

суммирования, соответствующего отраженной волне от i-ой отражающей границы)  $[t_i; t_i + T]$ ;

3. оценка фазового спектра трассы коридорного суммирования на интервале анализа;

4. оценка формы i-ой отраженной волны согласно формуле (2);

5. вычитание i-ой отраженной волны из эталонной трассы;

6. повторение пунктов 2-5.

### Выводы

Полученная технология позволяет провести оценку формы отраженных продольных волн на всем доступном интервале исследования, кроме

того, она использует реальные измеренные формы падающих волн, и учитывает изменение формы падающей волны с глубиной. Следовательно, данная технология не имеет ограничений, накладываемых на традиционные методы оценки формы отраженной волны, основанные на данных наземной сейсморазведки.

### Литература

1. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 451 с.

2. Р. Шерифф, Л. Гелдарт, Сейсморазведка Т.2. – М.: Мир, 1987. – 400 с.

## СТАЦИОНАРНОЕ ВРАЩЕНИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОГО РОТОРА, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОГО ЖИДКОСТЬЮ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

Пономарёв А.В.

Томский политехнический университет

634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30

E-mail: [epashkov1@sibmail.com](mailto:epashkov1@sibmail.com)

### Введение

В данной статье, в рамках плоской модели, изучается вращение ротора со слоем жидкости на стенке камеры при вязкоупругом действии вала. Предполагается, что границей свободной поверхности жидкости является окружность с центром на оси вращения, а сама она вращается вместе с ротором, как твердое тело.

### Материал и методы исследования

Исследование жидкостных автоматических балансирующих устройств (АБУ) сводится к задаче о движении вращающихся тел с полостями, частично заполненными жидкостью [1]. Эта задача соединена с математическими трудностями, т.к. требует рассмотрения совместного движения твердого тела и жидкости. Известно ограниченное количество работ, в которых решается указанная задача применительно к АБУ. Так в [2] рассмотрена устойчивость стационарного вращения ротора, частично заполненного жидкостью со свободной поверхностью. Изгибные колебания вала с неуравновешенным диском на нем изучены в [5]. В [3] показано влияние жидкости во вращающемся роторе на автоматическую балансировку механической системы без учета сил сопротивления. Ниже рассматривается установившееся движение неуравновешенного ротора с жидкостью при наличии внешнего сопротивления.

### Результаты исследования и их обсуждение

Пусть ротор 1 (рис. 1), содержит камеру 2 частично заполненную однородной несжимаемой жидкостью 3, симметрично закреплен на гибком вертикальном валу, проходящем через геометрический центр  $O_1$ . Центр масс ротора (точка  $P$ )

смещен от  $O_1$  на расстояние  $O_1P=e$ . При вращении ротора вал смещается на величину  $O_2O_1=a$ , а несжимаемая однородная жидкость, плотностью  $\rho$ , перетекает в сторону прогиба вала. При установленном движении жидкость во вращающемся роторе занимает цилиндрический слой высотой  $h$ , свободной поверхностью которого является окружность радиуса  $r_2$  с центром на оси вращения АВ (точка  $O_2$ ) и вращается с угловой скоростью

$\omega = \dot{\beta}(t) = \text{const}$  [4]. Отсюда центр масс слоя жидкости находится на линии центров  $O_2O_1$  в точке  $G$ , а движение ротора является плоским.

Введем в плоскости движения точек  $O_1$ ,  $G$ ,  $P$  две системы координат с общим началом в точке  $O_2$  на линии АВ: неподвижную систему  $O_2\xi\eta$  и подвижную  $O_2xy$ , ось  $x$  которой параллельна отрезку  $O_1P$ . Угловые скорости вращения ротора и системы  $O_2xy$  одинаковые, следовательно, ротор в подвижной системе координат неподвижен. За обобщенные координаты возьмем координаты точки  $O_1$  в подвижной системе  $O_2xy - x, y$ .

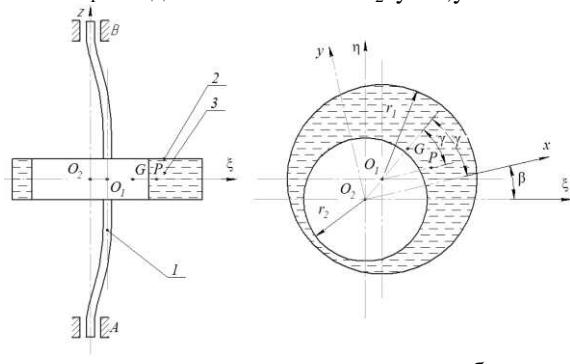


Рис. 1. Ротор: а) схема закрепления; б) сечение с жидкостью

На ротор со стороны вала действует сила упругости  $\bar{F}_c = -c \overline{O_2 O_1}$  и сила внешнего трения, приложенная в точке  $O_1$ , пропорциональная абсолютной скорости  $\bar{V}_{O_1}$  этой точки,  $\bar{F}_\chi = -\chi \bar{V}_{O_1}$

Где  $c$  и  $\chi$  коэффициенты упругости и внешнего трения. Природа этих сил подробно изложена в [5]. Так, силы внешнего трения вызываются вязким сопротивлением внешней среды, опор, специальных демпферов и зависят от скоростей абсолютных перемещений точек ротора и вала; силы внутреннего трения порождаются сопротивлением частиц материала и в первом приближении принимаются пропорциональными скорости деформации вала. Согласно принципу Даламбера имеем уравнение равновесия главных векторов внешних сил и сил инерции:

$$-c \overline{O_2 O_1} - \chi \bar{V}_{O_1} - m_1 \bar{a}_P^e - m_2 \bar{a}_G^e = 0 \quad (1)$$

Здесь  $m_1$  и  $m_2$  – массы ротора и жидкости,  $\bar{a}_P^e$  и  $\bar{a}_G^e$  – переносные ускорения точек  $P$  и  $G$  соответственно. Координаты этих точек определяются выражениями (2):

$$x_P = x + e, \quad y_P = y, \quad x_G = rx, \quad y_G = ry,$$

где  $r = r_1^2 / (r_1^2 - r_2^2)$  – коэффициент, характеризующий наполнение камеры;  $r_1$  – радиус камеры,  $r_2$  – радиус внутренней поверхности жидкости.

Проектируя (1) на оси  $x$ ,  $y$  и используя (2) для вычисления  $\bar{V}_{O_1}$ ,  $\bar{a}_P^e$  и  $\bar{a}_G^e$ , получаем уравнения стационарного движения системы:

$$\begin{aligned} cx - \chi \omega y - m \omega^2 x &= m_1 e \omega^2; \\ cy + \chi \omega x - m \omega^2 y &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $m = m_1 + rm_2$ ,  $m_1$  – масса ротора,  $m_2$  – масса жидкости.

Из уравнения равновесия моментов всех сил относительно оси  $AB$ , можно определить вращающий момент, приложенный к валу со стороны двигателя. Считаем, что двигатель развивает усилие, обеспечивающее заданное вращение ротора.

Решение уравнений (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} x &= \frac{m_1 e \omega^2 (c - m \omega^2)}{(c - m \omega^2)^2 + \chi^2 \omega^2}; \\ y &= -\frac{m_1 e \chi \omega^3}{(c - m \omega^2)^2 + \chi^2 \omega^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полагая в (4)  $\chi = 0$ , получаем решение для однокамерного АБУ без внешнего сопротивления, рассмотренное в [9]. По формулам (4), (2) вычисляет-

ся прогиб вала  $a = \sqrt{x^2 + y^2}$  и отклонение центра масс системы от оси  $AB$

$$r_c = \frac{\sqrt{(x_p m_1 + x_G m_2)^2 + (y_p m_1 + y_G m_2)^2}}{(m_1 + m_2)},$$

которые в безразмерных переменных принимают вид (5):

$$\begin{aligned} a^* &= \frac{a}{e} = \frac{z}{\sqrt{D}}; \quad r_c^* = \frac{r_c}{e} = \frac{\sqrt{1+nz}}{(1+\mu)\sqrt{D}}; \\ D &= [1 - (1+\mu)z]^2 + nz, \end{aligned}$$

где  $Z = m_1 \omega^2 / c$  – квадрат отношения частоты вращения к собственной частоте ротора,  $n = \chi^2 / (cm_1)$  – безразмерный коэффициент сопротивления,  $\mu = m_2 / m_1$  – отношение массы жидкости к массе ротора.

Угол сдвига фазы движения  $\gamma$  определяется формулой:

$$\operatorname{tg} \gamma = y/x = -\frac{\chi \omega}{c - m \omega^2}. \quad (6)$$

Это выражение соответствует отсутствию жидкости, т.е. при  $m = m_1$ .

Из выражений (4–6) следует, что при  $\omega \rightarrow \infty$  ( $z \rightarrow \infty$ )  $a \rightarrow m_1 e / m$ , т.е. прогиб вала становится меньше неуравновешенности  $e$ , т.к.  $m_1 / (m_1 + rm_2) < 1$ ;  $r_c \rightarrow 0$ ,  $\gamma \rightarrow \pi$ ,  $x \rightarrow -m_1 e / m$ ,  $y \rightarrow 0$ ; координаты центров масс ротора и слоя жидкости принимают значения:  $x_p = rm_2 e / m$ ,  $y_p = 0$ ;  $x_G = -rm_1 e / m$ ,  $y_G = 0$ .

Таким образом, при больших угловых скоростях вращения ротора  $\omega$  центр масс системы стремится занять положение на оси вращения  $AB$ ; происходит самоцентрирование системы.

Видно, что с увеличением массы жидкости в роторе происходит уменьшение критической скорости, при которой прогиб вала достигает максимума (появляется резонанс) [6]. Дальнейший анализ расчетов показывает, что с увеличением внешнего сопротивления при неизменном  $\mu$  критическая скорость и соответствующий ей прогиб уменьшаются, а самоцентрирование системы ( $r_c \rightarrow 0$ ) ускоряется.

При постоянном сопротивлении ( $n = \text{const}$ ) увеличение массы жидкости (параметра  $\mu$ ) так же ускоряет самоцентрирование системы. Критическая частота вращения ротора при одних и тех же значениях  $n$  и  $\mu$  уменьшается с ростом параметра  $r$ .

### Заключение

Результаты проведенной работы показывают, что увеличение массы жидкости в роторе уменьшает его критическую скорость вращения. Внешнее трение ускоряет самоцентрирование системы. Полученные соотношения позволяют производить выбор конструктивных параметров жидкостного

АБУ, работающего в заданном диапазоне угловых скоростей ротора.

### Литература

- Саруев Л.А., Пашков Е.Н., Мартюшев Н.В. Математическое моделирование гидроимпульсного механизма бурильных машин // В мире научных открытий. - 2010 - №. 6-3 (13) - С. 61-65.
- Пашков Е.Н., Мартюшев Н.В., Кузнецов И.В. Исследование эффективности балансировки жидкостным автобалансирующими устройствами // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 1. – с. 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/107-7919>
- Пашков Е.Н., Мартюшев Н.В., Кузнецов И.В. Влияние эллипсности и эксцентрикитета резервуара на точность автоматической балансировки // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 1. – с. 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/108-8472>
- Пашков Е.Н., Мартюшев Н.В., Зиякаев Г.Р., Кузнецов И.В. Стационарное вращение неуравновешенного ротора, частично заполненного жидкостью при действии сил внешнего трения // Современные проблемы науки и образования – 2012. – № 6. – с. 102. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7825>
- Мартюшев Н.В. Расчет параметров структуры материалов с помощью программных средств // В мире научных открытий. - 2011 - №. 1 (13) - С. 77-82.
- Пашков Е.Н., Мартюшев Н.В. MATERIALS AND ENGINEERING SCIENCE (УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 2. – с. 126-127.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАЛАНСИРОВКИ ЖИДКОСТНЫМ АВТОБАЛАНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Пономарёв А.В.

Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30  
E-mail: [epashkov1@sibmail.com](mailto:epashkov1@sibmail.com)

### Введение

Известные автобалансирующие устройства (АБУ) достаточно эффективно уменьшают режимное изменение дисбаланса ротора. Однако такая результативность достигается за счет использования тяжелой жидкости (ртути) в качестве корректирующей массы [1]. При разработке машин и приборов стремятся избегать использования высокотоксичных веществ. Имеющиеся нетоксичные жидкости обладают плотностью не более 2 г/см<sup>3</sup>, поэтому использование их в качестве корректирующей массы в жидкостных АБУ, вместо ртути, ведет к снижению эффективности автоматической балансировки ротора [2]. Именно из-за недостаточной эффективности жидкостных АБУ, обусловленной малой плотностью жидкости, факторы, влияющие на точность балансировки, были слабо освещены. На кафедре ТПМ ТПУ было разработано устройство [3], позволяющее многократно повышать эффективность автоматической балансировки роторов с помощью жидкостных АБУ. В связи с этим возникла необходимость исследования различных факторов, которые влияют на точность балансировки.

### Материал и методы исследования

В большинстве работ [3, 4], посвященных исследованию балансировки ротора жидкостными АБУ, используется модель, содержащая обойму, жестко закрепляемую на гибком валу полость в обойме частично заполняется жидкостью, т.е. обойма играет роль резервуара. В некоторых

реальных машинах ротор жесткий, а корпус упруго связан с основанием. Динамику такой машины точнее описывает модель ротора, содержащая резервуар-обойму, закрепляемую на жестком валу, который имеет возможность вращения в подшипниках [5, 6]. Подшипники идеальные (без люфта) установлены в корпусе, который упруго связан с основанием.

### Результаты исследования и их обсуждение

Покажем влияние различных факторов на точность балансировки – это необходимо для пояснения дальнейших исследований.

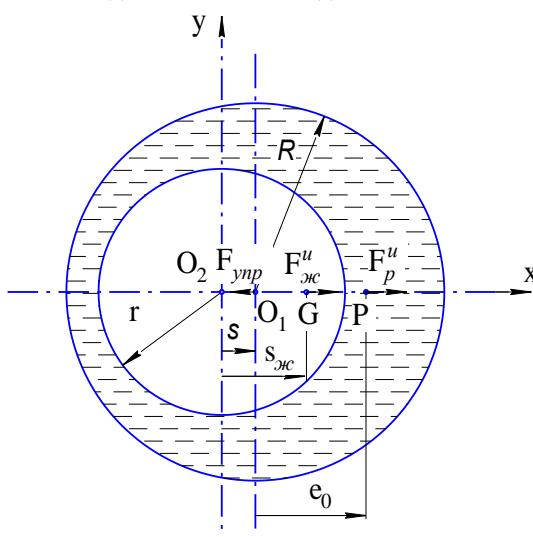


Рис. 1. Схема сил в жидкостном АБУ