

УДК 629.124.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ УКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДА ПЛАВУЧИМ СРЕДСТВОМ

Игнатович В.С., Лекарев Г.В.

Предлагается экспериментально-расчётная модель укладки подводного трубопровода s-образным способом с трубоукладочного судна.

В современных условиях укладка подводных трубопроводов осуществляется различными способами, основным из которых является укладка со специализированных плавсредств - трубоукладочных судов (ТУС). Процесс монтажа трубопровода на них происходит конвейерным методом: на монтажной линии, расположенной на верхней палубе ТУС, очередная секция приваривается к трубопроводу, по мере передвижения судна стык последовательно проходит сварочные посты, посты рентгеноконтроля изоляции и бетонирования. Затем плетъ трубопровода удерживаемая натяжными устройствами, по специальной жесткой приставке - стингере опускается на дно. Угол наклона стингера, его длина и кривизна назначаются в зависимости от глубины моря так, чтобы напряжения в трубопроводе на переходном участке были наименьшими.

В практике строительства подводных трубопроводов отмечаются случаи его повреждения при сходе со стингера, что объясняется недостаточностью информации о его напряжённом состоянии в системе "ТУС - стингер - трубопровод".

При расчете трубопровода на его верхнем выпуклом участке учитываются напряжения, возникающие от изгиба и натяжения трубопровода [1].

С целью выбора метода определения напряженного состояния в трубопроводе при его укладке на грунт s-образным способом с плавучего средства были проведены

крупномасштабные испытания на базе Нижегородского политехнического института [2]. Схема моделирования изображена на рисунке 1.

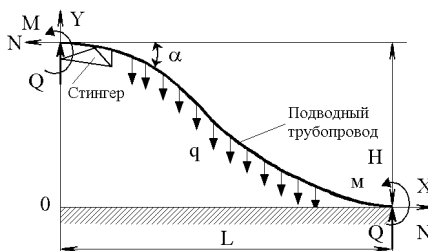


Рисунок 1 - Схема моделирования укладки подводного трубопровода

В качестве исходного натурального был выбран трубопровод со следующими характеристиками: наружный диаметр трубопровода со слоем бетона - 950мм; наружный диаметр жесткой трубы - 820мм; внутренний диаметр жесткой трубы - 790мм.

Критерии, по которым проводилось моделирование: геометрическое подобие наружных размеров и формы поверхности; подобие жесткости

модели и натуры на изгиб; равенство отношений максимальных напряжений от изгиба к максимальным напряжениям от растяжения; подобие массовых и инерционных сил.

Моделью исходного трубопровода служила труба из поливинилхлорида. Большая разница в модулях упругости между материалом натуры и модели позволила при заданном уровне экспериментальных нагрузок обеспечить подобие жёсткости как на продольное растяжение, так и на изгиб.

Для выбора способа определения напряжений в реальном трубопроводе выполнен расчет напряжений в модели с последующим сравнением их с экспериментальными значениями напряжений. Напряжённое состояние трубопровода при укладке его на грунт рассчитывается по методу расчета жестких нитей. При этом учитываются следующие характеристики трубопровода: погонная масса трубы в воде - q ; момент сопротивления сечения трубы - W ; предельное значение изгибающего момента - $M_{np} = [\sigma] \cdot W$, где $[\sigma]$ - допускаемое напряжение; натяжение трубопровода, обеспечиваемое судном и массой трубы - N . Следует иметь в виду, что в сечении трубы в районе схода её со стингера наибольшая сила натяжения судна может быть больше, чем предельное сопротивление трубы разрыву.

Для уменьшения изгибающих напряжений в трубах на переходном участке L используют разгружающие поддерживающие понтоны (поплавки), стингер и натяжение трубопровода продольной силой N . При этом переходная кривая становится более полой и трубопровод работает как жесткая нить, в которой изгибающие напряжения снижаются. Поэтому при решении настоящей задачи для реального трубопровода необходимо определить длину переходного участка L , угол наклона стингера α , величину разгрузки и силу натяжения N . Для модели задача упрощается: для каждого варианта принимается $\alpha = \text{const}$, $L = \text{const}$, $q = \text{const}$, силы поддержания не учитываются, а натяжение N определяется только массой трубы.

С учетом предпосылок о квазистатичности нагрузок, работе системы в пределах упругих деформаций и малых стрелок используем уравнение упругой линии жёсткой нити в виде [3]

$$y = c_1 \cdot Chkx + c_2 \cdot Shkx + \frac{q \cdot x^2}{2 \cdot N} + c_3 \cdot x + c_4, \quad (1)$$

где $k = \sqrt{\frac{N}{E \cdot I}}$; N - продольная сила в трубопроводе $q = 0.014 \text{ кН/м}$ - погонная масса трубы в воде; $E = 2,96 \cdot 10^3 \text{ МПа}$; $I = 30,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ - момент инерции сечения трубы.

Натяжение нити

$$N = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f} - \frac{48 \cdot E \cdot I}{5 \cdot L^2} = 359 \text{ Н},$$

где $f \cong \frac{1}{20} \cdot L = \frac{12}{20} = 0,6$ м- стрелка прогиба нити (трубы);

Тогда $k = 0.63 \cdot 10^{-4} \cdot \text{м}^{-1}$.

Для нашей схемы на рисунке 1 произвольные постоянные $c_1 \dots c_4$ можно определить, используя граничные условия

$$x = 0; \quad y = 0; \quad y' = \alpha; \quad x = L; \quad y = H; \quad y'' = 0.$$

Тогда выражение для изгибающего момента по длине переходного участка трубопровода примет вид

$$M = E \cdot I \cdot \left[A \cdot k^2 \cdot \left(Chkx - \frac{ChkL}{ShkL} \cdot Shkx \right) - \frac{q}{N} \cdot \left(\frac{Shkx}{ShkL} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

$$\text{где: } A = \frac{H - \alpha \cdot L - \frac{q}{N} \cdot \left[\frac{L^2}{2} - \frac{1}{k^2} \cdot (ShkL - kL) \right]}{kL \cdot ChkL - ShkL}.$$

С уменьшением значений угла α изгибающий момент в сечении $x=0$ увеличивается и при $\alpha=0$ соответствует моменту при жёсткой заделке конца трубы. При увеличении α опорный изгибающий момент уменьшается и равен нулю при значениях α , соответствующих свободному опиранию конца трубы на плавсредстве.

Изгибающий момент и соответствующие им напряжения для различных углах наклона стингера при $x=4,07 \text{ м}$ (точка схода трубопровода со стингера) приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Напряжения в трубопроводе в точке схода его со стингера

α , град.	A	$M, \text{кН} \cdot \text{м}$	$\sigma_{теор}, \text{МПа}$	$\sigma_{эсп}, \text{МПа}$
$9^\circ 20'$	1,47	356,90	4,197	4,2
$11^\circ 50'$	1,46	356,84	4,196	3,8
$14^\circ 20'$	1,45	356,81	4,195	3,5

Таким образом, сравнение результатов расчёта и эксперимента показывает, что расчётные $\sigma_{теор}$ и экспериментальные $\sigma_{эсп}$ напряжения на наиболее опасном участке - точке схода подводного трубопровода со стингера при изменении угла его наклона различаются в пределах 2...19%. В силу характера материала модели трубопровода т.е. с учётом

анизотропности свойств в пластмассовых трубах, данный результат следует считать удовлетворительным

Следовательно, выражение (2) можно применять для расчёта изгибающих напряжений на наиболее опасном, с точки зрения поломки трубопровода участке схода его со стингера на начальной стадии проектирования трубоукладочных судов

Библиографический список

1. Engelmann H. Verlegung von Gas - und olfernleitungen im Meer / H. Engelmann// GWF.Gas/Erdgas. — 1982. — 123. — №4. — P. 150 – 157

2. Бадасен В.А. Экспериментальные исследования системы стингер - трубопровода крупномасштабной модели трубоукладочного судна/ В.А.Бадасен, Д.Н. Великосельский, Г.В. Лекарев // Сб. науч. тр. ВСНТО им. акад. А.Н. Крылова. — Севастополь, 1984. — С. 34 – 36.

3. Бородавкин П.П. Сооружение магистральных трубопроводов / П.П.Бородавкин, В.Л.Березин. — М.: Недра, 1987. — 471 с.

Поступила в редакцию 17.09.2001 г.