

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА НЕФТЕПРОВОДА

Филиппова В.Р.<sup>1</sup>, Кузнецова Ю.А.<sup>2</sup> Email: Filippova693@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Филиппова Валерия Родионовна – магистрант;  
<sup>2</sup>Кузнецова Юлия Анатольевна – кандидат технических наук, доцент,  
кафедра строительных конструкций и водоснабжения,  
Поволжский государственный технологический университет,  
г. Йошкар-Ола

**Аннотация:** в работе исследованы теоретические вопросы совершенствования средств защиты подводных переходов магистральных нефтепроводов от размыва. Выполнены автоматизированные расчёты колебаний участков трубопровода при размыве донного грунта в прикладной среде MathCad. На основе решения дифференциального уравнения собственных колебаний участка трубопровода определены характеристики явления резонанса участка трубы при возникновении отрыва потока от ее поверхности. В результате найдена резонансная длина трубопровода и установлены геометрические пределы длины колеблющегося участка, подверженного вероятному разрушению.

**Ключевые слова:** уравнение колебаний, трубопровод, подводный переход, резонанс, отрыв потока, MathCad.

## AUTOMATED CALCULATION OF RESONANCE VIBRATIONS OF OIL PIPELINE IN UNDERWATER PASSAGE

Filippova V.R.<sup>1</sup>, Kuznetsova Yu.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Filippova Valeriya Rodionovna – Master's Degree student;  
<sup>2</sup>Kuznetsova Yulia Anatolyevna – PhD of Engineering, Associate Professor,  
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES AND WATER SUPPLY,  
VOLGA STATE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY,  
YOSHKAR-OLA

**Abstract:** the paper studies theoretical issues of improving scour protection facilities of oil trunk line underwater passages. Automated calculations of pipeline vibrations of the bottom soil scour in the MathCad application environment were performed. Based on the solution of the differential equation of natural vibrations of the pipeline section, we determined characteristics of the resonance condition of the pipeline section when the flow separates from its surface. As a result, the resonant length of the pipeline was found, and the geometrical limitations of the vibrating pipeline section subject to probable damage were established.

**Keywords:** vibration equation, pipeline, underwater passage, the resonance, flow separation, MathCad.

УДК 622.691, 539.3

**Введение.** На трубопровод подводного нефтепровода, уложенный в поперечной донной траншее, действует не только статическая, но гидродинамическая сила потока. Колебания, вызванные таким воздействием, могут происходить в горизонтальных и поперечных плоскостях. Причиной возникновения колебаний являются вихри Бенара-Кармана, отрывающиеся от трубопровода в процессе его обтекания, частота которых определяется числом Струхала. При критическом режиме, соответствующем числам Рейнольдса больше  $6 \cdot 10^6$ , колебания приобретают неустойчивый характер, а число Струхала может достигать значения 0,4.

**Целью работы** является расчет условий возникновения наиболее опасного резонансного режима колебаний трубопровода, при котором собственная частота колебаний трубопровода совпадает с частотой вынуждающей гидродинамической силы.

**Метод решения задачи.** Для расчета колебаний стержневых систем и, в частности, трубопроводов может быть использовано дифференциальное уравнение четвертого порядка, учитывающее присоединенные массы жидкости, изгибную жесткость трубы и коэффициент отпора грунтового основания. При решении дифференциального уравнения граничные условия определяются с учетом заделки концов трубопровода.

Ниже представлен листинг расчета собственных колебаний для участка трубопровода на основе решения дифференциальных четвертого порядка в среде MathCad [3] по методике, изложенной в монографии [1].

Дифференциальное уравнение собственных колебаний участков трубы I и III

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{m_v}{EI} - \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{k_0 D_n}{EI} = 0.$$

Дифференциальное уравнение собственных колебаний участка трубы II

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{m_v + m_{пр}}{EI} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0.$$

Построим график зависимости параметра  $\alpha_1$  от параметра  $\beta_1$  (рис.).

Табличное значение параметра  $\beta_1$

$$\text{Tab}\beta_1 := (0 \quad 0.8 \quad 1.6 \quad 2.4 \quad 3.2 \quad 4.0 \quad 4.8)^T.$$

Табличное значение коэффициента  $\alpha_1$

$$\text{Tab}\alpha_1 := (0 \quad 2 \quad 4 \quad 6 \quad 8 \quad 28 \quad 125)^T.$$

Сплайн-интерполяция зависимости параметра  $\alpha_1$  от параметра  $\beta_1$

$$v\alpha_1 := \text{pspline}(\text{Tab}\alpha_1, \text{Tab}\beta_1) \quad \beta_1(\alpha_1) := \text{int erp}(v\alpha_1, \text{Tab}\alpha_1, \text{Tab}\beta_1, \alpha_1).$$

$$\alpha_1 := 0, 0.1..120.$$

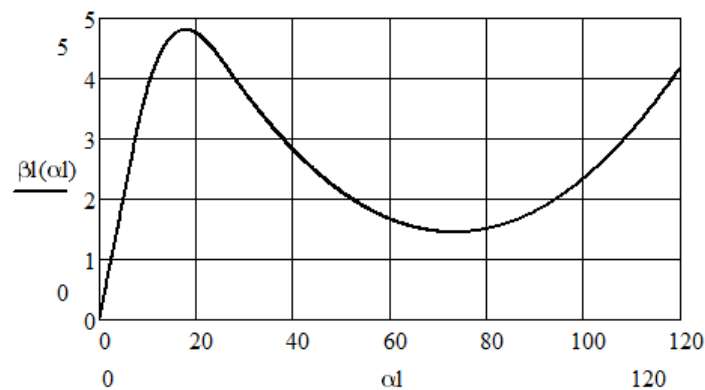


Рис. График зависимости коэффициента  $\beta_1$  от коэффициента  $\alpha_1$

Резонансная частота собственных колебаний трубопровода

$$n_{\text{соб}} := \text{Sh} \cdot \frac{v}{D_n} = 0.015 \text{ Гц.}$$

Круговая частота собственных колебаний  $\omega := 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{соб}} = 0.094 \text{ Гц.}$

Длина трубопровода  $l := 5840 \text{ м.}$

Диаметр трубопровода  $D_n := 1.02 \text{ м.}$

Момент инерции  $J := 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4.$

Модуль упругости металла  $E := 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2.$

Момент сопротивления  $W := 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$

Коэффициент постели грунта при сжатии  $k_0 := 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3.$

Расчетное значение коэффициента  $\alpha$ .

Расчетное значение коэффициента  $\alpha_1 := \alpha \cdot l = 1.26 \cdot 10^3.$

Расчетное значение коэффициента  $\beta_1 := \beta_1(\alpha_1) = 1.76 \times 10^3.$

Линейная частота колебаний  $n_y := \frac{\beta_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m + m_{пр}}} = 9.364 \text{ Гц.}$

Круговая частота  $\omega_y := \frac{n_y}{(2 \cdot \pi)} = 1.49 \text{ Гц.}$

Резонансная длина трубопровода

$$l_{\text{рез}} := \beta_1 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{(m + m_{пр}) \cdot \omega_y^2}} = 7.649 \times 10^5 \text{ м.}$$

$$\text{Значение коэффициента } \gamma := \sqrt[4]{\frac{4 \cdot (m + m_{\text{пр}}) \cdot \omega^2}{k_0 \cdot D_n \cdot (m + m_{\text{пр}}) \cdot \omega^2}} = 0,025.$$

$$\text{Уточненное значение коэффициента } \beta := \alpha \cdot \gamma = 5,4 \times 10^{-3}.$$

$$\text{Резонансная длина трубопровода } l_{\text{рез}} := \beta \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{(m + m_{\text{пр}}) \cdot \omega^2}} = 37,105 \text{ м.}$$

Таким образом, при длине размытого участка трубопровода в пределах  $l := 40$  м происходят резонансные колебания, которые приводят к разрушению колеблющегося участка. В этом случае необходимо принять меры к уменьшению длины размытого участка, установив перемычку в середине участка.

**Выводы.** При расчете гидродинамического воздействия потока на трубопровод в среде MathCad учтены частоты колебаний, связанные с отрывом вихрей Бенара-Кармана.

В результате расчета колебаний трубопровода для условий близких к условиям подводного перехода нефтепровода «Сургут-Полоцк» через реку Ветлугу [2, 4], получены значения длин участков трубопровода в пределах от 90 до 146 м, на которых возникают резонансные колебания, и происходит разрушение участка.

Для решения использована сплайн-аппроксимация расчетных коэффициентов  $\beta_1$  и  $\alpha_1$  [1], позволяющих произвести расчет частоты собственных колебаний трубопровода и его резонансной длины при известных геометрических и механических свойствах материала трубопровода и грунтового основания.

Установлено, что на длине размытого участка в пределах 40 м, происходят резонансные колебания, приводящие к разрушению участка трубы.

#### *Список литературы / References*

1. *Бородавкин П.П., Ким Б.И.* Охрана окружающей среды при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1981. 345 с.
2. *Кузнецова Ю.А., Парфенов А.В.* Разработка средств защиты подводных переходов нефтепроводов от размыва // Исследования Технологии Инновации: сб. статей. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. С. 299–301.
3. *Макаров Е.Г.* Инженерные расчеты в Matchcad. Учебный курс. СПб.: Питер, 2003. 448 с.
4. *Поздеев А.Г., Кузнецова Ю.А., Лоскутов Ю.В., Трухан А.Е., Крашенинников В.В.* Анализ русловых процессов для обоснования экологической безопасности подводных переходов нефтепроводов // Мелиорация и водное хозяйство. № 2, 2011. С. 39–42.