

It has been found that the IMN — sinter mixes are featured by low roasting properties when they are sintered according to conventional technological patterns. For fine iron-manganese nodules fractions of 5–0 mm it is advisable to use briquetting at a pressure of 0.25–0.5 t/cm², while for powder-like fractions (< 250 μm) it is appropriate to use pelletizing of humidified mixes (28–32% H₂O) with subsequent roasting of briquettes and pellets under 850–900 °C. The conceptual possibility of producing metallized sinter product by reduction roasting of concretions under 850–900 °C has been demonstrated.

УДК 621.695:622.276

Е.А. Кириченко¹, В.П. Франчук¹, В.В. Евтеев¹, В.Г. Шворак¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА ЭРЛИФТНОГО ГИДРОПОДЪЕМА ПРИ МОРСКОМ ВОЛНЕНИИ

Сформулирована начально-граничная задача, в рамках которой выполнены расчеты по определению собственных частот и параметров напряженно-деформированного состояния транспортного трубопровода глубоководного эрлифтного гидроподъема при вертикальных колебаниях, вызванных морскими волнениями.

Приведенные результаты исследования служат исходными данными при обосновании параметров глубоководных гидроподъемов, обеспечивающих работоспособность и энергосбережение установок в составе горно-морских добычных комплексов.

Специфика добычи минерального сырья с больших глубин требует разработки научно обоснованного метода расчета параметров глубоководного гидроподъема, учитывающего новую область применения эрлифтов. Целью данной статьи является определение параметров вертикальных колебаний эрлифтного трубопровода и расчет его напряженно-деформированного состояния под действием волновых нагрузок.

Разнообразие методов расчета эрлифтов можно объяснить применением этих установок в различных областях народного хозяйства. В основном расчетные методики носят прикладной характер, базируются на использовании эмпирических коэффициентов и поэтому применимы лишь для ограниченных условий.

Так, предложенный В.Г. Гейером и Н.Г. Логвиновым [3] расчетный метод основывается на использовании безразмерных расходных характе-

© Е.А. Кириченко¹, В.П. Франчук¹, В.В. Евтеев¹, В.Г. Шворак¹:

¹ Национальный горный университет, Днепропетровск.

ристик и применим для эрлифтов с короткими подводными трубами, сопротивление которых не оказывает существенного влияния на параметры рабочих режимов установок. Метод Б.А. Белова [2] для расчета эрлифтных буровых снарядов с гибкой подъемной трубой ориентирован на определение параметров установок при бурении скважин на шельфе и не может быть использован для глубоководных гидроподъемов.

Наиболее существенные результаты по расчету параметров глубоководных эрлифтов получены в Донецком техническом университете [1, 4, 7] с использованием нового критерия подобия a_s — относительного динамического погружения смесителя. Так в работе Б.И. Адамова [1] обосновывается целесообразность применения односмесительного эрлифта при $a_s = 0,675$, что, по мнению автора, соответствует максимальному значению к.п.д. установок. Результаты исследований, выполненных Н.И. Скорыниным [7], говорят о преимуществе многосмесительной конструкции эрлифтов, однако предложенная методика позволяет определить только одну точку на расходной характеристике гидроподъема, соответствующую экономичному режиму работы установки. А.В. Игнатов [4] приходит к выводу о том, что при всех сочетаниях подводящей трубы и твердых частиц, а также их плотности минимум удельных энергозатрат соответствует оптимальному значению объемной консистенции пульпы, равному 0,06.

Кроме вышеуказанных, широкое распространение получили методы М. Вебера, Г. Грабова, Х. Безе, Г. Клаусса, Уэки-Сиро, Хазитеодору, Полярского, использующие различной сложности уравнения гидродинамики многофазных смесей.

Следует отметить, что все известные методы справедливы для расчета параметров эрлифтного течения в случае неподвижного прямолинейного трубопровода, в то время как в реальных морских условиях транспортный трубопровод принимает изогнутую деформированную форму в толще воды, а также испытывает вертикальные колебания вследствие волновой качки. В данной работе предпринята попытка частично восполнить этот пробел.

Для достижения поставленной цели на основе разработанных методик и их программно-алгоритмического обеспечения [5] были выполнены расчеты по определению собственных частот и параметров напряженно-деформированного состояния добычного трубопровода при вертикальных колебаниях.

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

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

Для расчетов использовались исходные данные по определению динамики и прочности трубного става для базового варианта трубной системы подъема производительностью 100000 тонн в год; по сухому сырью с глубины 6000 м.

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 при заданных колебаниях его коренного конца, которые возникают при качке судна на волнах различной балльности. При этом балльность волн рассматривалась в диапазоне от 0 до 9, амплитуда вертикальных перемещений коренного конца трубопровода изменялась от 0,03 до 10 м. с частотой качки от 1,4 до 0,5 с⁻¹.

При расчете вертикальных колебаний трубного става влияние наличия сосредоточенных масс в точках $x \approx x_i$ 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 — $M_{п.с.м.}$, которая соединена с судном посредством демпфера, а ходовой конец трубопровода жестко связан с массой технологической платформы — $M_{п.п.}$. При этом внутреннее продольное усилие в нижнем сечении трубопровода уравнивается силой инерции массы платформы, так что граничное условие при $x = L$ запишется в виде

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

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

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

где k, k_1 — соответственно коэффициенты демпфирования и жесткости компенсатора; A, ω — амплитуда и частота морских волн.

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

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

где $u_0(x)$ — смещение сечений, соответствующее вертикальному равносному 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.

Как видно на рис. 1, с возрастанием длины конструкции амплитуда колебаний ходового конца монотонно возрастает почти по линейной зависимости.

Как оказалось, наиболее значительную динамическую добавку к статическому напряженному состоянию вносят вертикальные колебания [6].

Расчетами установлено, что максимальные значения динамических нормальных усилий в поперечных сечениях трубопровода соответствуют его коренному концу для различных длин конструкции и балльности волнения моря. Из рис. 2 видно, что величины нормальных усилий быстро нарастают в зависимости от длины конструкции свыше 4000 м, причем градиент нарастания прямо пропорционален балльности моря. В предельном случае (длина става — 6000 м, волнение — 9 баллов) динамическая составляющая нормальной силы превышает 40% статической компоненты.

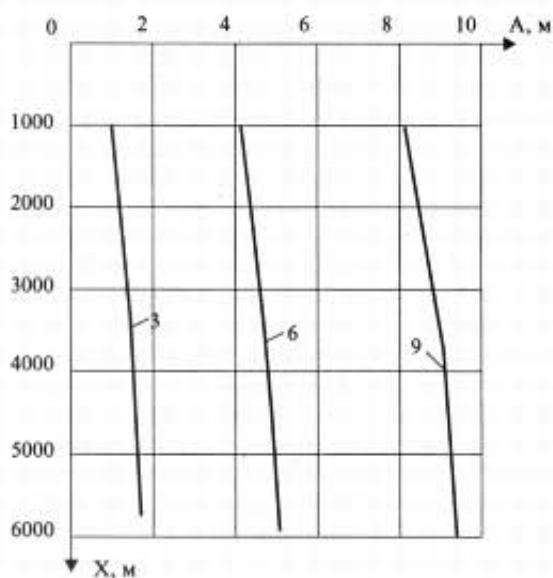


Рис. 1. Зависимость амплитуды вертикальных колебаний ходового конца добычного трубопровода от его длины в условиях волнения моря 3, 6, 9 балл

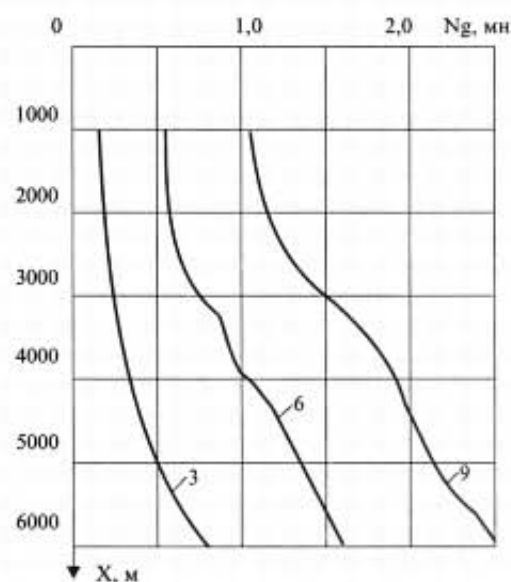


Рис. 2. Зависимость амплитуды динамической составляющей нормального усилия на коренном конце от длины става при вертикальных колебаниях 3, 6, 9 балл

Анализ динамических нормальных напряжений в элементах става показал, что при длине конструкции до 3500 м максимальные напряжения для всего исследуемого диапазона волнения моря соответствуют коренному концу трубопровода, а при больших длинах максимум динамических напряжений смещается к середине трубопровода (рис. 3).

Скачки напряжения соответствуют изменению типоразмеров трубных секций конструкции става, которые приведены в табл. 1.

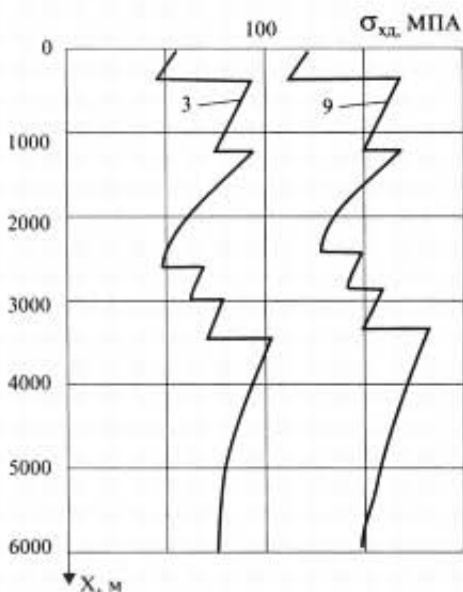


Рис. 3. Распределение амплитуд динамических нормальных напряжений по длине става при общей длине $L = 6000$ м, в условиях волнения моря 3 и 9 балл.

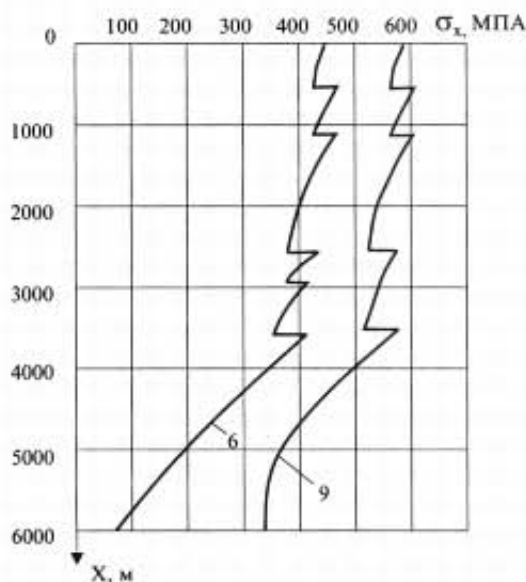


Рис. 4. Распределение суммарных нормальных напряжений по длине става при общей длине $L = 6000$ м в условиях волнения моря 6 и 9 балл.

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. Из рис. 4 следует, что при предельно допустимом уровне напряжений $[\sigma] = 450$ МПа (показано пунктиром) при 9-ти бальном шторме конструкция попадает в условия разрушения.

Дальнейшим этапом исследований является модификация известных методов расчета эрлифтных течений с учетом вертикальных колебаний транспортного трубопровода при морском волнении и, в конечном итоге, обоснование параметров глубоководных гидроподъемов, обеспечивающих работоспособность и энергосбережение установок в составе горно-морских добычных комплексов.

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

1. *Адамов Б.И.* Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Автореф. дис. канд. техн. наук.— Донецк, 1982.— 192 с.

2. *Белов, Б.А.* Исследование и разработка технологических параметров и конструктивных схем эрлифтных снарядов для бурения неглубоких скважин в море: Автореф. дис. канд. техн. наук.— М., 1980.— 194 с.

3. *Гейер В.Г., Логвинов Н.Г.* О свойствах безразмерных характеристик эрлифтов // Разработка месторождений полезных ископаемых.— Киев: Техніка.— 1973.— № 31.— С. 51–56.

4. *Игнатов А.В.* Разработка эрлифтных и насосно-эрлифтных подъемов гидро-смеси с больших глубин: Автореф. дис. канд. техн. наук.— Донецк, 1988.— 243 с.

5. *Кириченко Е.А.* Исследование собственных частот продольных колебаний трубного става глубоководного гидроподъема // Геотехническая механика: Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины.— Днепропетровськ: Поліграфіст.— 2000.— Вып. 18.— С. 75–80.

6. *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.— Днепропетровськ: Поліграфіст, 1998.— Вып.9.— С. 81–86.

7. *Скорынин Н.И.* Исследование и разработка глубоководных многосмесительных эрлифтных установок для подъема горных масс: Автореф. дисс. канд.наук.— Донецк, 1984.— 205 с.

Сформульована початково-гранична задача, в рамках якої виконані розрахунки з визначення власних частот і параметрів напружено-деформованого стану транспортного трубопроводу глибоководного ерліфтного гідропідйому при вертикальних коливаннях, спричинених морським хвилюванням.

Приведені результати дослідження служать початковими даними при обґрунтуванні параметрів глибоководних гідропідйомів, що забезпечують працездатність і енергозбереження установок у складі гірничо-морських видобувних комплексів.

The initial-boundary task is formulated, within the framework of which one the calculations on determination of own frequencies and parameters of tensely-deformed state of transport pipeline of an deep-water airlift hydraulic hoisting are executed while vertical oscillation resulting from marine agitation.

The reduced results of research serve by basic data in substantiation of parameters of deep-water hydraulic hoisting ensuring functionality and energysaving of the installations in a structure of mining-marine complexes.