трубопровода в вертикальной плоскости, однако на текущий момент соответствующие опоры трубопровода еще не достаточно разработаны. Это обосновывается сложностью создания конструкций, обеспечивающих постоянную несущую способность на продолжительном участке вертикальных перемещений. Ниже будет представлена конструкция опор трубопровода, которая может обеспечивать такое свойство.

Основу конструкции составляют элементы, имеющие в своей силовой характеристике участки с отрицательной жесткостью, т.е. вида как на рис. 6.

При определенном сочетании таких систем, имеющих графики силовых характеристик  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 7), можно получить график  $F = f_1 + f_2$ , имеющий на промежутке от  $x_1$  до  $x_2$  постоянную восстанавливающую силу.

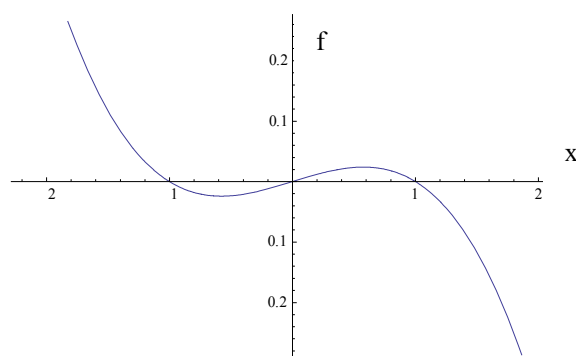


Рисунок 6. Иллюстрация силовой характеристики с отрицательной жесткостью

Таким образом, к таким системам выдвигаются следующие требования:

1. Согласно рис. 7, равенство функции  $f_2$  в точках  $x_1$  и  $x_2$  нулю, а также то, что функция в соответствующем промежутке отрицательна:

$$f_2(x_1) = f_2(x_2) = 0. \quad (1)$$

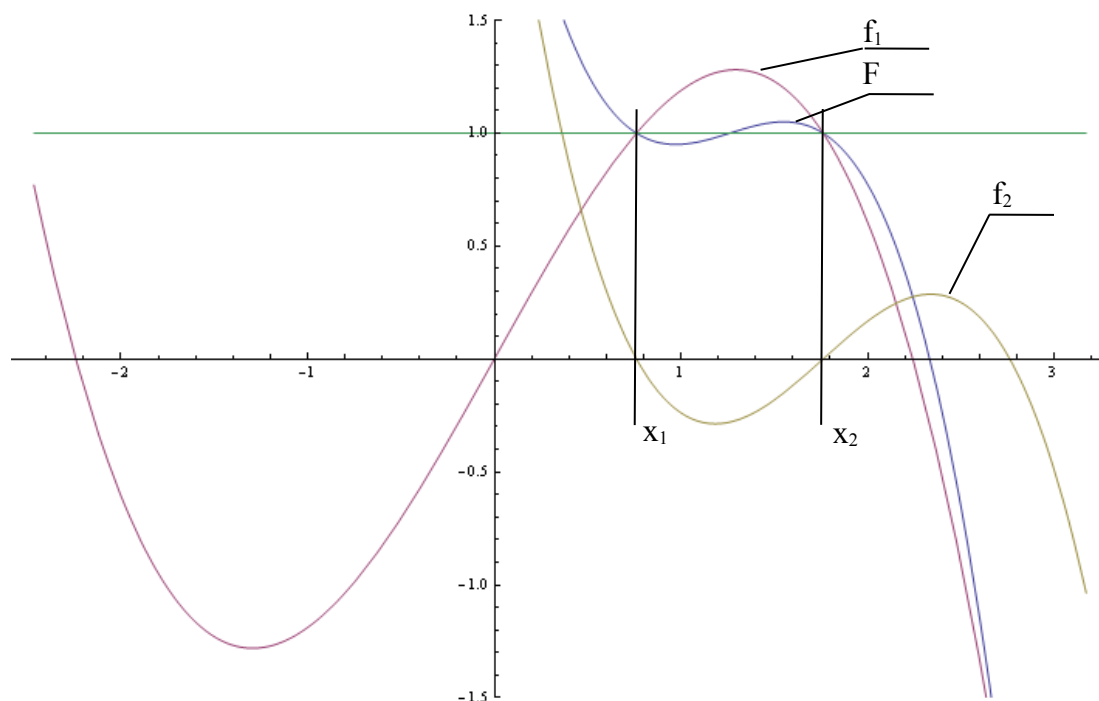


Рисунок 7. Получение постоянной восстанавливающей силы

2. Равенство функции  $f_1$  в точках  $x_1$  и  $x_2$  весу воспринимаемой нагрузки  $P$ :

$$f_1(x_1) = f_1(x_2) = P. \quad (2)$$

3. Полуволна на графике  $f_1$  компенсирует полуволну на графике  $f_2$ , это условие можно записать следующим способом:

$$f_1\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)+f_2\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)=P. \quad (3)$$

Так, зная параметры  $P$  и значение  $S = x_2 - x_1$ , равное ширине зоны постоянной силы, можно подобрать необходимые параметры систем, такие как, к примеру, взаимное расположение систем и силовые характеристики каждой из них. Предполагается, что надо брать вид графика из опытных испытаний, однако для оценки сейсмозащитной опоры, примем следующую модель и исследуем. Получим силовую характеристику как на рис. 6 с помощью упругой пластины, зафиксированной между двумя опорами (рис. 8).

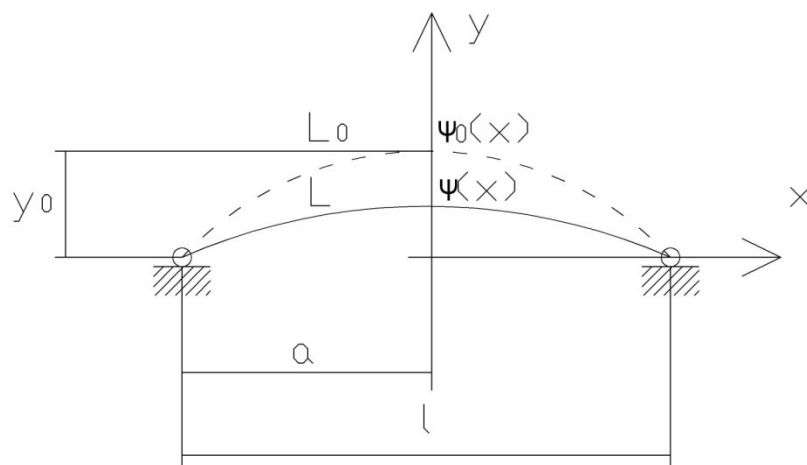


Рисунок 8. Расчетная схема для определения восстанавливающей силы упругой пластины, зафиксированной на двух опорах

Определим значение восстанавливающей силы одной такой пластины (рис. 5). Пусть форма пластины в ненапряженном состоянии описывается формулой  $\psi_0(x)$ . Примем, что под действием силы  $F$  пластина пропорционально сжимается по высоте и принимает форму  $\psi(x) = C \cdot \psi_0(x)$ , где  $-1 \leq C \leq 1$ . Потенциальная энергия пластины накапливается только за счет эластичного сжатия пластины по длине.

Точка приложения силы  $F$ :

$$y = \psi(0) = C \cdot \psi_0(0) = C \cdot y_0.$$

При  $F = 0$   $y_0 = \psi_0(0)$ .

Длина пластины в ненапряженном состоянии:

$$L_0 = \int_{-a}^a \sqrt{(\psi_0(x)')^2 + 1} dx .$$

Длина пластины в напряженном состоянии:

$$L = \int_{-a}^a \sqrt{(\psi(x)')^2 + 1} dx = \int_{-a}^a \sqrt{C^2 \cdot (\psi_0(x)')^2 + 1} dx .$$

Потенциальная энергия сжатия пластины:

$$W = \frac{k(L_0 - l)^2}{2} .$$

Восстанавливающая сила F равна:

$$f = -\frac{\partial W}{\partial y} .$$

Принимаем, что в ненапряженном состоянии пластина изогнута незначительно, т.е.:

$$f_0(x)' \ll 1 .$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} L &= \int_{-l/2}^{l/2} \sqrt{C^2 \cdot (\psi_0(x)')^2 + 1} dx \approx \int_{-l/2}^{l/2} \left( \frac{C^2 \cdot (\psi_0(x)')^2}{2} + 1 \right) dx = \\ &= \frac{C^2}{2} \int_{-l/2}^{l/2} (\psi_0(x)')^2 dx + l = \frac{C^2}{2} A + l ; \end{aligned}$$

$$L_0 = \frac{1}{2} A + l ;$$

$$A = 2(L_0 - l) .$$

Тогда:

$$\begin{aligned} f &= \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{\partial \frac{k(L_0 - l)^2}{2}}{-y_0 \cdot \partial C} = \frac{k}{y_0} \frac{2 \left( \frac{1}{2} A - \frac{C^2}{2} A \right) \partial \left( \frac{C^2}{2} (A + 2a) \right)}{\partial C} = \\ &= \frac{k}{y_0} A(1 - C^2) \cdot A \cdot C = \frac{kA^2}{y_0} \cdot C(1 - C^2) . \end{aligned} \quad (7)$$

Оценим величину  $(L_0 - l)$ . Для этого учтем, что согласно Эйлеровой эластике, пластина изгибается согласно гармоническому закону:

$$\begin{aligned} \psi(x) &= y_0 \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right), \quad -\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2}; \\ L_0 &= \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \sqrt{(\psi(x)')^2 + 1} \, dx \approx \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \left( \frac{(\psi(x)')^2}{2} + 1 \right) dx = \\ &= \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \left( \frac{\left( y_0 \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right) \right)^2}{2} + 1 \right) dx = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \left( \frac{\left( \frac{\pi y_0}{l} \right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right)}{2} + 1 \right) dx = \\ &= l + \frac{1}{4} \left( \frac{y_0 \pi}{l} \right)^2 \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} 1 - \cos\left(2 \frac{\pi x}{l}\right) dx = l + \frac{(\pi y_0)^2}{4l} + \frac{\pi y_0}{2l} \sin\left(2 \frac{\pi x}{l}\right) \Big|_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} = l + \frac{\pi^2 y_0^2}{4l} \\ L_0 - l &= l + \frac{\pi^2 y_0^2}{4l} - l = \frac{\pi^2 y_0^2}{4l}. \end{aligned}$$

Отметим, что:

$$A = 2(L_0 - l) = \frac{\pi^2 y_0^2}{2l}.$$

Таким образом:

$$f = \frac{kA^2}{y_0} \cdot C(1 - C^2) = \frac{\pi^4 y_0^4}{4l^2} \cdot \frac{k}{y_0} \cdot \frac{y}{y_0} \left( 1 - \left( \frac{y}{y_0} \right)^2 \right) = \frac{k\pi^4 y_0^3}{4l^2} \cdot \frac{y}{y_0} \left( 1 - \left( \frac{y}{y_0} \right)^2 \right).$$

Для удобства можем записать:

$$f = \gamma \cdot \frac{y}{y_0} \left( 1 - \left( \frac{y}{y_0} \right)^2 \right),$$

где  $\gamma = \frac{k\pi^4 y_0^3}{4l^2}$  – параметр, отражающий свойства конструкции.

Итак, функции  $f_1$  и  $f_2$  описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} f_1 &= \gamma_1 \cdot \frac{x}{y_{01}} \left( 1 - \left( \frac{x}{y_{01}} \right)^2 \right), \\ f_2 &= \gamma_2 \cdot \frac{x - x_2}{y_{02}} \left( 1 - \left( \frac{x - x_2}{y_{02}} \right)^2 \right). \end{aligned}$$



где  $y_{01}$  - высота выгиба пластины 1 в ненапряженном состоянии;

$y_{02}$  - высота выгиба пластины 2 в ненапряженном состоянии.

Применяем условие (1):

$$f_2(x_1) = f_2(x_2) = 0 ;$$

$$f_2 = \gamma_2 \cdot \frac{x_1 - x_2}{y_{02}} \left( 1 - \left( \frac{x_1 - x_2}{y_{02}} \right)^2 \right) ;$$

$$\gamma_2 \cdot \frac{S}{y_{02}} \left( 1 - \left( \frac{S}{y_{02}} \right)^2 \right) = 0 ;$$

$$S = y_{02} .$$

Условие (2):

$$\gamma_1 \cdot \frac{x_1}{y_{01}} \left( 1 - \left( \frac{x_1}{y_{01}} \right)^2 \right) = \gamma_1 \cdot \frac{x_2}{y_{01}} \left( 1 - \left( \frac{x_2}{y_{01}} \right)^2 \right) = P ;$$

$$x_1 (y_{01}^2 - x_1^2) = x_2 (y_{01}^2 - x_2^2) ;$$

$$x_2^3 - x_1^3 = y_{01}^2 (x_2 - x_1) ;$$

$$x_2^2 + x_2 x_1 + x_1^2 = y_{01}^2 ;$$

$$(x_1 + S)^2 + (x_1 + S)x_1 + x_1^2 = y_{01}^2 ;$$

$$3x_1^2 + 3x_1 S + S^2 = y_{01}^2 .$$

Примем, что  $y_{01} = nS$ :

$$3x_1^2 + 3x_1 S - (n^2 - 1)S^2 = 0 ;$$

$$x_1 = \frac{-3S + \sqrt{9S^2 + 12(n^2 - 1)S^2}}{6} = S \left( -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{3}n^2 - \frac{1}{12}} \right) .$$

Тогда:

$$x_2 = x_1 + S = S \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{3}n^2 - \frac{1}{12}} \right) .$$

Из (2) определяется  $\gamma_1$ :

$$\gamma_1 = \frac{P}{\frac{x_1}{y_{01}} \left( 1 - \left( \frac{x_1}{y_{01}} \right)^2 \right)} .$$

Далее анализируем условие (3):

$$f_1\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right) + f_2\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right) = P;$$

$$\gamma_1 \cdot \frac{x_1+x_2}{2y_{01}} \left(1 - \left(\frac{x_1+x_2}{2y_{01}}\right)^2\right) - \gamma_2 \cdot \frac{x_2-x_1}{2y_{02}} \left(1 - \left(\frac{x_2-x_1}{2y_{02}}\right)^2\right) = P;$$

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 \cdot \frac{x_1+x_2}{2y_{01}} \left(1 - \left(\frac{x_1+x_2}{2y_{01}}\right)^2\right) - P}{\frac{x_2-x_1}{2y_{02}} \left(1 - \left(\frac{x_2-x_1}{2y_{02}}\right)^2\right)}.$$

Таким образом, при поставке начальных условий – вес нагрузки  $P$  и ширина зоны постоянной воспринимаемой нагрузки  $S$ , и ее отношении к  $y_{01}$  (значение  $n$ ) параметры конструкции:

$$x_1 = S \left( -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{3}n^2 - \frac{1}{12}} \right), \quad x_2 = S \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{3}n^2 - \frac{1}{12}} \right);$$

$$y_{01} = nS; \quad y_{02} = S;$$

$$\gamma_1 = \frac{P}{\frac{x_1}{y_{01}} \left(1 - \left(\frac{x_1}{y_{01}}\right)^2\right)}; \quad \gamma_2 = \frac{\gamma_1 \cdot \frac{x_1+x_2}{2y_{01}} \left(1 - \left(\frac{x_1+x_2}{2y_{01}}\right)^2\right) - P}{\frac{x_2-x_1}{2y_{02}} \left(1 - \left(\frac{x_2-x_1}{2y_{02}}\right)^2\right)}.$$

Получаем окончательный график функции  $F$ :  $F = f_1 + f_2$ .

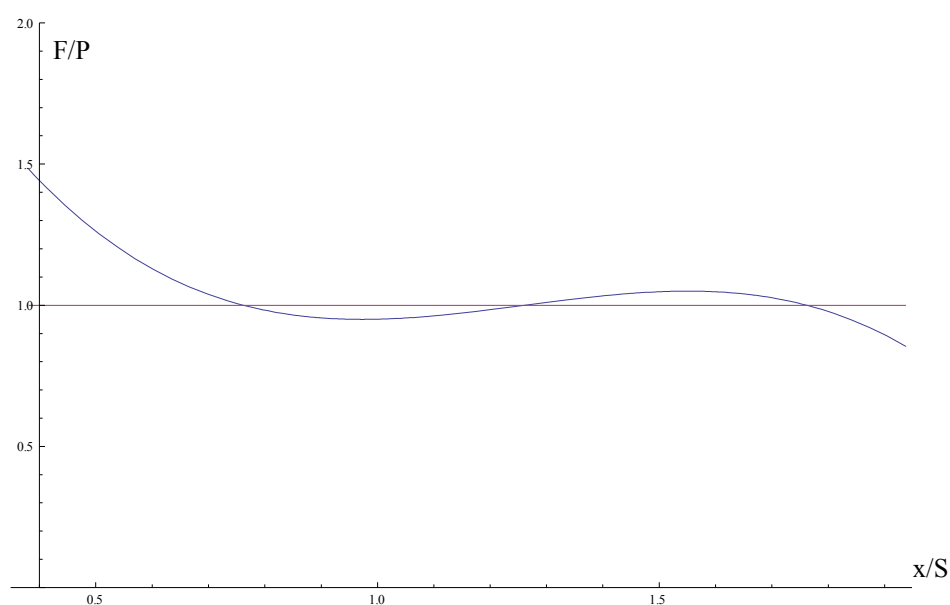


Рисунок 9. График функции  $F$  при  $n = 2,242$

Согласно [3], величину возможного перемещения грунта следует брать равной 35 см или 50 см в зависимости от свойств грунта. Соответственно, рекомендуем принять величину  $S = 50$  см. Величина  $P$  равняется весу трубопровода между 2 соседними равномерно расположенными опорами. Так, если опоры располагаются через каждые  $L$  метров, то при удельном весе трубопровода вместе с перекачиваемым продуктом  $q$  величина нагрузки  $P$  равняется:

$$P = qL.$$

Отмечаем, что величина  $n$  отражает отклонение реального значения  $F$  на рабочем участке от  $x_1$  до  $x_2$  от номинальной нагрузки  $P$ . Чем больше значение  $n$ , тем меньше отклонение. При  $n = 2,242$  отклонение равняется 5 %. Отмечаем, что такая погрешность компенсируется наличием естественных сил трения в конструкции, которые не позволяют системе самопроизвольно перемещаться. Таким образом, параметры системы при  $n = 2,242$ :

$$x_1 = 0,762 \cdot S; \quad x_2 = 1,762 \cdot S;$$

$$y_{01} = 2,242 \cdot S; \quad y_{02} = S;$$

$$\gamma_1 = 3,327 \cdot P; \quad \gamma_2 = 0,745 \cdot P.$$

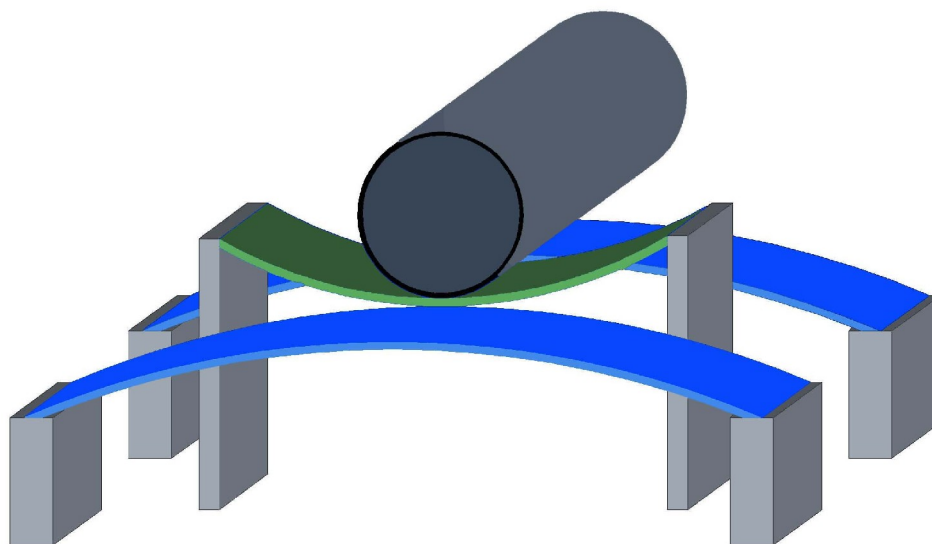


Рисунок 10. Внешний вид конструкции

Примерный внешний вид подобной конструкции приведен на рис. 10. На данном рисунке предложено разместить упругие стальные пластины на одиночных бетонных основаниях. Все три пластины в точке контакта скреплены между собой. Поверх них кладется трубопровод. Отсутствие жесткого крепления трубы

и опоры обеспечит продольную и поперечную свободу перемещений. Отмечаем, что одна подобная опора конструируется на конкретную нагрузку  $P$ . Этот вес может меняться за счет ветровых, снеговых нагрузок, изменений плотности перекачиваемого продукта. Также следует ожидать гидравлическое испытание трубопровода, при котором труба заполняется водой, более тяжелой, чем перекачиваемая нефть. Поэтому можно предусмотреть обеспечение уклона графика на рис. 9 за счет добавления упругой элемента, например пружины.

Итак, был рассмотрен новый способ повышения сейсмостойкости трубопровода за счет обеспечения вертикальной подвижности конструкции. Конструкция, подобная изображенной на рис. 10, позволит повысить надежность и безопасность трубопроводного транспорта нефти и газа через сейсмоактивные районы.

### Литература

1. Мустафин Ф.М и др. Технология сооружения газонефтепроводов. Под ред. Г.Г. Васильева. Т.1.: Учебник. Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. 632 с.
2. Короновский Н.В., Абрамов В.А. Землетрясения: причины, последствия, прогноз // Соросовский образовательный журнал. 1998. №12. С. 71-78.
3. Гехман А.С., Зайнетдинов Х.Х. Расчет, конструирование и эксплуатация трубопроводов в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1988. 184 с.
4. Сейсмостойкость магистральных трубопроводов и специальных сооружений нефтяной и газовой промышленности. М.: Наука, 1980. 24 с.