

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СТАЛЬНЫХ И ДЮРАЛЮМИНИЕВЫХ БУРОВЫХ ШТАНГ

Хаджиева Л.А., Кыдырбекулы А.Б.

Казахстан, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, khadle@mail.ru

Технико-экономические показатели буровых работ в нефтедобывающей промышленности зависят от множества факторов, среди которых характеристики буровых машин и инструментов, режимы их работы, крепость породы и др. Известно, что около трети пробуренных скважин бракуются из-за поломки буровых штанг и искривления скважин ввиду нарушения режимов работы. Поэтому в целях оптимизации режимов работы буровых штанг и обеспечения их безаварийности исследование влияния этих факторов на динамику буровых штанг представляет научный и практический интерес.

Целью работы является анализ влияния материала буровых штанг неглубинного бурения на их динамические и прочностные характеристики. Исследуются динамические упругие перемещения стальных и дюралюминиевых буровых штанг, применяемых в добывающей промышленности, резонансные режимы колебаний штанг и зоны их неустойчивости.

В качестве примера рассмотрено движение стальных и дюралюминиевых буровых штанг неглубинного бурения (до 500 м). Под действием переменной продольной силы  $N(t)$  и крутящего момента  $M(t)$  буровая штанга может совершать колебания с конечной амплитудой, которые могут сопровождаться потерей устойчивости её движения. Конечность упругих перемещений буровых штанг может быть вызвана её гибкостью за счёт увеличения длины штанги, а также действием больших переменных инерционных сил и моментов, осевых нагрузок и др. факторов, с которыми нельзя не считаться.

Рассмотрен случай плоского изгиба буровой штанги. Полагая упругие деформации конечными, в рамках теории конечных деформаций В.В. Новожилова исследуется геометрически нелинейная модель упругих колебаний буровой штанги:

$$EJ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \left( 1 - \frac{3}{2} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ N(x,t) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + K_1 V = -\rho F \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $V(x,t)$  – величина поперечных перемещений точек упругой линии штанги.

При значительной длине штанги влиянием условий закрепления на формы поперечных колебаний и формы потери устойчивости можно пренебречь. Здесь для определённости штанга принимается за стержень с шарнирно опёртыми концами. Тогда краевые условия модели (1) выражаются равенством нулю перемещений и изгибающего момента:

$$V = 0, \quad EJ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0 \quad (x = 0, x = l). \quad (2)$$

Этим условиям удовлетворяет решение

$$U(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) \sin \frac{k\pi x}{l}. \quad (3)$$

Согласно (2)-(3), многомерная модель (1) методом разделения переменных Бубнова-Галёркина приводится к нелинейным уравнениям параметрического вида с одной степенью свободы:

$$\frac{\partial^2 f_k(t)}{\partial t^2} + C_k^2 f_k(t) [1 - 2\nu_k \Phi(t)] + \alpha f_k^3(t) = F_0 \cos \Omega t, \quad (4)$$

$$\text{где } C_k = \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m} \left( 1 - \frac{N_0}{N_k} \right)}, \quad N_k = \frac{k^2 \pi^2 EJ}{l^2}, \quad \nu_k = \frac{N_t}{2(N_k - N_0)}, \quad \alpha_k = \frac{3k^4 \pi^4 E}{8\rho l^4}. \quad (5)$$

Проведён численный анализ уравнений движения (4) по определению перемещений стальных ( $E_c = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho_c = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и дюралюминиевых ( $E_d = 0,7 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho_d = 2,699 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) буровых штанг. Установлено, что для дюралюминиевых буровых штанг неглубинного бурения амплитуда их поперечных колебаний (рис.1, сплошная линия) значительно меньше, чем в случае, когда штанга изготовлена из стали (рис.1, штриховая линия). Это говорит о том, что дюралюминиевая буровая штанга подвержена меньшим отклонениям от прямолинейной формы, чем стальная при тех же режимах бурения, что значительно улучшает её динамические и прочностные характеристики.

Конечность деформаций, ведущая к нелинейности динамической модели, может оказать существенное влияние на характер движения буровой штанги – происходит наложение колебательного процесса на номинальное состояние буровой штанги, изменение амплитудно-частотных характеристик, и, как следствие, потеря динамической устойчивости штанги. Поэтому исследованы случаи основного резонанса и резонанса по высшим частотам стальных и дюралюминиевых буровых штанг.

Методом гармонического баланса моделируется резонанс по основной частоте и высшим (третьей) частотам. При этом решение (4) задается как:

$$f(t) = r_1 \cos(\bar{\Omega}t - \varphi_1), \quad (6)$$

$$f(t) = r_1 \cos(\bar{\Omega}t - \varphi_1) + r_3 \cos(3\bar{\Omega}t - \varphi_3), \quad (7)$$

соответственно.

При этом  $r_1$  – амплитуда резонансных колебаний по основной частоте  $\bar{\Omega} = \frac{\Omega}{\omega_0}$ ,  $r_3$  – амплитуда

резонансных колебаний третьей гармоники по кратной частоте  $3\bar{\Omega}$ .

Получены АЧХ гармонических колебаний и проведён их численный анализ с целью выявления влияния параметров буровой штанги на резонансные частоты. Расчёты проводились при значениях параметров буровых штанг:  $\kappa=1$ ;  $d = 0,12 \text{ м}$ ;  $D = 0,2 \text{ м}$ ;  $F_0=100$ ;  $N_0=2200 \text{ Па}$ ;  $L=200 \text{ м}$ .

Установлено, что в случае основного резонанса (рис.2а, штриховая линия), так и в случае резонанса по высшим частотам (рис.1б, сплошная линия) дюралюминиевой буровой штанги, её АЧХ имеет большие величины, чем для стальной штанги (рис.2а, сплошная линия; рис.2б, сплошная жирная линия). Кроме того, наблюдается «затягивание кривой» её АЧХ в область больших частот. То есть, в этом случае резонанс следует ожидать на больших частотах и с большей амплитудой колебаний.

Исследована устойчивость основного резонанса. Проведён численный анализ на ЭВМ зон его неустойчивости (рис.3). Установлено, что зоны неустойчивости основного резонанса дюралюминиевой буровой штанги (штриховая линия) шире, чем для стальной (сплошная линия), что существенно уменьшает зону рабочих частот дюралюминиевой штанги.

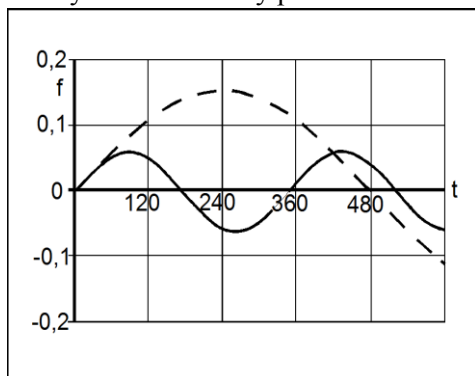


Рис.1 Упругие перемещения стальной и дюралюминиевых буровых штанг.

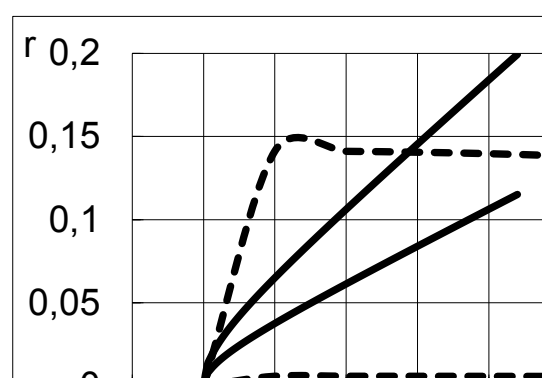
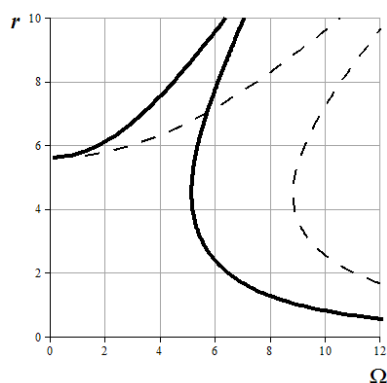
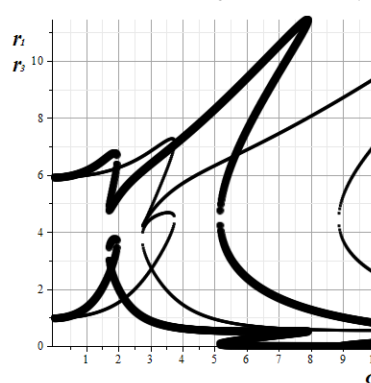


Рис.3 Зоны неустойчивости основного резонанса при  $L = 500 \text{ м}$ ,  $N_0 = 500 \text{ н}$ ,  $N_t = 2195,5 \text{ Кн}$ .



а)



б)

Рис. 2 АЧХ основного резонанса (а) и резонанса по высшим частотам (б) буровых штанг.