

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРУБНОГО СТАВА ГЛУБОКОВОДНОГО НАСОСНОГО ГИДРОПОДЪЕМА

Кириченко Е.А., проф., докт. техн. наук,  
Национальный горный университет, г. Днепропетровск

*Сформулирована краевая задача и определены параметры вертикальных колебаний трубного става при волновой качке судового добычного комплекса на морском волнении.*

*Сформульована гранична задача й визначені параметри вертикальних коливань трубного поставу при хвильовій качці судового видобувного комплексу в разі морського хвилювання.*

В условиях эксплуатации добычная установка будет постоянно подвержена вертикальным колебаниям, вызванными волнением поверхности океана. В связи с этим, на основе разработанных методик и их программно-алгоритмического обеспечения [1] были выполнены расчеты по определению собственных частот и параметров напряженно-деформированного состояния добычного трубопровода при вертикальных колебаниях.

Разработанные методики расчета собственных значений заключается в использовании передаточных матриц, аналогично импедансному методу в теории электрических колебаний и колебаний жидкости в пневмогидросистемах.

Центральный трубопровод трубного става представляет собой ступенчатую трубную конструкцию, состоящую из нескольких секций труб различного типоразмера. Кроме того, по высоте подъемного трубопровода расположены значительные сосредоточенные массы различного функционального предназначения.

Для расчетов использовались исходные данные по определению динамики и прочности трубного става для базового варианта трубной системы подъема, выданные НТЦММокееанмаш.

Кроме того, были выполнены некоторые параметрические расчетные исследования для става различной длины (длина варьировалась в диапазоне от  $L = 1000$  м до  $L = 6000$  м с шагом в 1000 м,  $L$  – длина трубопровода) при заданных колебаниях его коренного конца, которые возникают при качке судна на волнах различной бальности. При этом

бальность волн рассматривалась в диапазоне от 0 до 9 единиц, амплитуда вертикальных перемещений коренного конца трубопровода изменялась от 0,03 до 10 м с частотой качки от 1,4 до 0,5 с<sup>-1</sup>.

При расчете вертикальных колебаний трубного става влияние наличия сосредоточенных масс в точках  $x = x_i$  учитывалось с помощью условий сопряжений:

$$u_{i+1}(x_i, t) - u_i(x_i, t) = 0; \quad (1)$$

$$EF_i(x_i) \frac{\partial u_{i+1}(x_i, t)}{\partial x} - EF_i(x_i) \frac{\partial u_i(x_i, t)}{\partial x} - M_i \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $u$  – вертикальное смещение;  $x$  – вертикальная координата, направленная вертикально вниз;  $t$  – время;  $E$  – модуль Юнга;  $F$  – площадь поперечного сечения трубопровода по металлу.

Первое условие определяет равенство продольных смещений в точках сопряжений соседних участков трубопровода; второе – равенство осевых сил с учетом сил инерции массы  $M_i$ .

В местах изменения диаметров участков става второе условие сопряжения записывалось в виде:

$$EF_{i+1}(x_i) \frac{\partial u_{i+1}(x_i, t)}{\partial x} = EF_i(x_i) \frac{\partial u_i(x_i, t)}{\partial x}. \quad (3)$$

Для формулировки граничных условий было принято, что коренной конец трубопровода жестко связан с массой подъемно-спускового механизма –  $M_{н.с.м.}$ , которая соединена с судном посредством демпфера, а ходовой конец трубопровода жестко связан с массой технологической платформы –  $M_{пл}$ . При этом внутреннее продольное усилие в нижнем сечении трубопровода уравнивается силой инерции массы платформы, так что граничное условие при  $x = L$  запишется в виде:

$$EF \frac{\partial u(L, t)}{\partial x} - M_{пл} \frac{\partial^2 u(L, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

В верхнем сечении трубопровода внутреннее усилие уравнивается силой инерции сосредоточенной массы  $M_{н.с.м.}$  и реакциями демпфирования компенсатора волновой качки и упругой заделки, так что граничное условие при  $x = 0$  имеет вид:

$$EF \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = -M_{н.с.м.} \frac{\partial^2 u(x_i, t)}{\partial t^2} - k \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} - k_1(u(x, t) + A \sin \omega t), \quad (5)$$

где  $k$  и  $k_1$  соответственно коэффициенты демпфирования и жесткости компенсатора;  $A$ ,  $\omega$  – амплитуда и частота морских волн.



Начальные условия, т.е. закон смещения сечений става в начальный момент времени  $t = 0$ , и начальная скорость задавались в виде:

$$u(x,0) = u_0(x); \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

где  $u_0(x)$  – смещение сечений, соответствующее вертикальному равновесному состоянию.

При расчете собственных вертикальных колебаний амплитуда морских волн полагалась равной нулю, а нижнему сечению (ходовому концу) давалось приращение  $u_L = 3$  м при нулевой начальной скорости.

В результате расчетов были определены первые три собственные частоты продольных колебаний трубного става:

$$\omega_1 = 0,537 \frac{1}{\text{сек}}; \quad \omega_2 = 1,864 \frac{1}{\text{сек}}; \quad \omega_3 = 3,322 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Информация по частотному спектру необходима для отстройки от резонансных режимов при различных силовых и кинематических параметрах возбуждения.

Результаты расчета параметров вертикальных колебаний представлены на графиках рис. 1 – 4. Именно, на рис. 1 показана амплитуда

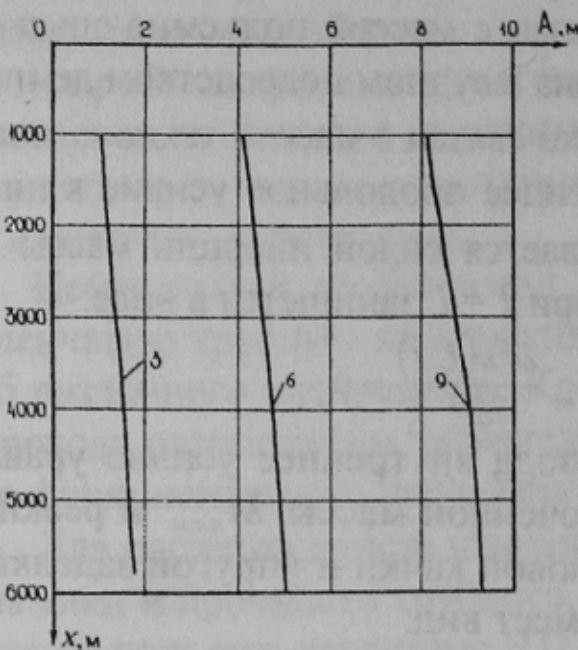


Рис.1 – Зависимость амплитуды вертикальных колебаний ходового конца добычного трубопровода от его длины при различной бальности поверхности моря

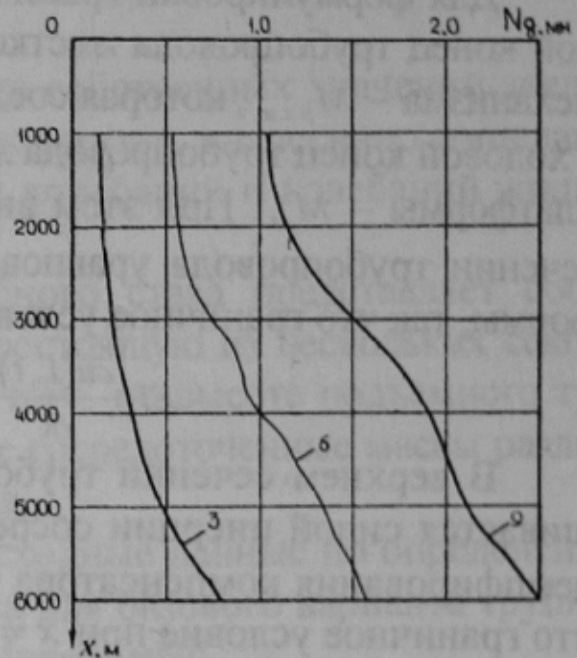


Рис.2 – Зависимость амплитуды динамической составляющей нормального усилия на коренном конце от длины става при вертикальных колебаниях различной бальности.

ходового конца при варьировании длины трубопровода для волнения моря 3, 6 и 9 баллов, что соответствует номеру кривой на графике. Как видно, с возрастанием длины конструкции амплитуда колебаний ходового конца монотонно возрастает почти по линейной зависимости.

В результате расчетов установлено, что максимальные значения нормальных усилий в поперечных сечениях трубопровода соответствуют его коренному концу для различных длин конструкции и бальности волнения моря. Значение амплитуд нормальных динамических усилий приведено на рис. 2, который соответствует условиям рис. 1. Из рис. 2 видно, что величины нормальных усилий быстро нарастают в зависимости от длины конструкции свыше 4000 м, причем градиент нарастания прямопропорционален бальности моря. В предельном случае (длина става – 6000 м, волнение – 9 баллов) динамическая составляющая нормальной силы превышает 40 % от статической компоненты.

Анализ динамических нормальных напряжений в элементах става показал, что при длине конструкции до 3500 м максимальные напряжения соответствуют коренному концу трубопровода для всего исследуемого диапазона волнения моря, а при больших длинах максимум динамических напряжений смещается к середине трубопровода.

На графике рис. 3 показано распределение динамического нормального напряжения по длине става для разной бальности волнения моря. Броски напряжения соответствуют изменению типоразмеров трубных секций конструкции става, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрия добычного трубопровода

Диаметр участка, м	0,225	0,221	0,218	0,212	0,242	0,320
Длина, м	2569	547	534	2042	220	58

С точки зрения прочностного расчета наибольший интерес представляют максимальные суммарные нормальные напряжения, которые получаются наложением динамической амплитуды напряжений на их статическое распределение. Указанное положение представлено на рис. 4 для предельной длины трубопровода (6000 м) в условиях волнения моря 6 и 9 баллов. Из рисунка следует, что при предельно допустимом уровне напряжений  $[\sigma] = 450$  МПа (на рис. 4 показано пунктиром) при 9-ти бальном шторме конструкция попадает в условия разрушения.



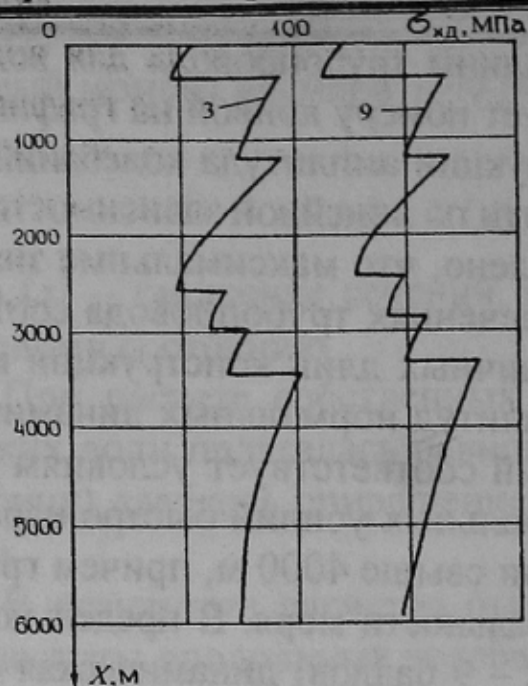


Рис.3 – Распределение амплитуд динамического нормального напряжения по длине става при общей длине  $L = 6000$  м для различной бальности поверхности моря

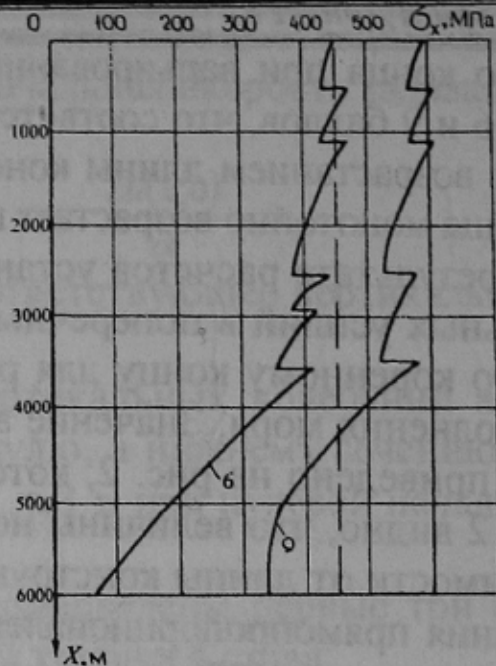


Рис.4 – Распределение суммарных нормальных напряжений по длине става при общей длине  $L = 6000$  м

Приведенные результаты исследования прочностных динамических характеристик трубного става могут быть полезны при определении технологии отработки разрабатываемого месторождения, а также при установлении границ возможного использования добычно-го комплекса.

Список литературы

1. Кириченко Е.А. Исследование собственных частот продольных колебаний трубного става глубоководного гидроподъема // Геотехническая механика: Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Дніпропетровськ: Поліграфіст. – 2000. – Вып. 18. – С. 75 – 80.
2. Куликов Д.В., Кириченко Е.А. Определение напряженно-деформированного состояния трубного става при воздействии квазистатических и волновых нагрузок // Геотехническая механика: Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Дніпропетровськ: Поліграфіст. – 1998. – Вып. 9. – С. 81 – 86.