

УДК 622.24.085.5

С. В. Гошовский<sup>1</sup>, докт. техн. наук; Б. Н. Васюк<sup>2</sup>, канд. техн. наук;  
Д. А. Харитонов<sup>2</sup>, инженер

<sup>1</sup>Украинский государственный геологоразведочный институт (УкрГГРИ),  
г. Киев, Украина

<sup>2</sup>Днепропетровское отделение УкрГГРИ, г. Днепропетровск, Украина

## К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ КОЛОНН ТРУБ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА ШЕЛЬФЕ МОРЕЙ С ПЛАВУЧИХ ОСНОВАНИЙ

*The questions of drill pipes calculations by sea drilling are considered.*

Известен метод расчета бурильной колонны [1], при котором рассматривается пространственное напряженное состояние труб; при расчете учитываются напряжения растяжения–сжатия, изгиба, а также касательные напряжения. Напряжения изгиба определяются по формуле:

$$\sigma_{из} = \frac{\pi^2 E I f}{l_n^2 W}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала труб, Па;  $I$  – осевой момент инерции поперечного сечения трубы, м<sup>4</sup>;  $f$  – стрела прогиба бурильной колонны, м;

$$f = (D_c - D) / 2, \quad (2)$$

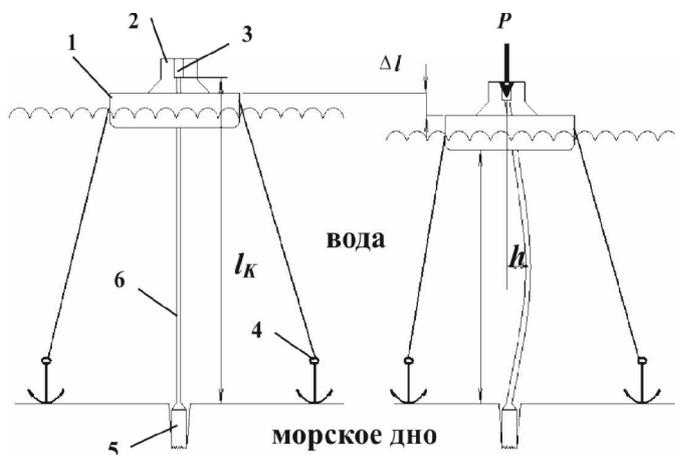


Рис. 1. Схема судна, бурового оборудования и инструмента при морском бурении:

1 – судно; 2 – буровой станок; 3 – шпиндель станка; 4 – якорь; 5 – колонковая труба; 6 – бурильная колонна;  $l_K$  – длина бурильной колонны;  $\Delta l$  – вертикальное перемещение судна;  $P$  – сжимающая сила;  $h$  – прогиб колонны труб.

где  $D_c$  – диаметр скважины, м;  $D$  – наружный диаметр бурильных труб, м;  $l_n$  – длина полуволны прогиба колонны труб, м (рассчитывается по известной формуле Г.М.Саркисова);  $W$  – момент сопротивления поперечного сечения трубы, м<sup>3</sup>.

Анализ формулы (1) показывает, что стрела прогиба колонны труб в значительной степени определяет величину напряжений изгиба (прямо пропорциональная зависимость); однако, прогиб труб, расположенных в скважине, ограничен и является сравнительно малой величиной. Таким образом, приведенная в [1] методика расчета не учитывает возможность свободного прогиба труб, не ограниченного стенками скважины или обсадными трубами, что имеет место при морском бурении с плавучих оснований.

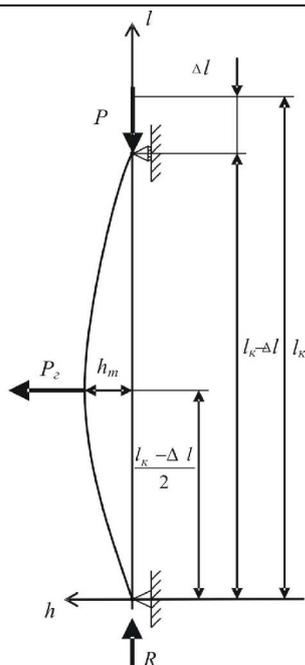


Рис. 2. Схема изгиба упругого стержня.

Рассмотрим работу колонны труб при морском бурении (рис.1) с плавучего основания, не имеющего жесткой опоры на морское дно.

В данном случае судно на волнах совершает вертикальные колебания, амплитуда которых ( $\Delta l$ ) может достигать 1 м и более; аналогичные колебания совершает и буровой станок, установленный на палубе судна. При жестком закреплении головной части буровой колонны в шпинделе бурового станка под действием сжимающей силы  $P$  происходит периодический прогиб труб, величина которого не ограничена стенками скважины. Для этих условий расчет напряжений изгиба, существенно превышающих касательные напряжения и напряжения растяжения-сжатия, имеет ряд особенностей.

$$\sigma_{из} = \frac{12h_m EI}{(l_k - \Delta l)^2 W}, \quad (3)$$

где  $h_m$  – максимальный прогиб колонны труб;  $l_k$  – длина колонны;  $\Delta l$  – вертикальное перемещение судна.

Данная формула аналогична (1), однако,  $h_m$  не может быть определен по выражению (2) для расчета прогиба колонны, расположенной в скважине. С целью установления зависимости  $h_m = \varphi(l_k, \Delta l)$  буровую колонну представляем в виде упругого стержня с шарнирно закрепленными концами (рис. 2). Уравнение прогиба [2] можно записать в виде:

$$h = c \sin kl_k, \quad (4)$$

где  $c$  и  $k$  – постоянные величины.

Рассматривая формулу для определения длины дуги кривой [4]:

$$l_k = \int_0^{l_k - \Delta l} \sqrt{1 + (h')^2} dl, \quad (5)$$

интегрируя данное выражение с учетом (4), после преобразований выводим формулу для расчета  $h_m$ :

$$h_m = 0,451 \sqrt{2l_k \Delta l - \Delta l^2}. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка (6) заключалась в измерениях максимальных прогибов пластин  $h_m^p$  длиной  $l_n$  при их осевой деформации на величину  $\Delta l_n$ , определении прогибов пластин  $h_m^p$  расчетным путем модуля отклонений расчетных значений прогибов от экспериментальных  $|\Delta|$ . Данные представлены в таблице.

Малые значения  $|\Delta|$  подтверждают достоверность расчетов по (6).

С учетом (6) предложен рабочий вариант формулы (3):

$$\sigma_{из} = \frac{5,4\sqrt{2l_k\Delta l - \Delta l^2} EI}{(l_k - \Delta l)^2 W} \quad (7)$$

Строим графики напряжений изгиба для стальных труб с наружным диаметром 50, внутренним – 39 мм (рис. 3, а), а также для труб с наружным диаметром 89, внутренним – 78 мм (см. рис. 3, б); характеристика стали: модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^6 \frac{кгс}{см^2}$ , допустимое напряжение при изгибе  $[\sigma]_{из} = 2500 \frac{кгс}{см^2}$ .

Таблица. Экспериментальные и расчетные значения прогибов пластин

$l_n$ , мм	$\Delta l_n$ , мм	$h_m^p$ , мм	$h_m^p$ , мм	$ \Delta $ , %
150	5	17	17,3	2
	10	24,5	24,3	1
	15	29,6	29,4	1
331,4	10	37	36,5	1
	20	51,6	51,1	1
	30	62,4	62,1	0,5

Анализ графиков показывает, что при использовании колонны труб диаметром 50 мм, длиной 30 м и более допустимы вертикальные колебания бурового судна с амплитудой не более 0,8 м, а если длина колонны составляет 20 м, амплитуда колебаний судна не должна превышать 0,2 м. При использовании колонн длиной 10 м и менее колебания судна должны быть практически устранены.

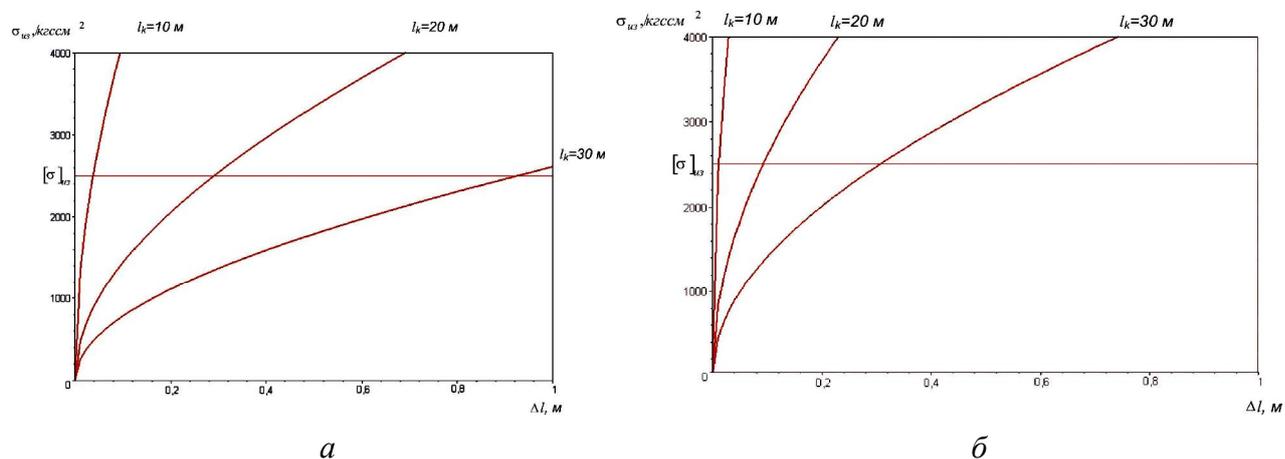


Рис. 3. Графики напряжений изгиба; для труб  $\varnothing 50/39$  мм (а); для труб  $\varnothing 89/78$  мм (б).

При использовании более жестких труб диаметром 89 мм допустимы колебания с амплитудой до 0,1 м при длине колонны 30 м. С уменьшением длины колонны колебания судна недопустимы.

Как было показано выше, изгиб колонны труб при морском бурении происходит под действием усилия сжатия  $P$ . Оно возникает при жестком соединении головной части колонны труб с вращателем бурового станка и колебаниях судна на волнах. При достижении  $P$  критических значений возможны поломки вращателя станка и крепежных элементов, а также

повреждения породоразрушающего инструмента. Таким образом, при проектировании технологий и технических средств для морского бурения с плавучих оснований необходим расчет усилий сжатия, действующих на колонну труб.

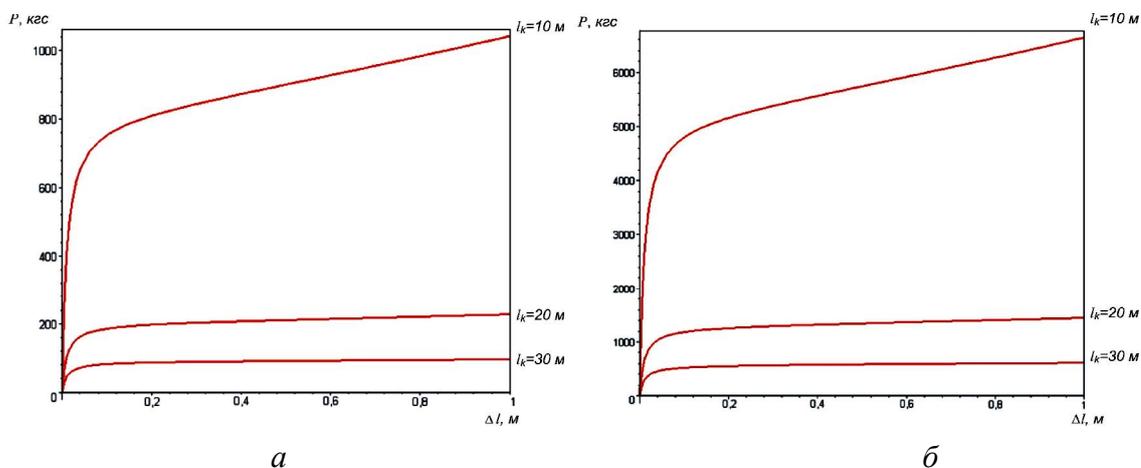


Рис. 4. Графики усилия сжатия  $P$ : при изгибе труб  $\varnothing 50/39$  мм (а); для труб  $\varnothing 89/78$  мм (б).

Рассмотрим схему изгиба упругого стержня (см. рис. 2). Потенциальная энергия деформации данной системы может быть определена по формуле [2]:

$$u_n = \frac{1}{2} P \Delta l; \quad (8)$$

$$u_n = \frac{1}{2} P_z h_m, \quad (9)$$

где  $P_z$  – горизонтальная сила.

$$P_z = \frac{48 h_m EI}{(l_k - \Delta l)^3} \quad (10)$$

Приравнивая правые части формул (8) и (9) и преобразуя полученное равенство с учетом (6) и (10), устанавливаем выражение для расчета сжимающей силы  $P$ :

$$P = \frac{9,76 EI (2l_k \Delta l - \Delta l^2)}{(l_k - \Delta l)^3 (\Delta l + b)}, \quad (11)$$

где  $b$  – постоянное число:  $b = \frac{\Delta l_{\max}}{100}$ , где  $\Delta l_{\max}$  – наибольшее значение осевой деформации колонны труб.

Постоянное число  $b$  введено для исключения неопределенности при расчете  $P$ .

По формуле (11) строим графики  $P$ : рис. 4, а – при изгибе колонны труб с наружным диаметром 50 мм; рис. 4, б – для труб с наружным диаметром 89 мм.

Анализ графиков показывает интенсивный рост силы  $P$  при уменьшении длины колонны и увеличении жесткости труб. Величина усилия  $P$  сравнительно невелика ( $\sim 70$  кгс), если длина колонны составляет 30 м, а диаметр труб – 50 мм.

### **Выводы**

1. При морском бурении с плавучего основания и его колебаниях на волнах происходит периодический прогиб колонны труб при условии ее жесткого соединения с вращателем бурового станка; величина прогиба в данном случае не ограничена стенками скважины или обсадными трубами. Предложены формулы для расчета напряжения изгиба и сжимающих усилий при прогибе колонны труб, анализ которых показал, что указанные напряжения и усилия резко возрастают с увеличением жесткости труб и уменьшением длины колонны. При критических значениях напряжений и усилий происходят повреждения труб, поломки бурового оборудования и породоразрушающего инструмента.

2. С целью устранения возможности повреждений бурового инструмента и оборудования при морском бурении рекомендуется:

- Исключить, если есть техническая возможность, жесткое соединение труб с вращателем бурового станка; в первую очередь, рекомендуются к применению роторные буровые установки. Станки с вращателем шпиндельного типа могут успешно использоваться при свободной подаче бурового инструмента.
- Применять компенсаторы колебаний плавучего основания или колонны труб пониженной жесткости, если по техническим требованиям необходимо жесткое соединение труб с вращателем, например, при использовании комплексов КГК для бурения с гидротранспортом керна.

### **Литература**

1. Ганджумян Р. А. Практические расчеты в разведочном бурении.– 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Недра, 1986.– 253 с.
2. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Соппротивление материалов. Изд. 3-е.– М.: Высшая школа, 1969 г.– 734 с.
3. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.1.– 5-е изд., перераб. и доп.–М.: Машиностроение, 1979.– 728 с.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. –М.: Наука, 1967.– 608 с.

*Поступила 19.04.2006 г.*