

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РАССОГЛАСОВАНИЯ РЕЗОНАНСНОГО ВИБРАТОРА ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Колбасин А.М., Марсов В.И., Гришин А.А., Цепкин П.А.

На основе разнообразных воздействий ультразвука на твердые и жидкие вещества образовалось целое технологическое направление – ультразвуковая технология. Благодаря своим положительным, а иногда и уникальным проявлениям ультразвуковая технология сегодня представлена практически во всех процессах основного и ремонтного производства. Поэтому необходимы теоретические исследования технологических процессов взаимодействия нагруженных вибровозбудителей со средами различной физической природы [1 – 4].

Нагружение вибровозбудителя изменяет его частоту. Это объясняется наличием активной составляющей комплексного сопротивления среды, которая поглощает часть энергии. Очевидно, что резонансная частота при отсутствии нагружения и при нагружении вибровозбудителя будут отличаться. Оценим такое расхождение, рассогласование частот безразмерной величиной:

$$\delta = \frac{f_0}{f_n}, \quad (1)$$

где:  $f_n$ ,  $f_0$  – соответственно резонансные частоты нагруженного и ненагруженного вибровозбудителя;

$$f_0 = \frac{c}{2L} \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{L_n d_0}{d_e}\right)^2}{\pi^2}}. \quad (2)$$

Учитывая (1), (2) представим уравнение (2.28) в безразмерной форме:

$$\delta = 1 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2X_n}{r_n^2 + X_n^2 - 1}, \quad (3)$$

где  $X_n$ ,  $r_n$  - удельные реактивное и активное сопротивления.

$$X_n = \frac{X_n}{W_{0e}} = \frac{X_n}{\rho c s_{0e}}, \quad (4)$$

$$r_n = \frac{R_n}{W_{0e}} = \frac{R_n}{\rho c s_{0e}}. \quad (5)$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
X_n &= \frac{W_{0z}}{W_{0l}} \cdot \frac{kr}{1+(kr)^2} = \frac{\rho_z c_z}{\rho_k c_k} \cdot \frac{kr}{1+(kr)^2} \\
r_n &= \frac{W_{0z}}{W_{0l}} \cdot \frac{(ka)^2}{1+(ka)^2} = \frac{\rho_z c_z}{\rho_k c_k} \cdot \frac{(kr)^2}{1+(kr)^2},
\end{aligned} \tag{6}$$

где  $W_{0z} = (\rho c)_z S_z$  - волновое сопротивление (акустическая жесткость) грунта в месте контакта.

Для определения удельных сопротивлений среды ( $X_n$  и  $r_n$ ), выразим произведение  $kr$  в (6) через основные параметры рабочего процесса - акустическую жесткость грунта среды ( $\rho c_z$ ) и частоту возбуждения вибровозбудителя ( $f_0$ ):

$$kr = 4\pi \left( \frac{d_0}{\lambda_z} \right)^2 = 4\pi \left( \frac{d_0 \rho_z}{\rho_z c_z} f_0 \right)^2 \tag{7}$$

Подставив (7) в (6), получим:

$$\begin{aligned}
X_n &= \frac{\rho_z c_z}{\rho_k c_k} \cdot \frac{4\pi \left( \frac{d_0 \rho_z}{\rho_z c_z} f_0 \right)^2}{1 + \left[ 4\pi \left( \frac{d_0 \rho_z}{\rho_z c_z} f_0 \right)^2 \right]^2}, \\
r_n &= \frac{\rho_z c_z}{\rho_k c_k} \cdot \frac{\left[ 4\pi \left( \frac{d_0 \rho_z}{\rho_z c_z} f_0 \right)^2 \right]^2}{1 + \left[ 4\pi \left( \frac{d_0 \rho_z}{\rho_z c_z} f_0 \right)^2 \right]^2}.
\end{aligned} \tag{8}$$

В выражения (8) входят величины, учитывающие как свойства среды, так и параметры вибровозбудителя.

Для определения величины рассогласования рабочего органа по частоте, из-за трансцендентности уравнения (3), итерационный метод Мюллера [Muller, David E., "A Method for Solving Algebraic Equations Using an Automatic Computer," MTAC, 10 (1956), 208-215

Результаты, полученные при решении выражения (8), показывают, что нагружение рабочего органа грунтом изменяет частоту вибровозбудителя. Это объясняется наличием активной составляющей комплексного сопротивления грунта, которая приводит к тому, что часть энергии поглощается грунтом. Однако в рассматриваемой системе  $R_n \neq W_{0l}$  и часть энергии падающей волны отражается и возвращается к источнику.

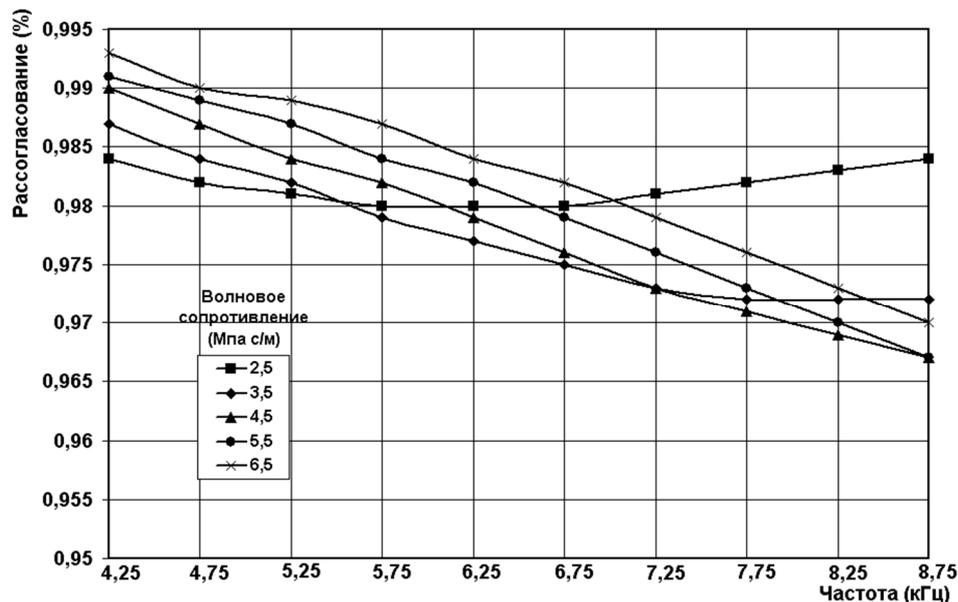
При этом в системе одновременно с бегущей возникает стоячая волна.

Во всех рассмотренных случаях фиксируется повышение частоты при нагружении системы, что эквивалентно укорочению ненагруженной стержневой системы. Это говорит о том, что реактивная составляющая комплексного сопротивления грунта носит в большей степени инерционный характер.

Поэтому, для согласования высокочастотного вибровозбудителя со средой необходимо возбуждать его не с резонансной частотой  $f_0$ , а с учетом поправки, вызванной нагрузкой:

$$f_H = f_0 + \Delta f$$

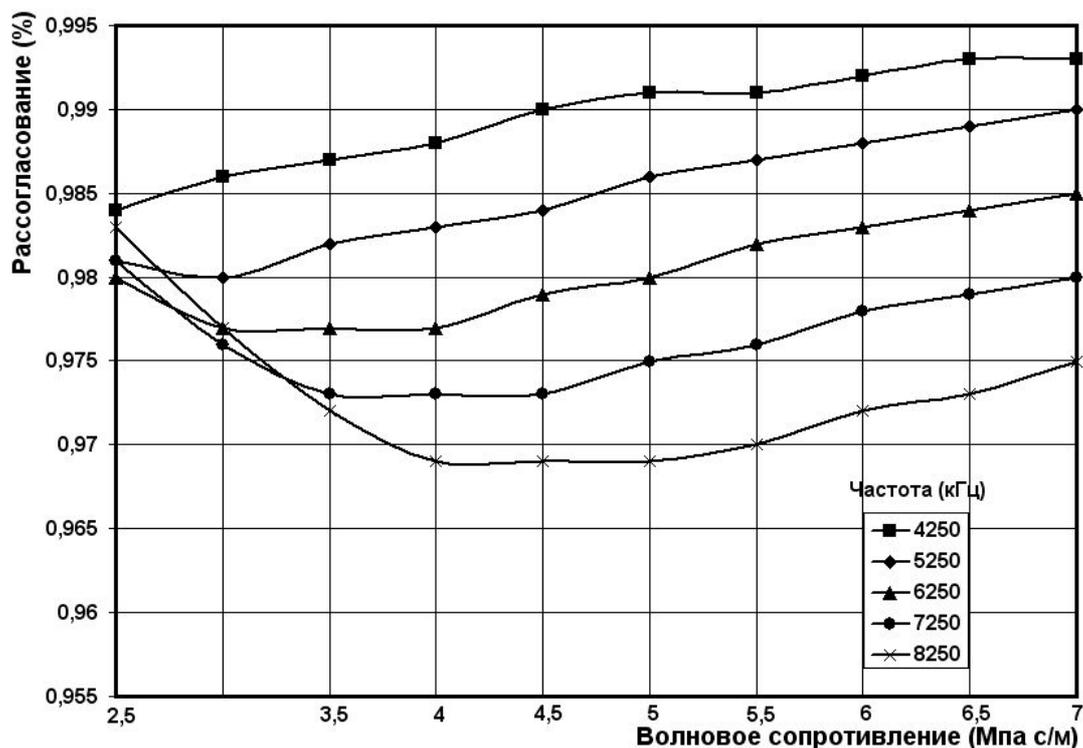
На рисунке 1 изображены графики величины рассогласования рабочего органа в зависимости от частоты возбуждения, при пяти значениях волнового сопротивления грунта в пределах от 2,5 до 5,5 МПа с/м.



**Рисунок 1 - Зависимость рассогласования вибровозбудителя от частоты возбуждения, при различных значениях волнового сопротивления среды**

Графики на рисунке 1 показывают, что величина рассогласования вибровозбудителя изменяется от 0,968 до 0,998. Причем на больших частотах эта величина значительно больше, т.е. вибровозбудитель при больших частотах более чувствителен к изменению характеристик среды.

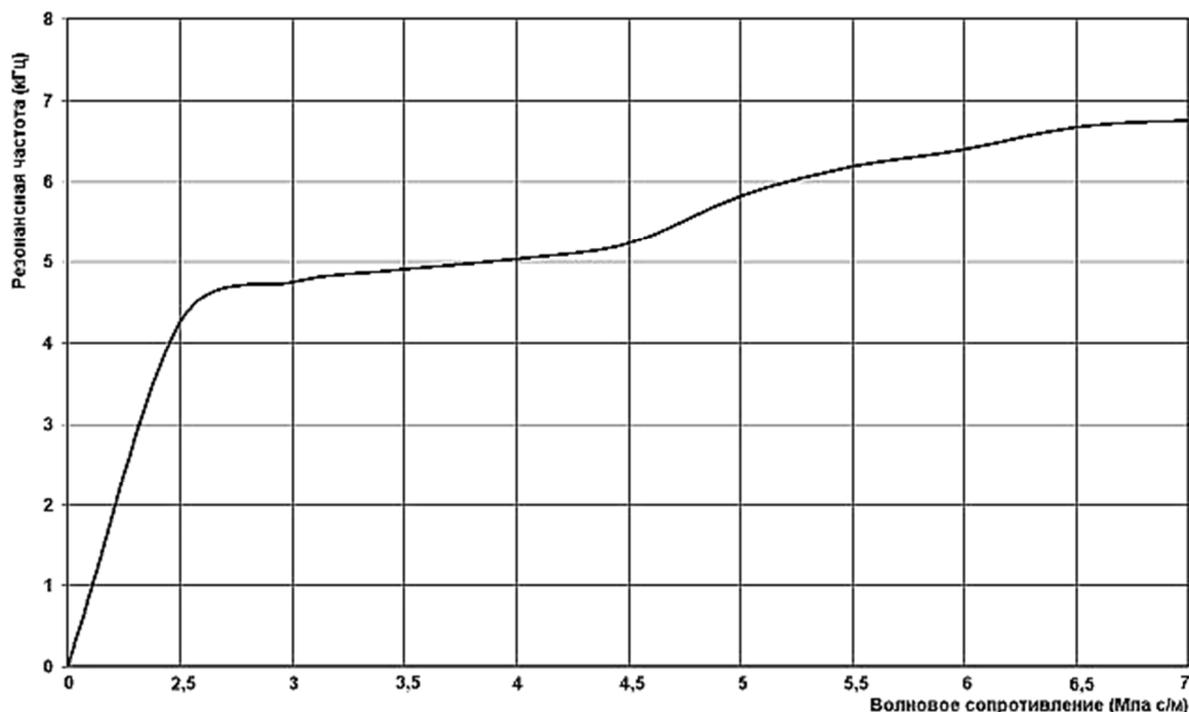
На рисунке 2 представлены зависимости величины рассогласования вибровозбудителя в зависимости от волнового сопротивления среды при пяти различных частотах возбуждения.



**Рисунок 2 - Зависимость рассогласования рабочего органа от волнового сопротивления грунта, при различных значениях частоты возбуждения**

Из рисунка 2 видно, что увеличение волнового сопротивления среды уменьшает величины рассогласования, что объясняется тем, что с увеличением сопротивления нагрузки условия передачи в нее энергии возбудителя становятся эффективнее. Этот результат показывает целесообразность использования высокочастотных резонансных вибровозбудителей в плотных средах.

Рисунок 3 демонстрирует зависимость резонансной частоты системы «вибровозбудитель – присоединенная среда» от волнового сопротивления с реды. Наблюдается сначала резкий, а затем по мере увеличения волнового сопротивления среды монотонный рост резонансной частоты. Этот факт также подтверждается зависимостями, приведенными на рисунках 1 и 2.



**Рисунок 3 - Зависимость резонансной частоты системы «вибровозбудитель – присоединенная среда» в зависимости от волнового сопротивления среды**

Анализ зависимостей на рисунках 1 - 3 позволяет сделать важный вывод о наличии условий, необходимых для эффективной работы вибровозбудителя и, в первую очередь, это поддержание резонансной частоты колебаний вибровозбудителя, которая меняется в зависимости от свойств и объема присоединенного среды.

Параметры волны вибровозбудителя достигают максимального значения при равенстве сопротивлений его колебательной и присоединенной среды. Эти сопротивления, как правило, не равны, поэтому одна часть энергии падающей волны отражается и возвращается к источнику, а другая поглощается средой, что влечет за собой изменение собственной частоты и нарушение резонансного режима колебаний вибровозбудителя. Можно сделать вывод, что необходима разработка комплекса мероприятий, направленных на установление и поддержание резонансного режима колебаний системы, т.е. способов согласования вибросистемы с нагрузкой.

### Список информационных источников

- [1] Пейн Г. Физика колебаний и волн. Москва: Мир, 1979, 389с.
- [2] Румынская И.А. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1979, 114с.
- [3] Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: Машгиз, 1959, 331с.
- [4] Остроух А.В. Информационные технологии в научной и производственной деятельности / [ред. А.В. Остроух] - М: ООО "Техполиграфцентр", 2011. - 240 с. - ISBN 978-5-94385-056-1.