

УДК 62-185.7

О ВОЛНОВОМ РЕЗОНАНСЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РОТОРОВ С МАЛОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ И РАДИАЛЬНЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

© Андрей Николаевич Никифоров, Николай Алексеевич Татусь,
Александр Евгеньевич Шохин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
(ИМАШ РАН, г. Москва, Россия)
n.andre@mail.ru

Статья представляет границы волнового резонанса реальных роторов в зависимости от количества и вязкости жидкости, а также от глубины полости и количества герметичных или проницаемых радиальных перегородок в них. Вместе с тем указан и ряд других динамических особенностей системы «ротор-жидкость».

Ключевые слова: Ротор, жидкость, перегородки, волны.

About Wave Resonance of Experimental Rotors with Low-Viscous Fluid and Radial Baffles

Andrey Nikiforov, Nikolay Tatus', Aleksandr Shokhin
The Blagonravov Institute of Machine Science, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

The paper presents the wave resonance boundaries of tangible rotors depending on the fluid volume and viscosity as well as on the cavity depth and number of sealed or penetrable radial baffles inside them. At once, other dynamic features of rotor-fluid system are denoted.

Keywords: Rotor, fluid, liquid, wave.

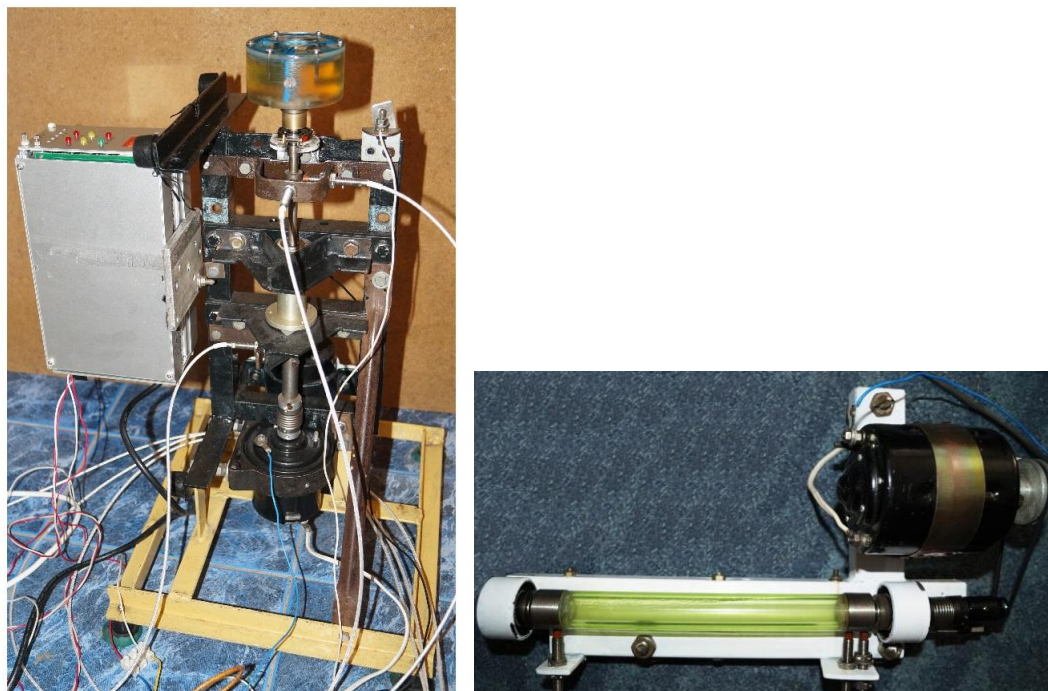
Объекты, средства и методы исследования

Явление волнового резонанса вращающейся жидкости наблюдается в центрифугах и сепараторах, а также в жидкостных автобалансирующих устройствах и жидкотопливных ракетах, стабилизируемых вращением. На поверхности жидкости, частично заполняющей ротор, при определенных угловых скоростях возникают волны различных порядков, в т.ч. волна первого порядка, образующая неуровненную конфигурацию, перемещающуюся относительно ротора, и являющаяся причиной самовозбуждающихся колебаний системы. Прецессионное поведение реальных роторов с жидкостью обсуждается например в [1-6]. В отличие от научных трудов, известных авторам данной публикации, ниже демонстрируются резонансные диапазоны экспериментальных роторов консольного и межопорного класса количественно согласующиеся между собой. Динамический анализ выполнен с помощью пары установок (рис.1).

Первая из них – это вертикальный, тонкий стальной вал, опирающийся на два шариковых подшипника, с консольно-насаженной прозрачной цилиндрической камерой, содержащей одинаковые тонкие легкоъемные перегородки с силиконовым герметиком на краях. Отношение глубины полости к её диаметру $L/D=1/2$. Первая критическая частота этого экспериментального ротора в пустом и полном жидкостью состоянии получилась около 48 и 41 Гц и практически не изменялась с увеличением скорости вращения и числа перегородок благодаря их малому весу. Для безопасности поперечный прогиб вала ограничивался третьим страхующим шарикоподшипником, размещенным вблизи камеры.

Вторая – это горизонтальный, полый вал из плексигласа на двух шарикоподшипниках в резинометаллических обоймах с соотношением внутренних размеров $L/D=10$. Его первая критическая частота без заполнения и с жидкостью увеличивалась с частотой вращения примерно от 120 до 190 Гц и от 85 до 110 Гц соответственно.

В короткий ротор заливалась вода, дизельное топливо или минеральное масло. При этом в его полости было 0, 2, 3, 4 или 6 радиальных перегородок. Длинный ротор заправлялся 96%-ым спиртом, подкрашенным зеленой акварельной краской.



а) б)
Рис.1. Экспериментальные короткий (а) и длинный (б) роторы

Заданное значение и изменение скорости вращения обеспечивали электродвигатели постоянного тока, питаемые через выпрямитель от лабораторного автотрансформатора. Передача крутящего момента от электродвигателей к валам была либо прямой через гибкую муфту в случае вращения с частотами ниже 140 Гц, либо повышающей ременной при необходимости разгона до 300 Гц. Отстройка вторых критических частот экспериментальных роторов от максимальных оборотов (300 Гц) как в пустом, так в полном жидкостью состоянии была более 100 Гц.

Поперечные отклонения роторов в двух взаимно перпендикулярных направлениях и скорость вращения измерялись токовыхревыми датчиками. Электрические сигналы с переменным напряжением, пропорциональным величине зазора между этими датчиками и роторами, при помощи аналого-цифрового преобразователя и компьютера отображались в режиме реального времени и записывались. При наблюдении за движением роторов, жидкости и волн и измерении их скоростей вращения одновременно использовался стробоскоп-тахометр. При экспериментах также проводилась фото- и видеосъемка так называемым зеркальным фотоаппаратом с номинальной скоростью 50 кадров в секунду.

Нижняя и верхняя границы волнового резонанса в зависимости от скорости вращения, числа перегородок, количества и вязкости жидкости определялись по видимому в свете

стробоскопа волнообразованию на свободной поверхности жидкости и внезапному росту/спаду огибающей поперечных колебаний роторов при медленном их разгоне-останове.

Явное воздействие волн, распространяющихся по свободной поверхности жидкости, подтверждалось при каждом её полном наливе-сливе, путем сопоставления АЧХ квазистационарных колебаний роторов. В пустом и полном состояниях вне зависимости от числа перегородок возникал всегда один резонанс, тогда как при частичном заполнении – всегда два резонанса (рис.2).

В ходе экспериментов выяснилось, что имеется и третья возможность обнаружения начала волнового резонанса – по появлению заметных, даже невооруженным глазом, биений роторов (рис.2,б). При этом изначально низкая (порядка нескольких герц) частота изменения радиуса прецессии роторов уменьшалась по мере «вхождения» роторной скорости в диапазон существования биений со стороны области вынужденной вибрации роторов, т.е. их нормального синхронного движения, вызванного остаточным дисбалансом.

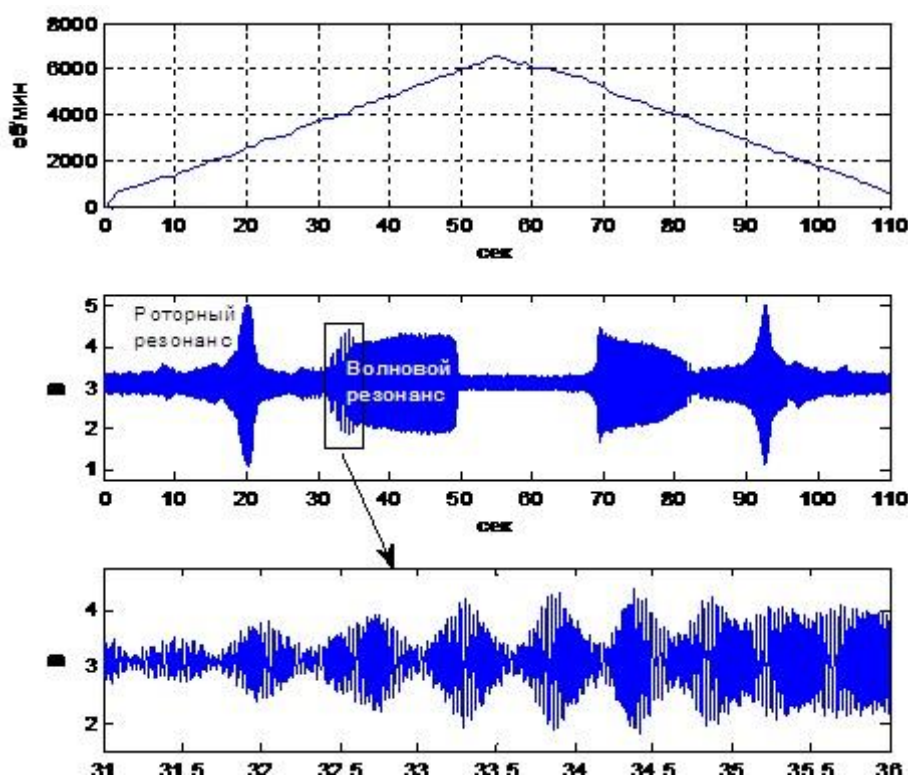


Рис.2. Переходные процессы (разгон-останов) короткого ротора без перегородок при 80%-ом заполнении дизтопливом

Различие в скоростях, при которых начиналось волнообразование, внезапное повышение уровня вибраций и самовозбуждение ярко выраженных биений роторов, было малым (порядка нескольких десятков оборотов в минуту), поэтому выбор критерия слабо влиял на результаты.

С самого начала всей серии испытаний обнаружались непредвиденные сложности с роторным и волновым резонансами. Пики и границы схода с этих резонансов при разгоне несколько смещались в сторону высоких частот, при останове – в сторону низких. Гистерезис АЧХ при прохождении роторными системами через данные резонансные состояния в обоих направлениях порождали несущие и страхующая опоры, приводящие к жесткой нелинейности систем при больших уровнях вибрации. Кроме того, роторные резонансы происходили в условиях небольшого «раздвоения» критической скорости, что,

вероятно, связано с несимметричной жесткостью рам установок и креплений подшипниковых узлов.

Тем не менее, при некоторых объемах жидкостного наполнения наблюдались траектории движения роторов в пределах «линейности», которые очевидно и представляют собой истинный характер прецессии ротора, возбуждаемой волнами. Анализ умеренных самовозбуждающихся колебаний ротора с жидкостью базировался на быстром преобразовании Фурье, в т.ч. в режиме реального времени. Были исследованы как квазистационарные, так и установившиеся умеренные поперечные движения роторов в диапазоне волнового возмущения.

Описанные оборудование и действия позволили выявить следующее.

Поведение длинного ротора с жидкостью

Самый нетривиальный результат дали биения длинного ротора при 30..50%-ном жидкостном наполнении и почти максимальном числе установочных оборотов. Их частотный спектр (рис.3) сообщает о существовании четырех возбудителей колебаний. Следуя слева направо, уместно назвать эти возбудители: ременный от передаточного отношения 4, гидродинамический из-за собственного волнового движения жидкости, роторный в силу собственной прецессии и дисбалансный в виде вынужденной прецессии ротора. При других объемах спирта и/или скоростях вращения либо «ременная» частота, либо собственная частота полного, либо – пустого ротора становилась незаметной. Пик оборотной частоты ротора всегда преобладал над остальными.

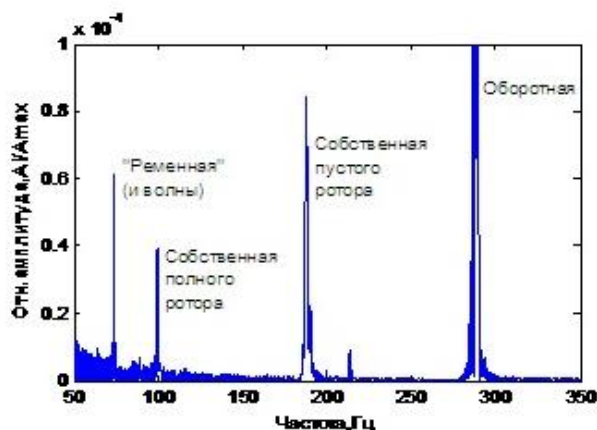


Рис.3. Частотный спектр стационарных колебаний длинного ротора при вращении с частотой 280 Гц и 30%-ом заполнении спиртом

Освещение ротора стробоскопом сначала с частотой вспышек равной частоте вращения, а потом с частотой в четыре раза меньшей, позволило выявить появление стоячих (неподвижных) соответственно четырех волн и одной волны с достаточно ровным гребнем вдоль оси ротора от одного до другого конца его полости. Фотографированием удалось запечатлеть следующее мгновение (рис.4).



Рис.4. Вынужденное волновое движение с почти прямым фронтом внутри длинного ротора

Моменты (частоты вращения) начала и прекращения вынужденного волнового движения жидкости, т.е. возникновения и исчезновения уединенной волны, распространяющейся с угловой скоростью равной ременной, отнесенные к осредненной критической частоте полного ротора (100 Гц), при различных наполнениях спиртом иллюстрирует [рис.5](#). Для сравнения приведены экспериментальные точки, объединенные пунктирами, и теоретическая кривая, воспроизводящая отношение:

$$\frac{1}{\sigma - \sqrt{\sigma^2 + k\sigma + 1}},$$

где $\sigma = \frac{1 - \left(\sqrt{1 - V_f/V_\Sigma}\right)^{2k}}{1 + \left(\sqrt{1 - V_f/V_\Sigma}\right)^{2k}}$, V_f - объем жидкости, V_Σ - объем роторной полости, $k = nk$ [7], k -

число собственных волн в каждом из n отсеков, образованных n радиальными перегородками (в случае отсутствия последних $k=\kappa$).

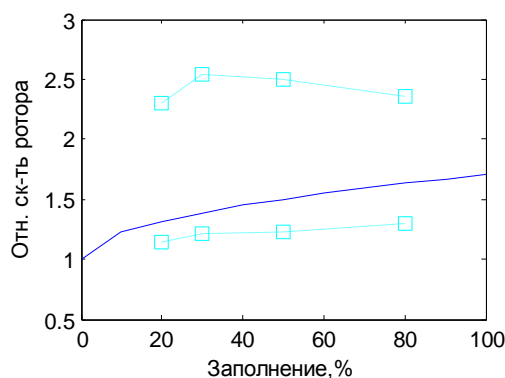
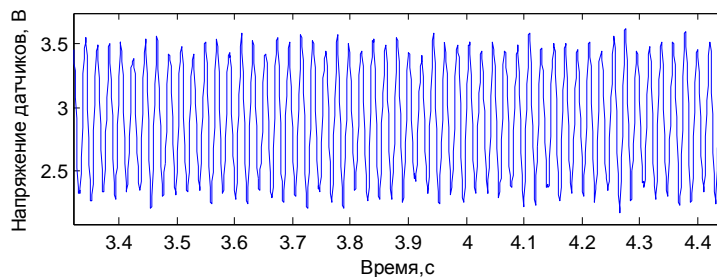


Рис.5. Экспериментальные минимальные и максимальные, а также теоретические скорости волнового резонанса относительно критической полного ротора при различном количестве жидкости

Поведение короткого ротора с жидкостью в т.ч. с герметичными перегородками

Частотный спектр даже не самых ярких биений короткого ротора ([рис.6](#)) показывает, что также имеются четыре источника вибрации. Остаточный дисбаланс дает синхронное возмущение, т.е. с оборотной частотой 156 Гц. Ременный привод с передаточным отношением 2.35 приводит к возбуждению с частотой 66 Гц. Основной пик – это самовозбуждение собственных колебаний ротора с основной частотой пустого ротора 48 Гц. Собственное волновое движение жидкости с критической частотой полного ротора 41 Гц есть четвертое возмущение.



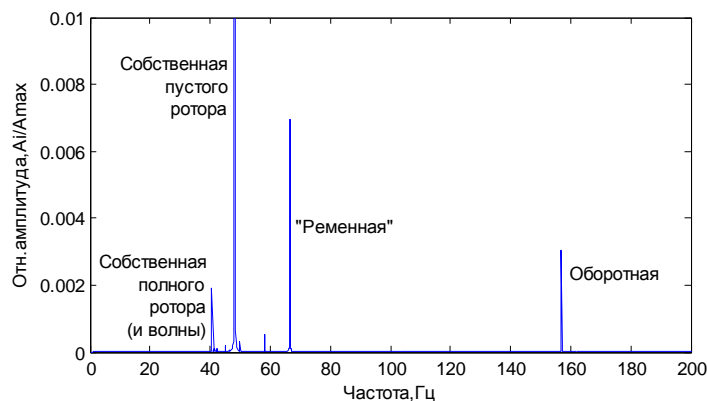


Рис.6. Стационарные колебания ротора с четырьмя перегородками при вращении с частотой 156 Гц и 20%-ом заполнении водой, а также их частотный спектр

После спектрального анализа большого числа осциллограмм выяснилось, что в области волнового резонанса скорость самовозбуждающейся асинхронной прецессии ротора и угловая скорость вынужденной уединенной волны повышаются с нарастанием и снижаются с убыванием скорости вращения, т.е. увеличиваются при разгоне и уменьшаются при останове ротора. При этом они изменяются строго в пределах от критической скорости полного ротора у нижней границы до критической скорости пустого ротора у верхней границы области. Более того, они характеризуются уменьшающейся расстройкой между собой по мере изменения скорости вращения от нижней границы к центру резонансного диапазона. Отсюда наиболее выраженные биения системы происходят на его нижней границе.

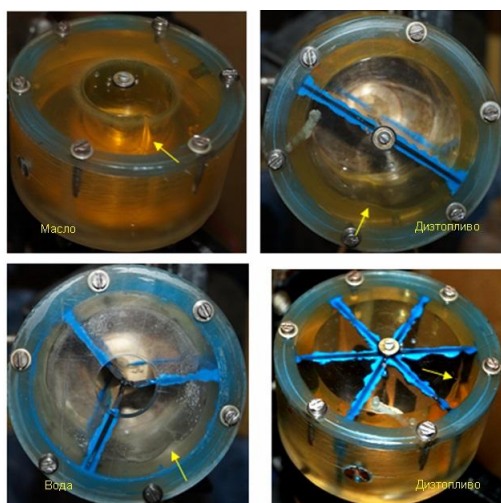


Рис.7. Бегущая против часовой стрелки вынужденная волна в полости вращающегося по часовой стрелке ротора

Подтверждение факта, что роторное и вынужденное волновое движения совершаются с близкими угловыми скоростями, заключенными между критическими скоростями полного и пустого ротора, было визуальным в условиях освещения ротора стробоскопом, настроенным на частоту от 40 до 50 Гц. Получался эффект либо застывшего изогнутого ротора и кружащейся в нём волны, либо стоячей волны относительно вращающегося ротора. Факт существования вынужденной уединенной волны, даже в случаях с перегородками, доказывают фотографии (рис.7). При этом как показала видеосъемка, она является обратной,

т.е. её перемещение относительно боковой стенки полости, в т.ч. «сквозь» перегородки, происходит в сторону противоположную вращению ротора.

Диапазон асинхронных прецессий ротора, вызываемых резонансным взаимодействием собственных и вынужденной волн, ожидаемо зависит от низших собственных частот пустого и полного ротора, числа перегородок, количества и вязкости жидкости. Причем нижняя граница диапазона является функцией осредненной критической частоты полного ротора Ω_R (рис.8), а верхняя – функцией осредненной критической частоты пустого ротора ω_R и Ω_R .

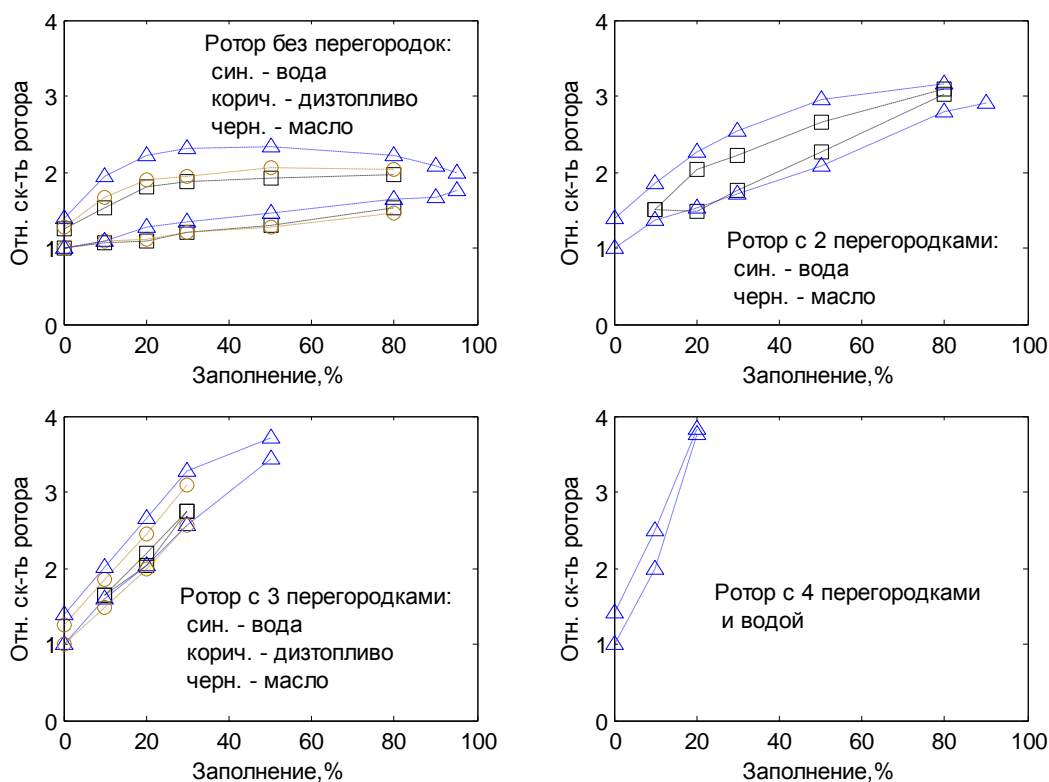


Рис.8. Диапазон волнового резонанса в зависимости от критической скорости полного ротора, количества перегородок и жидкости и её вязкости

Поведение ротора с жидкостью и проницаемыми перегородками

Влияние негерметичности секторов полости на диапазон волнового резонанса оценено с помощью короткого ротора, содержащего воду и три перегородки. Каждая из них имела одинаковую проницаемость, что реализовывалось либо рядом из четырех отверстий с диаметром 2 мм, сосредоточенных недалеко от края перегородки, примыкающего к боковой стенке полости, либо пятью рядами из четырех и четырьмя рядами из трех таких же отверстий, разнесенных подобно сотовой структуре по всей площади перегородки, которая близка к квадрату $32 \times 32 \text{ мм}^2$. Расстояние между смежными рядами отверстий составляло 2.5 мм. Таким образом, суммарная площадь отверстий в одном ряду 4π или $3\pi \text{ мм}^2$ по отношению к площади участка перегородки $2.5 \times 32 \text{ мм}^2$, на котором они располагались, была порядка 15%.

Эффект изменения области волнового резонанса ротора, частично заполненного маловязкой жидкостью, за счет проницаемости перегородок иллюстрирует рис.9.

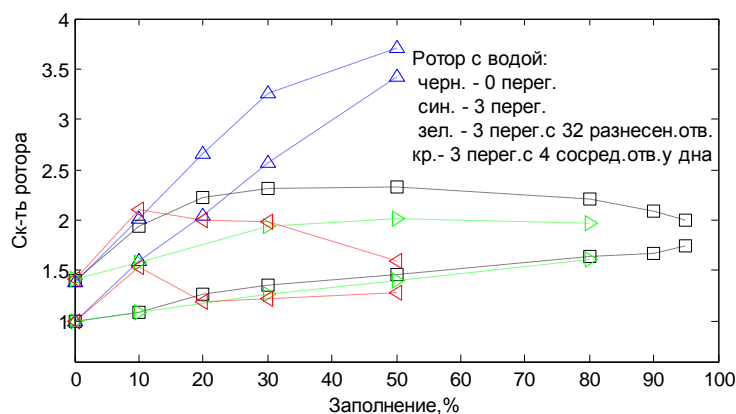


Рис.9. Диапазон волнового резонанса в роторе в зависимости от критической скорости полного ротора, количества воды и особенностей переливных каналов перегородок

Система, состоящая из ротора, маловязкой жидкости и перегородок, в которых переливные каналы разнесены по всей площади перегородки (вариант с 32 отверстиями в каждой перегородке), незначительно отличается от аналогичной роторной системы без перегородок. Они имеют идентичные нижние и несовпадающие верхние границы волнового резонанса.

Ротор с перегородками, в которых ряд переливных каналов сосредоточен на некотором расстоянии от боковой стенки полости (вариант с 4 отверстиями в каждой перегородке), при толщине слоя жидкости меньше этого расстояния характеризуется границами волнообразования герметичного ротора. Этот же ротор при толщине слоя жидкости больше этого расстояния приобретает волновые свойства ротора без перегородок. Однако при заполнении такого ротора – чем дальше переливные каналы оказываются от поверхностного слоя жидкости, тем заметнее верхняя граница волнообразования приближается к нижней, вплоть до полного исчезновения волн в системе.

Выводы

Полученные экспериментальные данные дают основание заключить, что:

1. биения частично заполненного жидкостью ротора обусловлены совпадением частоты собственных колебаний полного ротора в одном из поперечных направлений Ω_{R1} с частотой собственных волн Ω_k и близостью частоты Ω_k к собственной частоте полного ротора в другом перпендикулярном направлении Ω_{R2} ;
2. явление волнового резонанса (движение с биениями) в системе не наступает при скоростях вращения ниже Ω_R и выше $(1+\sqrt{k}/\sqrt{2})(2\omega_R-\Omega_R)$, где коэффициент k зависит от числа радиальных перегородок, в частности когда перегородки отсутствуют $k=1$;
3. с увеличением вязкости жидкости и числа перегородок частотный диапазон волнового резонанса системы уменьшается, более того, вплоть до полного исчезновения, в частности, он перестал наблюдаться у экспериментального короткого ротора с водой и шестью перегородками;
4. частотный диапазон резонансного волнообразования определяется в т.ч. удаленностью переливных каналов от свободной поверхности жидкости;
5. нерационально следовать тривиальному техническому решению по подавлению волн – чем больше радиальных перегородок, тем лучше – есть потенциал определения достаточного и необязательно большого количества перегородок для устранения резонанса (волн) в рабочих процессах роторных машин, содержащих жидкость.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-08-01120_a

Список литературы

1. Епишев Л.В. О динамической неустойчивости вращающегося ротора при неполном наливе жидкости // Научные доклады высшей школы. Серия машиностроение и приборостроение, 1959, №2. С.66-74.
2. Kollmann F.G. Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Kritischen Drehzahlen flüssigkeitsgefüllter Hohlkörper. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Ausgabe B, Vol.28, 1962, pp.115-123 and pp.147-153.
3. Десятков В.Т. Экспериментальное исследование устойчивости вращательного движения тел с жидким наполнением. В кн.: Динамика космических аппаратов и исследование космического пространства, под общ. ред. Тюлина Г.А. М.: Машиностроение, 1986. С.254-261.
4. Manasseh R. Nonlinear behaviour of contained inertia waves. Journal of Fluid Mechanics, Vol.315 (1996), pp.151-173.
5. Böhme G., Pokriefke G., Müller A. Viscous flow phenomena in a partially filled rotor-stator system. Archive of Applied Mechanics, Vol.75 (2006), pp.619-634.
6. Urbiola-Soto L., Lopez-Parra M. Liquid self-balancing device effects on flexible rotor stability. Shock and Vibration, Vol.20 (2013), pp.109-121.
7. Брысин А.Н., Никифоров А.Н., Татусь Н.А. Собственные колебания вращающейся жидкости со свободной поверхностью, распространяющиеся не вдоль оси ротора с радиальными перегородками // Сборник трудов XVIII Международного Симпозиума «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» - DYVIS-2015. М.-Бекасово: ИМАШ РАН, 2015. С.77-81. - То же [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dyvis.ru/download/DYVIS-2015-site.pdf>