

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КОЛОННЫ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

### 2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Резонансные частоты при колебаниях колонны бурильных труб имеют место при совпадении частот привода и частот собственных колебаний (продольных и крутильных) колонны труб. Особенно опасны резонансы на частоте основного тона  $k_1$  и частотах первых двух-трех обертонов ( $k_2, k_3, k_4$ ). Рассмотрим отдельно продольные и крутильные колебания.

Продольные колебания колонны бурильных труб имеют место при изменении осевой нагрузки на забой, при котором наблюдается смещение отдельных сечений колонны вдоль ее продольной оси.

Частотное уравнение для этого случая имеет вид:

$$\frac{ma}{EF}k = \operatorname{ctg} \frac{kl}{a}, \quad (2.1)$$

где  $m = C/g$  - сосредоточенная масса на нижнем конце колонны (в контакте с забоем), равная отношению осевой нагрузки ( $C$ ) и ускорения силы тяжести;  $a = \sqrt{E/\rho}$  - скорость продольной волны в материале колонны;  $E$  - модуль упругости материала труб при растяжении - сжатии;  $F$  - площадь поперечного сечения колонны;  $l$  - ее длина;  $k$  - неизвестная частота собственных колебаний колонны бурильных труб.

Так как уравнение (2.1) является трансцендентным, то оно может иметь бесконечное множество корней (рис.2.1), из которых наибольший интерес представляют два-три первых корня (частота основного тона и первые обертоны).

Уравнение (2.1) представляет собой частотное уравнение для колебательной системы с распределенными параметрами, каковой и является колонна бурильных труб. Решение уравнения (2.1) можно получить графически как совокупность точек пересечения двух функций:

$$U = \frac{ma}{EF} k = \frac{Ca}{gEF} k; \quad U^* = \operatorname{ctg} \frac{kl}{a}. \quad (2.2)$$

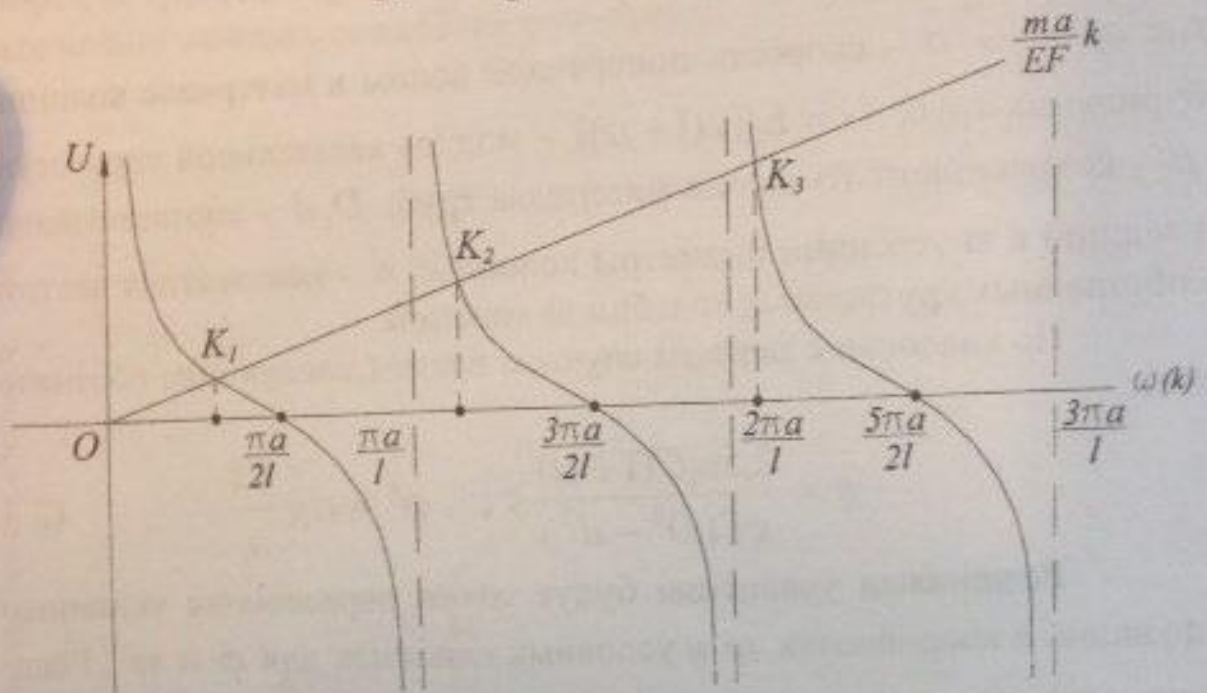


Рис.2.1. Частотный спектр при продольных колебаниях колонны бурильных труб

Если эти решения ( $k_i$ ) сопоставить с частотой возмущающей силы  $\omega$ , представляющей собой частоту привода, то можно получить искомые резонансы при продольных колебаниях колонны, когда  $k_i = \omega_i$ . Для этого графическое решение уравнения (2.1) необходимо спроецировать на ось абсцисс системы координат, в которой находится графическое решение и изображены функции  $U$  и  $U^*$ . Второй координатной осью будет ось условных единиц (значений  $U$  и  $U^*$ ). Для перевода частоты привода  $\omega$  в частоту вращения колонны используется известное выражение:  $n = 30\omega/\pi = 9,56\omega$ , где  $n$  - частота вращения колонны бурильных труб, об/мин.

Крутильные колебания колонны бурильных труб. Частотное уравнение для крутильных колебаний получается аналогично уравнению (2.1) из волнового уравнения крутильных колебаний, откуда следует:

$$\frac{2,5a_1 C(1+\mu)}{gE(D^2-d^2)} k' = \operatorname{ctg} \frac{k'l}{a_1}, \quad (2.3)$$

где  $a_1 = \sqrt{G/\rho}$  - скорость поперечной волны в материале колонны бурильных труб;  $G = E/[2(1+\mu)]$  - модуль касательной упругости;  $\mu$  - коэффициент Пуассона материала труб;  $D, d$  - соответственно внешний и внутренний диаметры колонны;  $k'$  - неизвестная частота собственных крутильных колебаний колонны.

По аналогии с первым случаем введем следующие обозначения:

$$\varphi = \frac{2,5a_1 C(1+\mu)}{gE(D^2-d^2)} k'; \quad \varphi^* = \operatorname{ctg} \frac{k'l}{a_1}. \quad (2.4)$$

Решениями уравнения будут точки пересечения указанных функций в координатах  $\omega$  и условных единицах для  $\varphi$  и  $\varphi^*$ . Решения ( $k'_i$ ) проектируются на ось абсцисс, где и определяются резонансные частоты вращения колонны труб ( $n'_i$ ) с использованием пересчетов по формуле (2.3), в которой необходимо заменить  $n$  на  $n'$ .

## 2.2. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РГР - 2

Пусть требуется определить собственные частоты колебаний (продольных и крутильных) стальной колонны бурильных труб диаметром 50 мм ( $D = 0,05$  м;  $d = 0,038$  м;  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па; удельная плотность материала труб  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,25$ ) при бурении скважины до глубины  $l = 150$  м с осевой нагрузкой  $C = 10$  кН станком ЗИФ-300.

Расчеты по формулам (2.2, 2.4) представим графически (рис.2.2), откуда следует, что  $\omega_1 = 29$  с<sup>-1</sup> ( $n_1 = 277$  об/мин) и  $\omega_2 = 19$  с<sup>-1</sup> ( $n_2 = 182$  об/мин).

Полученные значения резонансных частот соответствуют второй и третьей передачам станка ЗИФ-300, при бурении на которых можно ожидать появления резонансов.

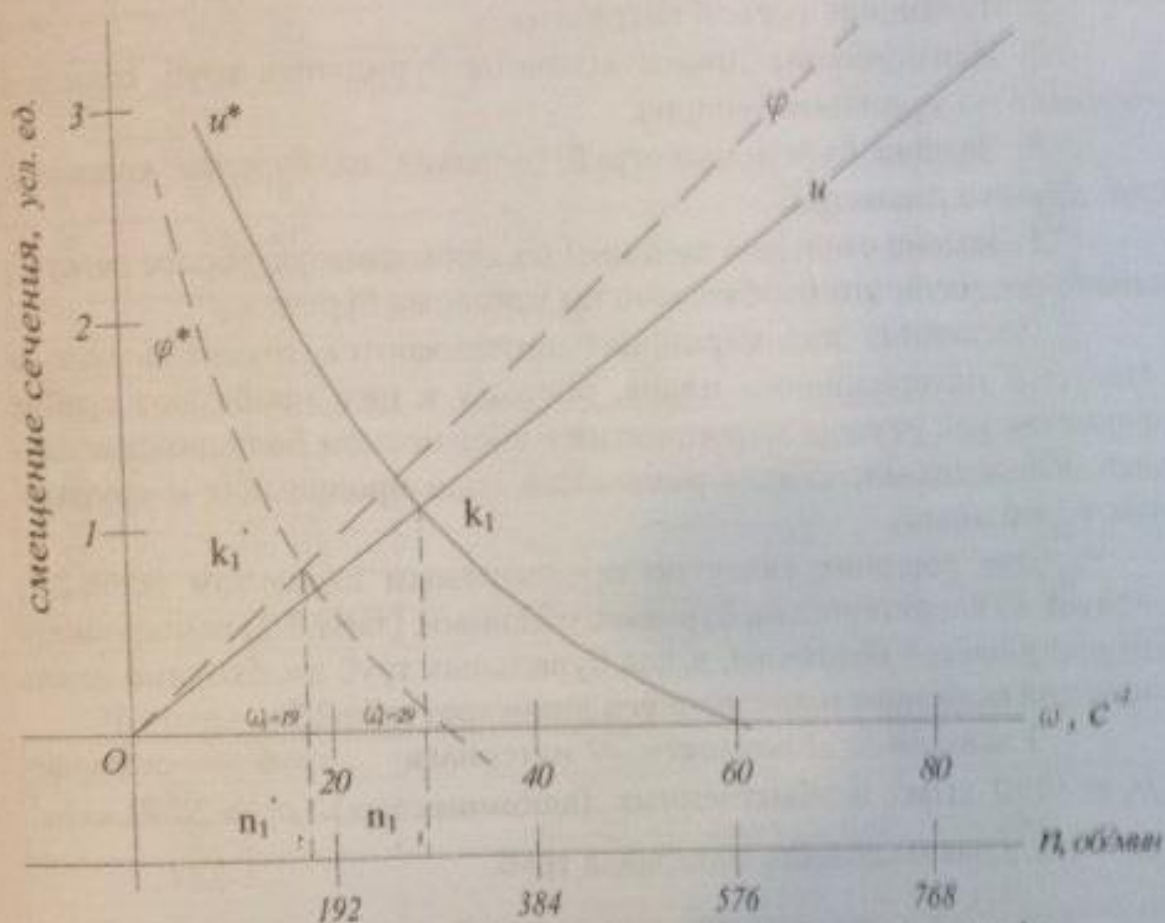


Рис.2.2. Резонансы на частотах основного тока при продольных ( $U, U^*$ ) и крутильных ( $\phi, \phi^*$ ) колебаниях колонны СБТМ-50

Резонансные частоты могут появиться в диапазоне частот  $\pm 10\%$  от номинальных значений по паспорту установки. Для приведенного примера это составит  $n_1 = 260 - 305$  об/мин;  $n_1 = 165 - 200$  об/мин. При появлениях резонансов усиливаются амплитуды колебаний колонны, могущие вызвать обрывы самих труб и обрушение пород стенок скважины, что влечет за собой сложные аварии при бурении скважин.

Мероприятия по борьбе с резонансами могут включать в себя:

1. Переключение передачи (желательно на более высокую, если позволяет мощность привода).
2. Изменение осевой нагрузки.
3. Нарращивание длины колонны бурильных труб, если это возможно по условиям бурения.
4. Замена бурильных труб (переход на бурение колонной труб другого диаметра).
5. Замена стальной колонны на алюминиевую (более легкую) и наоборот, если это необходимо по условиям бурения.

Последние два мероприятия отличаются трудоемкостью и затратами материального плана, поэтому к ним прибегают крайне редко, так как первые мероприятия в абсолютном большинстве случаев обеспечивают снятие резонансов (при продольных и крутильных колебаниях).

Для решения задач по предлагаемым вариантам (табл.2.1) следует из характеристик буровых установок (табл.2.2) использовать значения частот вращения, а для бурильных труб необходимо иметь значения внешнего и внутреннего диаметра (табл.2.3).

Удельная плотность материала труб: стальных  $\rho_c = 7850 \text{ кг/м}^3$  и облегченных (алюминиевых)  $\rho_a = 2800 \text{ кг/м}^3$ .  
 $\rho$  - удельная плотность материала труб.

### 2.3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ПО РГР - 2

Варианты заданий представлены в табл.2.1; далее в табл.2.2 и 2.3 даны некоторые справочные данные, необходимые для выполнения задания.

Таблица 2.1

№/п	Тип буровой установки	Тип колонны бурильных труб	Глубина скважины, м	Осевая нагрузка $C$ , даН
1	УРБ-2А-2	СБТН-42	200	600
2	УКБ-2	ЛБТН-42	100	500
3	УКБ-3	СБТМ-50	300	800

Окончание таблицы 2.1

№ п/п	Тип буровой установки	Тип колонны бурильных труб	Глубина скважины, м	Осевая нагрузка $S$ , даН
4	УКБ-4П	ЛБТН-54	500	1000
5	УКБ-5П	СБТН-54	700	1000
6	УКБ-7П	ЛБТН-54	1200	1500
7	ЗИФ-650М	СБТМ-50	800	1200
8	ЗИФ-1200МР	СБТМ-50	1200	1500
9	УКБ-7П	СБТН-68	1500	1200
10	УКБ-4П	СБТМ-42	700	1000
11	УКБ-5П	ЛБТН-54	700	12000
12	УКБ-3	СБТН-42	300	800
13	ЗИФ-650М	СБТМ-50	600	1000
14	УРБ-2А-2	СБТМ-42	150	400
15	УКБ-2	СБТН-42	80	600
16	УКБ-3	ЛБТН-42	220	900
17	УКБ-4П	СБТН-54	400	1200
18	УКБ-5П	СБТМ-50	600	800
19	УКБ-7П	СБТН-54	1700	1800
20	ЗИФ-1200МР	ЛБТН-54	1000	1300

Таблица 2.2

## Частоты вращения шпинделя основных буровых установок

Тип установки	Частота вращения $n$ , об/мин
	140; 225; 325
УРБ-2А-2	155; 305; 325; 590; 645; 1000; 1170; 2000
УКБ-2	I диапазон: 110; 200; 355; 555; 815 II диапазон: 160; 290; 515; 805; 1180
УКБ-3	155; 279; 394; 433; 637; 710; 1100; 1600
УКБ-4П	120; 257; 340; 407; 539; 715; 1130; 1500
УКБ-5П	0 - 1500 (без ступеней)
УКБ-7П	87; 118; 188; 254; 340; 460; 576; 800
ЗИФ-650М	75; 136; 231; 288; 336; 414; 516; 600
ЗИФ-1200МР	

Таблица 2.3

## Диаметры бурильных труб различного сортамента

Тип трубы	$D$ , м	$d$ , м	Тип трубы	$D$ , м	$d$ , м
СБТН-42	0,042	0,033	СБТН-54	0,054	0,045
СБТМ-42	0,042	0,032	СБТМ50	0,050	0,039
ЛБТН-42	0,042	0,028	ЛБТН-54	0,054	0,036
ЛБТН-54	0,054	0,036	СБТН-68	0,068	0,050

Диаметры буровых труб различного сортамента Таблица 2

Тип трубы	$D, м$	$d, м$	Тип трубы	$D, м$	$d, м$
СБТН-42	0,042	0,033	СБТН-54	0,054	0,045
СБТМ-42	0,042	0,032	СБТМ50	0,050	0,040
ЛБТН-42	0,042	0,028	ЛБТН-54	0,054	0,046
ЛБТН-54	0,054	0,036	СБТН-68	0,068	0,050

## 2.4. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РГР -2

1. Горшков Л.К. Основы теории механических колебаний в разведочном бурении: Учебное пособие. - СПб.: СПТИ(ТУ), 1998.
2. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / И.С. Афанасьев, Г.А. Блинов, А.И. Осецкий и др. - СПб.: Недра, 2000.
3. Справочное руководство мастера геологоразведочного бурения / Г.А. Блинов, В.И. Васильев, Ю.В. Бакланов и др. - Л.: Недра, 1983.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Собственные колебания консервативной системы с одной степенью свободы вблизи положения устойчивого равновесия .....	3
1.1. Теоретические основы работы .....	3
1.2. Пример выполнения РГР -1 .....	9
1.2.1. Свободные колебания .....	10
1.2.2. Затухающие колебания .....	16
1.3. Варианты заданий по РГР - 1 .....	18
1.4. Рекомендательный библиографический список к РГР - 1 .....	18
2. Определение резонансных частот колебаний колонны буровых труб .....	26
2.1. Теоретические основы работы .....	26
2.2. Пример выполнения РГР - 2 .....	28
2.3. Варианты заданий по РГР - 2 .....	30
2.4. Рекомендательный библиографический список к РГР - 2 .....	32