УДК 624.014.27

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Шевченко Ф.Л. докт. техн. наук, проф.,
Пащенко В.С. канд. техн. наук, доц.,
Донецкий государственный технический университет

Представлен вывод расчетных зависимостей для определения напряженно-деформированного состояния транспортных трубопроводов глубоководных добычных комплексов с иллюстрацией этого расчета на квазистатическое нагружение напором набегающего потока окружающей среды для случая автономного варианта добычного комплекса.

It is show the definition strain-deformated condition of transported pipeline of deep-water extraction complexes if the speed motion is small.

Избегая динамического влияния штормовой волны на транспортный трубопровод глубоководного добычного комплекса целесообразно его выполнять в автономном режиме, т.е. удерживать на погружной плавучей платформе, а с плавсредством соединять гибкой связью. Тогда при погружении платформы примерно на 50 м штормовое воздействие поверхностоного слоя моря исключается. В таком варианте движитель с тяговым усилием P_0 располагается на подвесной платформе нижнего конца трубопровода, масса которой с силовым оборудованием M, рис. 1. На трубопровод действует вертикальная нагрузка собственного веса q, вес подвесной платформы $Q=Mg$, вес насосных агрегатов Q_1 (с учетом архимедовой силы). Кроме того для снижения нагрузки на подвесную платформу N на некоторой части трубопровода прикрепляются блоки сферопластика, плотность которого значительно меньше плотности воды. На этом участке погонная нагрузка на трубопровод, равная выталкивающей силе поплавков за вычетом веса трубопровода и сферопластика, q_1 направлена вверх. При равномерном движении трубопровода на него действует направленная по нормали распределенная нагрузка интенсивностью p от набегающего потока жидкости.

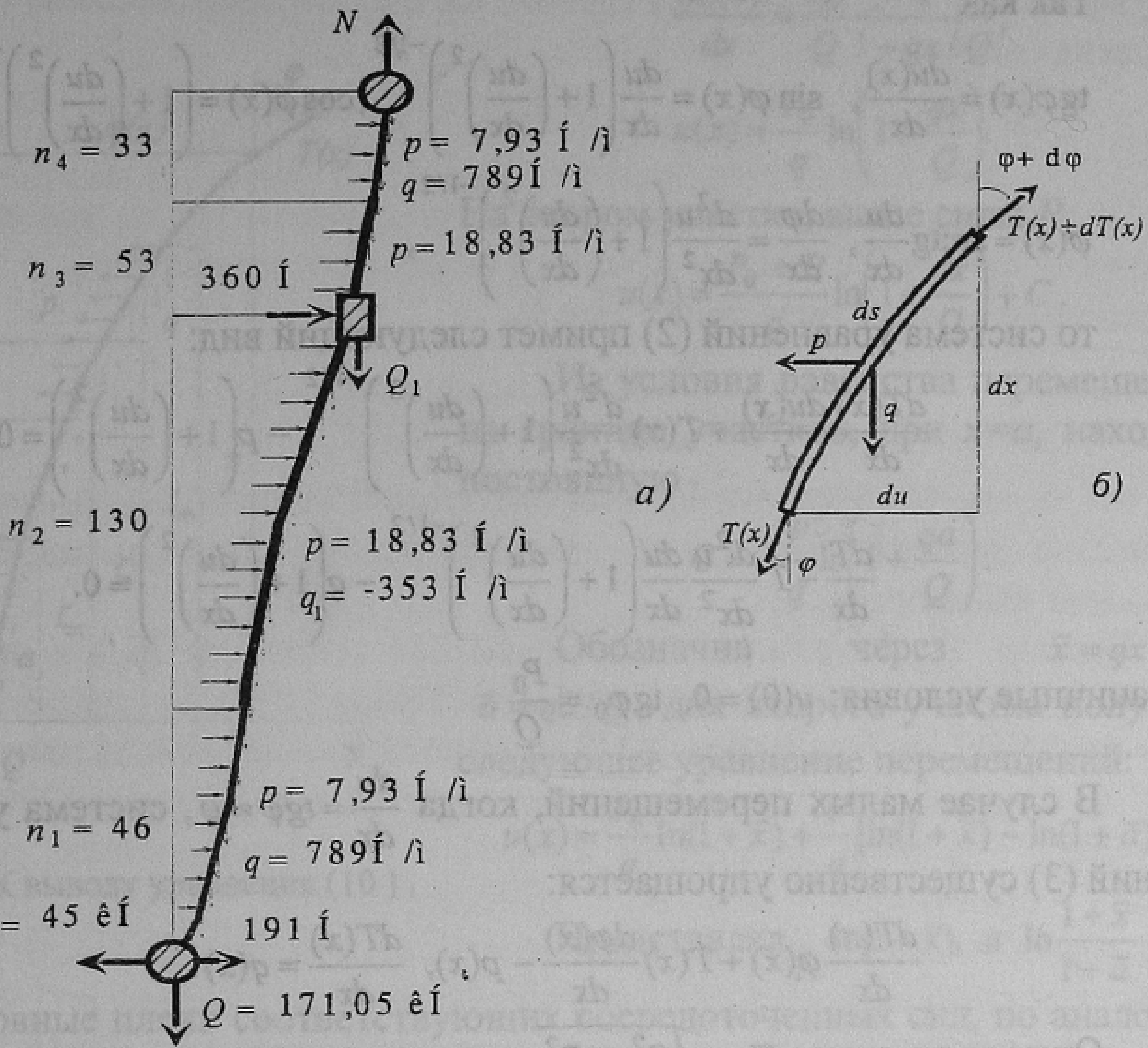

Рисунок 1- Расчётная схема транспортного трубопровода

Так как коэффициент кинематической вязкости воды $\nu \approx 1{,}1 \cdot 10^{-6}$ м^2/с, то уже при самых небольших скоростях набегающего потока жидкости v число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \dfrac{vd}{\nu} >> 10^3$, т.е. сопротивление движению будет пропорциональным квадрату скорости движения трубопровода диаметра d:

$$p = \frac{1}{2} C \rho v^2 d = 721 v^2 d, \text{ Н/м.} \tag{1}$$

Пренебрегая тангенциальной составляющей сил сопротивления, из условия равновесия элемента dx (рис. 1,б) получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} &-T(x)\sin\varphi(x) + (T(x)+dT(x))\sin(\varphi(x)+d\varphi(x)) - p\,ds = 0, \\ &-T(x)\cos\varphi(x) + (T(x)+dT(X))\cos(\varphi(x)+d\varphi(x)) - q\,ds = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Так как

$$\operatorname{tg}\varphi(x)=\frac{du(x)}{dx},\quad \sin\varphi(x)=\frac{du}{dx}\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)^{-1/2},\cos\varphi(x)=\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)^{-1/2},$$

$$\varphi(x)=\operatorname{arctg}\frac{du}{dx},\quad \frac{d\varphi}{dx}=\frac{d^2u}{dx^2}\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)^{-1/2},$$

то система уравнений (2) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}&\frac{dT(x)}{dx}\frac{du(x)}{dx}+T(x)\frac{d^2u}{dx^2}\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)^{-1/2}-p\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)=0,\\&\frac{dT}{dx}-T\frac{d^2u}{dx^2}\frac{du}{dx}\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)^{-1/2}-q\left(1+\left(\frac{du}{dx}\right)^2\right)=0.\end{aligned}\tag{3}$$

Граничные условия: $u(0)=0,\ \operatorname{tg}\varphi_0=\dfrac{P_0}{Q}$.

В случае малых перемещений, когда $\dfrac{du}{dx}=tg\varphi\approx\varphi$, система уравнений (3) существенно упрощается:

$$\frac{dT(x)}{dx}\varphi(x)+T(x)\frac{d\varphi(x)}{dx}-p(x),\ \ \frac{dT(x)}{dx}=q(x).\tag{4}$$

Отсюда с учетом $T_0=\sqrt{Q^2+P_0^2}$ находим усилие в произвольном сечении трубопровода $T(x)=qx+\sqrt{Q^2+P_0^2}=qx+T_0$, что приводит к дифференциальному уравнению деформированного трубопровода:

$$(T_0+qx)\frac{d^2u(x)}{dx^2}+q\frac{du(x)}{dx}-p(x)=0.\tag{5}$$

В случае малых перемещений уравнение деформированного трубопровода можно также получить из условия равновесия части стержня, рис. 2:

$$T(x)\sin\varphi(x)=P_0+P+p(x-\zeta_н),\quad T(x)\cos\varphi(x)=Q+qx.$$

Отсюда получаем

$$\operatorname{tg}\varphi(x)=\frac{du(x)}{dx}=\frac{P_0+P+p(x-\zeta_н)}{Q+qx}.\tag{6}$$

На нижнем участке (рис. 2), где $P=p=0$, уравнение (6) и его решение имеют вид:

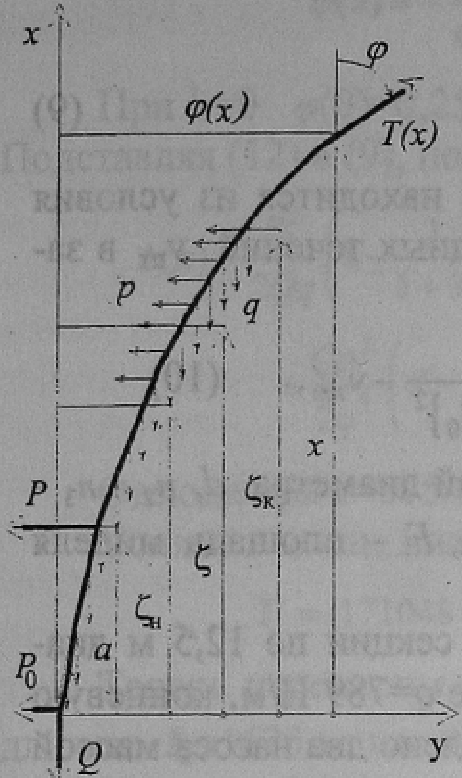

Рис.2. К выводу уравнения (10) ,

$$\frac{du(x)}{dx}=\frac{P_0}{Q}\frac{1}{1+qx/Q},$$

$$u(x)=\frac{P_0}{q}\ln\left(1+\frac{qx}{Q}\right).$$

На втором участке, выше силы P,

$$u(x)=\frac{P_0+P}{q}\ln\left(1+\frac{dx}{Q}\right)+C.$$

Из условия равенства перемещений на границе участков, при $x=a$, находим постоянную

$$C=-\frac{P}{q}\ln\left(1+\frac{qa}{Q}\right).$$

Обозначив через $\bar{x}=qx/Q$, $\bar{a}=qa/Q$, для второго участка получим следующее уравнение перемещений:

$$u(x)=\frac{P_0}{q}\ln(1+\bar{x})+\frac{P}{q}\left[\ln(1+\bar{x})-\ln(1+\bar{a})\right].$$

Представляя $\ln(1+\bar{x})$, и $\ln\frac{1+\bar{x}}{1+\bar{a}}$ за условные плечи соответствующих сосредоточенных сил, по аналогии с сосредоточенными силами можно учесть распределенную нагрузку суммированием влияния элементарных сосредоточенных сил $pd\zeta$, т.е. интегралом $\int\frac{p}{q}d\zeta\ln\frac{1+\bar{x}}{1+\bar{\zeta}}$. Так получаем уравнение деформированного трубопровода как гибкой весомой нити

$$u(x)=\frac{P_0}{q}\ln(1+\bar{x})+\sum_{0}^{x}\frac{P_i}{q}\ln\left(1+\frac{qx_i}{Q}\right)e(x-x_i)+\sum_{0}^{x}\int_{\zeta_н}^{\zeta_к}\frac{p}{q}\ln\frac{1+\bar{x}}{1+\bar{\zeta}}d\zeta, \quad (7)$$

где $e(x\text{-}x_i)$ – единичная функция, равная нулю при $x<x_i$ и единице - при $x\geq x_i$.

Отсюда дифференцированием можно найти уравнение углов поворота поперечных сечений $\varphi(x)=\frac{du(x)}{dx}$, а по углам поворота вычислить усилие в произвольном сечении трубопровода

$$T(x)=(Q+qx)\frac{1}{\cos\varphi(x)}. \quad (8)$$

Зная углы поворота, также можно вычислить вертикальные перемещения сечений

$$\Delta(x)=\frac{1}{2}\int_0^x\left(\frac{du(x)}{dx}\right)^2 dx. \qquad (9)$$

Предельная скорость движения системы находится из условия равновесия системы с учетом скорости подводных течений $v_{пт}$ в зависимости от усилия тяги движителя P_0

$$v=\frac{P}{\{721l[d(n_1+n_4)+0{,}78d_0(n_2+n_3)+F/l_0]l_0\}^2}-v_{пт}, \qquad (10)$$

где n_1+n_4 -количество обнаженных секций диаметра d, n_2+n_3 - количество поплавковых секций диаметра d_0, F – площадь миделя подвесной платформы.

Пример. Трубопровод, содержащий 264 секции по 12,5 м диаметром d =245 мм, имеет погонный вес в воде q=789 Н/м, концевую массу M=20·10^3 кг. На глубине 1075 м установлено два насоса массой 13600 кг каждый. На среднем участке с глубины 412,5 м до 2700 м подвешены поплавки диаметром d_0=0,64 м из сферопластика, создающие подъемную нагрузку интенсивностью q_1=353 Н/м. Интенсивность сил сопротивления набегающего потока жидкости на участке с поплавками p=18,83 Н/м, а на обнаженных участках p=7,926 Н/м. Сила сопротивления движению подвесной платформы 191 Н. На подвесной платформе установлен движитель с тяговым усилием P=45 кН. С учетом количества поплавковых $n_2+n_3=183$ и обнаженных $n_1+n_4=79$ секций по формуле (10) находим предельную скорость перемещения системы v=0,212 м/с (при $v_{пт}$=0). С учетом сил сопротивления движению и архимедовых сил имеем сосредоточенную нагрузку на нижнем конце трубопровода Q=171046 Н, P_0=44809 Н и равномерно распределенную вертикальную q=789 Н/м и горизонтальную p=-7,926 Н/м.

Уравнение деформированного трубопровода (7) на нижнем участке принимает вид:

$$u(x)=\frac{P_0}{q}\ln(1+\bar{x})-\frac{P}{q}\int_0^x\ln\frac{1+\bar{x}}{1+\bar{\zeta}}d\zeta=-\frac{px}{q}+\frac{P_0}{q}\left(1+\frac{pQ}{qP_0}\right)\ln\left(1+\frac{qx}{Q}\right). \qquad (11)$$

На основании этого уравнения в конце первого участка при x=575 м находим горизонтальное перемещение $u_1=70{,}6$ м. Дифференцируя (11), находим уравнение углов поворота сечений

$$\varphi(x) = -\frac{p}{q} + \frac{P_0}{Q}\left(1 + \frac{pQ}{qP_0}\right)\frac{Q}{Q+qx} = \frac{P_0 - px}{Q+qx}. \quad (12)$$

При x=0 $\varphi(0)$=0,256 рад, а в конце участка $\varphi_1=64{,}43\cdot10^{-3}$ рад. Подставляя (12) в (9), получим вертикальное перемещение

$$\Delta(x) = \frac{P_0^2}{2Qq}\left(1 - \frac{1}{1+\bar{x}}\right) - \frac{P_0 p}{q^2}\left(\frac{1}{1+\bar{x}} + \ln(1+\bar{x}) - 1\right) + \\ + \frac{Qp^2}{2q^3}\left(\bar{x} - 2\ln(1+\bar{x}) - \frac{1}{1+\bar{x}} + 1\right). \quad (13)$$

Отсюда при x=575 м находим Δ=5,08 м.

Усилие в конце нижнего участка находим по (8)

$$T_1 = (171048 + 789 \cdot 575) / \cos 0{,}0644 = 623424{,}7 \text{ Н}.$$

Теперь переносим систему координат в начало второго участка длиною l_2=1625 м, где действуют: $Q_1 = T_1 \cos\varphi_1 = 622131{,}2$,

$$P_1 = T_1 \sin\varphi_1 = 40139{,}5 \text{ Н}, \; p = 18{,}83 \text{ Н/м}, \; q = -353 \text{ Н/м}.$$

По (11), (12) находим горизонтальное перемещение и угол поворота сечения в конце участка:

$$u_2 = u_1 + u(l_2) = 215{,}65 \text{ м}, \; \varphi_1 = \varphi(l_2) = 0{,}230 \text{ рад}.$$

Вертикальное перемещение в конце второго участка

$$\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta(l_2) = 5{,}08 + 7{,}297 = 12{,}37 \text{ м}.$$

Усилие в конце второго участка (8)

$$T_2 = (623{,}42 - 0{,}353 \cdot 1625)\cos 0{,}234 = 48{,}44 \text{ кН}.$$

Аналогично производится расчет на следующих участках. Результаты такого упрощенного расчета и решения системы уравнений (3) на ЭВМ методом Рунге-Кутта показаны на рис. 3.

Программа расчета позволяет выбирать усилие тяги движителя в зависимости от скорости перемещения системы, вычислять количество поплавковых секций, определять напряжения в сечениях трубопровода и его деформированное состояние, а также учитывать направление и скорость подводных течений.

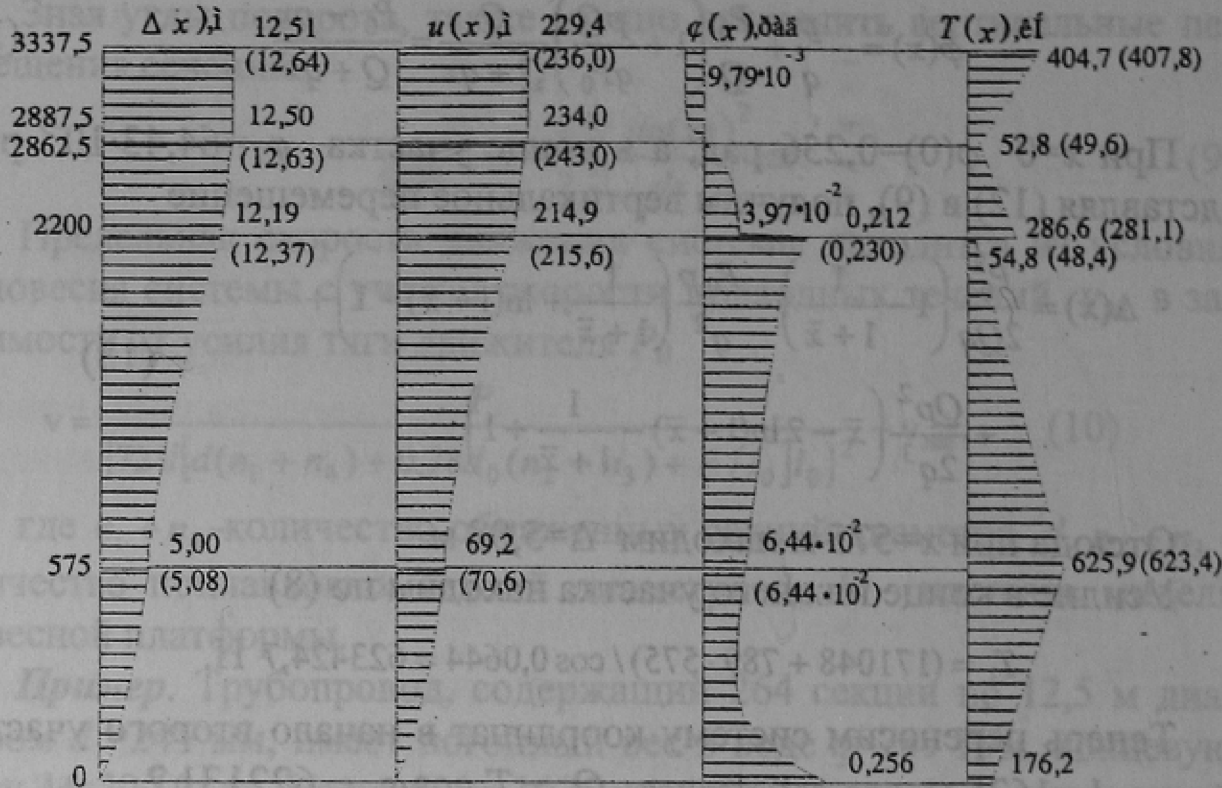

Рисунок 3 - Эпюры напряжённо-деформированного состояния транспортного трубопровода: $\Delta(x)$ – вертикальные перемещения; $u(x)$- горизонтальные перемещения; $\varphi(x)$ – углы поворота сечений; $T(x)$ – продольные усилия.

УДК 622.012

ПОВЫШЕНИЕ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ КОММУТАЦИИ НАГРУЗКИ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ИСТОЧНИКУ ПИТАНИЯ

Шевченко В.Ф. к.т.н, доц., Неежмаков С.В. бакалавр,
Донецкий государственный технический университет

Предлагаемый метод повышает надежность обеспечения искробезопасности контактов переносных измерительных устройств.

The offered method raises a reliability of security safety from a scintilla of contacts of portable measuring devices.

В шахтах Украины с повышением глубины разработки угольных пластов увеличивается выделение метана и повышается опасность использования устройств, имеющих электрические источники питания, а поэтому необходимо повысить надежность искробезопасных