

УДК 539.3

КЕРИМОВ З.Г.

ДИНАМИКА ВОДООТДЕЛЯЮЩЕЙ КОЛОННЫ ПОЛУПОГРУЖНОЙ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ

В середине шестидесятых годов академиком А.Х. Мирзаджанзаде мне было поручено исследовать динамику бурильной колонны. Этот вопрос в дальнейшем и послужил темой моей кандидатской и докторской диссертаций. Полученные результаты вошли в мою монографию «Динамические расчеты бурильной колонны», изданные в Москве, а также в учебные пособия «Теория колебания в нефтепромысловом деле» изданные в соавторстве с А.Х. Мирзаджанзаде и М.Г. Копейкисом с союзным грифом [1]. В дальнейшем исследования в этой области нами были продолжены. Перед нами, в последние годы, нефтяниками и машиностроителями поставлены задачи исследовать динамику водоотделяющей колонны и определить ее долговечность в условиях бурения скважин в Каспийском море. Ниже приводятся результаты этих исследований, которые были внедрены при разработке конструкции водоотделяющей колонны ППБУ типа «Шелф».

Перечень условных обозначений, единиц и символов.

- x- координата, y- прогиб водоотделяющей колонны, м;
 t- время, сек;
 Q- срезающая сила в поперечном сечении стержня, Н;
 M- изгибающий момент на том же сечении, Нм;
 T- осевое натяжение в сечении X, Н;
 E- модуль упругости, H / M^2 ;
 L- длина водоотделяющей колонны от устья подводной скважины до ППБУ, М;
 j- суммарный момент инерции стояка и бурильной колонны, M^4 ;
 Jс- момент инерции сечения морского стояка, M^4 ;
 d_1 - наружный диаметр водоотделяющей колонны, М;
 d_2 - диаметр поплавков, М;
 H- глубина моря, М;
 h_1 - высота волны, М;
 λ_0 - длина волны, М;
 g- ускорение свободного падения, $м/сек^2$;
 C- коэффициент присоединенной массы при круглой опоре ($c=1,7$)
 f- коэффициент сопротивления для поперечного движения стояка в морской воде ($f=1,2$)
 ρ_1 - плотность морской воды; $кг/м^3$
 m_{11} - масса единицы длины стояка, $кг/м$;
 m_{21} - масса погонного метра бурильной трубы; $кг/м$;
 m_{31} - масса вытесненной жидкости на единицу длины бурильной колонны, $кг/м$;

- m_{32} - масса жидкости, заключенной в единице длины бурильной колонны, кг/м;
 m_{22} -масса жидкости, заключенной в единице длины кольцевого пространства, кг/м;
 m_{12} - масса жидкости, вытесненной единицей длины стояка, кг/м;
 T_2 -натяжение бурильной колонны, Н;
 T_2 -натяжение водоотделяющей колонны, Н;
 v_1 -скорость промывочной жидкости в бурильной трубе, м/сек;
 v_2 -скорость промывочной жидкости в затрубном пространстве, м/сек;
 v_3 -скорость морского течения, м/сек;
 A_1 - горизонтальное смещение ППБУ от центра скважины за счет дрейфа, м;
 A_2 - то же самое за счет крена, м;
 ω_1 - частота дрейфа, 1/сек;
 ω_2 - частота бортовой качки, 1/сек;
 δ_1, δ_2 - коэффициенты сочетания инерционной и скоростной составляющих волновой нагрузки, зависящие от положения преграды;
 β_1, β_2 - соответствующие коэффициенты при линеаризованной силе сопротивления поперечному движению стояка при дрейфе и бортовой качке;
 Δ - интервал разбиения, м;
 Δx - шаг разбиения, м;
 количество точек разбиения;
 $\lambda_0 \delta_j$ - количество амплитуд Maj в i - ом интервале;
 r_j - количество блоков Нагружения;
 T_j - период дрейфа при j - ом режиме;
 σ_{1g} - предел выносливости материала труб водоотделяющей колонны, МПа;
 N_0 - базовое количество циклов нагружения;
 σ_{aj} - амплитуда напряжения в описном сечении водоотделяющей колонны, МПа;
 m' - показатель кривой усталости материала труб;
 $t_j = \frac{v_{js}}{v_\delta}$; v_{js} - число циклов повторения амплитуд напряжения σ_{ϕ_0} ; v_δ - общее число циклов в блоке нагружения.

$$h_2 = \frac{\pi h_1^2}{4 \lambda_1 f h k L}; \quad K = \frac{2\pi}{\lambda_0} - \text{волновое число, м}^{-1}.$$

Водоотделяющая колонна связывает устье подводной скважины с плавучим буровым основанием, служит для направления бурового инструмента в скважину и обеспечивает бурение с замкнутой циркуляцией.

В процессе работы водоотделяющая колонна, или как иногда ее называют морской стояк или же морской райзер, испытывает переменные нагрузки от морских волн, течения, перемещений буровой платформы. Она испытывает растягивающие усилия от натяжных устройств, от собственного веса. Спуск, подъем и вращение колонны труб приводит к ее износу, а морская среда и глинистый раствор способствуют коррозии, что снижает срок ее службы.

Аварии, связанные с водоотделяющей колонной, относятся к наиболее тяжелым видам аварии и потому более обоснованные гарантии нормального срока службы в конкретных условиях работы в море являются очень важными для безопасного бурения, а также для своевременного приобретения запасных комплектов.

Все это должно базироваться на исследовании динамики водоотделяющей

колонны с учетом вероятностных статистических характеристик внешне действующих нагрузок.

Механическая модель водоотделяющей колонны принимается в виде стрижня шарнирно закрепленной у устья подводной скважины и получившей перемещение от полупогружной буровой установки (ППБУ).

Уравнение изгиба стрижня, нагруженного силой, отнесенной к единице длины, q - и продольной силой T , можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + q &= 0, \\ Q &= \frac{\partial M}{\partial x} + T \frac{\partial y}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь Q -срезающая сила в поперечном сечении стрижня;

M -изгибающий момент на том же сечении.

Ось X направлена вертикально вниз от верхнего компенсатора углового смещения. Поперечная сила состоит из внешне действующих сил q_1 , силы инерции q_2 и сил сопротивления q_3 : $q = q_1 - q_2 - q_3$,

где: $q_1 = q_{11} + q_{12} + q_{13}$; $q_2 = q_{21} + q_{22} + q_{23} + q_{24}$;

Здесь [2;3]

q_{11} - интенсивность поперечной нагрузки от инерционной составляющей волнового давления.

$$q_{11} = \frac{\pi^2 g \delta_1 \rho_1 d_1^2 h_1}{2 \lambda_0} \left[0,1 - 0,178 \ln \left(1 - \frac{H-X}{H} \right) \right] \quad (2)$$

q_{12} - то же самое от скоростной составляющей волнового давления;

$$q_{12} = \frac{\pi g \delta_2 \rho_1 d_1 h_1^2}{6 \lambda_0 s h [2k(H+h_0)]} e^{2k(H-X)} \quad (3)$$

q_{13} - то же самое от давления морского течения;

$$q_{13} = \frac{f \rho_1 d_1}{2} v_3^2 \quad (4)$$

q_{21} - интенсивность поперечной нагрузки от силы инерции стояка;

$$q_{21} = (m_{11} + m_{22}) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}; \quad (5)$$

q_{22} - то же самое от силы инерции буровой колонны

$$q_{22} = (m_{21} + m_{32}) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}; \quad (6)$$

q_{23} - то же самое от присоединенной массы морской воды;

$$q_{23} = \frac{\pi}{4} C \rho_1 d_1^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}; \quad (7)$$

q_{24} - то же самое от силы инерции промывочной жидкости, включая Кориолисовую

$$q_{24} = (m_{32} v_1^2 + m_{22} v_2^2) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2(m_{32} v_1 + m_{22} v_2) \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \quad (8)$$

q_3 - интенсивность поперечной нагрузки от силы сопротивления морской воды водоотделяющей колонне при дрейфе и качке ППБУ.

$$q_3 = \frac{1}{2} \rho_1 d_1 f (\beta_1 + \beta_2) \frac{\partial y}{\partial t} \quad (9)$$

Учитывая эти выражения q в (1), дифференциальное уравнение, описывающее динамику водоотделяющей колонны получим в виде:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -a_1 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + a_2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - a_3 \frac{\partial y}{\partial x} - a_4 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} - a_5 \frac{\partial y}{\partial t} + a_6 + a_7 l^{2K} + a_8 \left[0,1 - 0,178 \ln \left(1 - \frac{H-x}{H} \right) \right]; \quad (10)$$

где $a_1 = \frac{EJ}{m}$; $a_2 = \frac{1}{m} [T_1 + T_2 - (m_{11} + m_{22} - m_{12} + m_{21} + m_{32} - m_{31})gx - m_{32}v_1^2 - m_{22}v_2^2]$;

$$a_3 = \frac{1}{m} (m_{11} + m_{22} - m_{12} + m_{21} + m_{32} - m_{31}); \quad a_4 = \frac{2}{m} (m_{32}v_1 - m_{22}v_2);$$

$$a_5 = \frac{\rho_1 d_1 f}{2m} (\beta_1 + \beta_2); \quad a_6 = \frac{1}{2m} \rho_1 d_1 f v_3^2;$$

$$a_7 = \frac{\delta_1 \pi g \rho_1 d_1 h_1^2 e^{2KH}}{6m \lambda_0 \operatorname{sh}[2K(H+h_2)]}; \quad a_8 = \frac{\delta_2 \pi^2 g \rho_1 d_1^2 h_1}{2\lambda_0 m}$$

$$m = m_{11} + m_{22} - m_{21} + m_{32} + C\rho_1 \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

При глубинах моря более 300 м для облегчения нагрузки на натяжные устройства целесообразно водоотделяющую колонну оборудовать поплавками. При этом следует учитывать силы избыточной плавучести. Тогда в уравнении (10) вместо m_{12} следует записывать $m_{12}^* = m_{12} + m_{33}$

$$m_{33} = \frac{\pi}{4} \rho_1 (d_2^2 - d_1^2)$$

и везде в уравнении (10) d_1 следует заменять d_2 .

Граничные условия имеют вид:

$$y(x;t)|_{x=0} = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t;$$

$$\frac{\partial^2 y(x;t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0; \quad (11)$$

$$y(x;t)|_{x=L} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 y(x;t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L} = 0;$$

В случае жесткого шторма, когда колонна отсоединяется от скважины и весит на ППБУ, граничные условия записываются следующим образом:

$$y(x;t)|_{x=0} = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t;$$

$$\frac{\partial^2 y(x;t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 y(x;t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^3 y(x;t)}{\partial x^3} \Big|_{x=L} = 0;$$

Уравнение (10) можно решать как аналитически, так и приближенным методом с применением ЭВМ. В последнем случае применением метода конечных разностей уравнение (10) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

Замена производных производится следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dY_i}{dx} &\approx \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta x}, \\ \frac{d^2 Y_i}{dx^2} &\approx \frac{(Y_{i+1} - Y_i) - (Y_i - Y_{i-1})}{\Delta x^2} = \frac{Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}}{\Delta x^2}, \\ \frac{d^4 Y_i}{dx^4} &\approx \frac{1}{EJ} \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2}, \\ M_i &= -\frac{EJ}{\Delta x^2} (Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}) = -b(Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}), \quad i = 0, \dots, N. \end{aligned}$$

При разбиении считаем, что точка $i=0$ приходится на верхний шаровой компенсатор на расстоянии 12 м над уровнем моря, а в точке $i=N$ расположен нижний шаровой компенсатор. Поплавки устанавливаются на расстоянии Δx ниже уровня моря, начиная с точки $i=3$ непрерывно или дискретно.

Для численного решения задачи (10)-(11) на ЭВМ применяется метод Рунге-Кутты.

По результатам поставленной задачи пользователь получает информацию, необходимую для расчета показателей долговечности и усталостной прочности.

При этом строятся графики $y_i(x, t)$ и $M(x, t)$ для различных моментов времени в течении периода дрейфа ППБУ. По графикам определяются наиболее нагруженные сечения водоотделяющей колонны. Для расчета усталостной прочности этих сечений строятся графики $M(t)$ для всего периода дрейфа. Для обработки графиков можно применять метод максимума, согласно которому сначала определяется величина, характеризующая средний уровень цикла M_m ; $M_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_j$, где n - число ординат, взятых при подсчете M_m . Затем подсчитываются M_{qj} - значение между всеми максимумами данного процесса от среднего уровня. Эти значения располагают в возрастающем порядке от M_{amin} до M_{amax} . Вес диапазона значений M_{qj} для рассматриваемых режимов эксплуатации разбивается на интервалы. Подсчитывается число амплитуд M_{qj} , приходящихся на один интервал $v_{\alpha j}$. При подсчете числа циклов нагружения учитывается повторяемость режимов за год. Зная продолжительность T_{rk} эксплуатации стояка при определенном режиме k и период дрейфа T_k для каждого режима, количество блоков нагружения в год r_k определяют из отношения $r_k = T_k / T_{rk}$.

Тогда число амплитуд M_{qj} , приходящееся на k -ый интервал

$$v_{\alpha j} = \sum_{k=1}^P v_{jk} r_k,$$

где P - число режимов эксплуатации.

На основании данных строится табличное распределение амплитуд напряжений, возникающих в стояке за год.

Полученные данные позволяют охарактеризовать уровень и характер динамической нагруженности может быть определен среднегодовой ресурс, срок службы, вероятность безотказной работы, фактический коэффициент запаса прочности различных элементов водоотделяющей колонны. Срок службы стояка \bar{T} определяется по формуле:

$$\bar{T} = \frac{a_p \sigma_{-1g}^m N_0}{\sum_{j=1}^n \sigma_{\varphi}^m t_j W_j}$$

Для исследования был выбран стояк непопловкового типа при глубине моря 300 м и забое скважины 6000 м. Диаметр морского стояка $d_1=0,55$ м. Максимальное смещение морского устья принималось $A_1=20$ м при дрейфе, $A_2=1$ м при качке ППБУ. $0 < W_1 < 0,1$ и $W_2=0,5$ 1/сек. Максимальная высота волны $h_1=7$ м при длине волны $\lambda_0 = 80$ м, натяжение стояка $T_1 = 290 \cdot 10^4$ Н.

Анализ графиков изгибающих моментов M при различных режимах эксплуатации показывает, что наиболее нагруженным является сечение $i=2$, и для этого сечения был проведен расчет усталостной прочности. При этом принималось во внимание амплитуда напряжения выше половины предела выносливости. Учитывалось, что в условиях Каспийского моря и в режиме дрейфа при $A_1=20$ м конструкция работает 25% в год, при $A_1=10$ м - 70 % в год, а при $A_1=0$ - 5% в год. При этом соответствующие значения $W_1=0,021; 0,1; 0$ 1/сек; $W_2=0,5$ 1/сек; $A_2 = 1$ м. Соответствующие количества циклов нагружения равны: $N_1=26280$, 35040 и 105120.

Принимая $a_p=1$; $N_0=10^7$ циклов; $m=8$; $\sigma_{-1g} = 43,1$ МПа получим срок службы морского стояка в условиях Каспийского моря равным 14 годам.

Литература

- [1]. Мирзаджанзаде А.Х., Керимов З.Г., Копейкис М.Г. *Теория колебания в нефтепромысловом деле*. Б. «Маариф» 1976, 320 с.
- [2]. Грэм З.Д., Фрост М.А., Цилхойт М. *Труды Американского общества инженеров механиков*. Конструирование и технология машиностроения, № 2, 1965, с. 131-142
- [3]. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения. П-58-76, ВНИИГ, Ленинград, 1977, 86 с.