

УДК 62-185.7

## КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОГО РОТОРА И КОНЦЕПЦИЯ ЕЁ БЕЗОПАСНОГО ПРОХОЖДЕНИЯ

© Андрей Николаевич Никифоров

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

В статье обобщаются экспериментальные результаты относительно зависимости критической скорости ротора от количества маловязкой жидкости и радиальных перегородок, содержащихся в его цилиндрической полости. Показана возможность подавления резонансных колебаний пустого ротора за счет вливания жидкости в момент вращения со скоростью до его критической.

*Ключевые слова: Ротор, жидкость, перегородки, резонанс.*

### **Critical Speed of Partially Filled Rotor and Conception of Its Safe Passage**

**Andrey Nikiforov**

*The Blagonravov Institute of Machine Science, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

The paper summarizes experimental results concerning to relationship between the rotor critical speed and amounts of low-viscous fluid and radial partitions contained inside a cylindrical cavity of rotor. One shows a suppression possibility for the rotor resonant oscillations by way of the filling with fluid at the rotation with undercritical speed.

*Keywords: Rotor, fluid, liquid, partitions, resonance.*

### **Введение**

Известно с [1, 2] и вновь отмечено например в [3, 4] интересное влияние жидкости на ротор, заключающееся в неожиданно большом снижении его критической скорости – до такой степени, как если бы полость ротора была целиком заполнена жидкостью, даже тогда когда она заполняет только малую часть объема полости. Это явление не наблюдается при неполном смачивании боковой стенки полости (по ее окружности), но всегда достигается, когда эта поверхность остается полностью смоченной при максимальной амплитуде вибрации.

Вместе с тем во вращающемся слое жидкости возможно резонансное возбуждение волн, которые приводят к динамической неустойчивости ротора при скоростях вращения выше критической [5, 6]. Способ подавления волнообразования на поверхности жидкости при частичном заполнении ротора на основе непроницаемых радиальных перегородок впервые получил математическое развитие в теории Пресснера-Коллмана [7]. В [8] указано, что перегородки с переливными каналами также могут устранять волновые резонансы в роторах. Задача о нестационарном движении вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью в полом и вращающемся цилиндре, который имеет равноотстоящие друг от друга радиальные ребра, решается например в [9].

Разумное стремление автора отыскать работы о влиянии жидкости на критическую скорость секторированного ротора (с радиальными перегородками) при неполном наливе не дало результатов. По меньшей мере это должно быть оценено, т.к. рабочие обороты современных роторных машин, в т.ч. содержащих жидкость, всё чаще выносятся в первый

или даже во второй закритический диапазон. Основной проблемой таких роторных систем является их высокий уровень вибрации в момент прохождения критических скоростей, вплоть до выбора зазоров между гибким ротором и статором и соответственно установления различных контактных режимов движения [10, 11].

### Особенности экспериментального ротора и средств измерения

Анализ проведен на установке (рис.1), основой которой является тонкий, вертикальный вал, опирающийся на два шариковых подшипника, с консольно-насаженной прозрачной, цилиндрической камерой, содержащей одинаковые тонкие, легкоъемные перегородки. Первая критическая скорость экспериментального ротора без жидкости приблизительно равна 3000 об/мин и практически не понижалась с увеличением числа перегородок благодаря их малому весу. Для безопасности поперечный прогиб вала ограничивался страхующим шарикоподшипником, размещенным вблизи камеры.



Рис.1. Экспериментальная установка

Заданное значение, а также линейное нарастание/убывание скорости вращения обеспечивал электродвигатель постоянного тока, питаемый через выпрямитель от автотрансформатора. Передача крутящего момента от электродвигателя к валу была прямой через гибкую муфту.

Поперечные отклонения в двух взаимно перпендикулярных направлениях и скорость вращения ротора измерялись токовихревыми датчиками. Электрические сигналы с переменным напряжением, пропорциональным величине зазора между этими датчиками и ротором, при помощи аналого-цифрового преобразователя и компьютера отображались в режиме реального времени и записывались.

Критическая скорость экспериментального ротора в зависимости от числа перегородок, количества и вязкости жидкости в нём определялась по максимуму амплитуд поперечных колебаний ротора при медленном его разгоне-останове.

### Результаты исследования

Опыты проведены с тремя жидкостями – водой, дизельным топливом и минеральным маслом. При этом ротор имел либо пустую полость, либо полость с 2, 3, 4 и 6 радиальными перегородками. С самого начала всей серии испытаний обнаружилась сложность. Резонанс при разгоне несколько смещался в сторону высоких частот, при останове – в сторону низких. Гистерезис АЧХ роторной системы при переходе через критическое состояние в обоих направлениях порождал страшный подшипник, приводящий к контактному движению, т.е. к нелинейности системы при больших уровнях вибрации. Кроме того, резонанс происходил в условиях небольшого раздвоения критической скорости, что, вероятно, связано с несимметричной жесткостью рамы установки и креплений подшипников.

Средняя критическая частота ротора при полном наливе понижалась в соответствии с удельным весом жидкости (табл.1).

**Табл.1.** Инерционно-динамические характеристики исследуемой системы

Жидкость	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Вязкость, мПа·с	Отношение массы жидкости, занимающей всю полость, к массе ротора с пустой полостью	Средняя критическая частота полного ротора и частично заполненного ротора без перегородок, об/мин
Вода	1	1	0.4	2500
Дизельное топливо	0.88*	4*	0.35	2650
Минеральное масло	0.9*	60*	0.36	2650

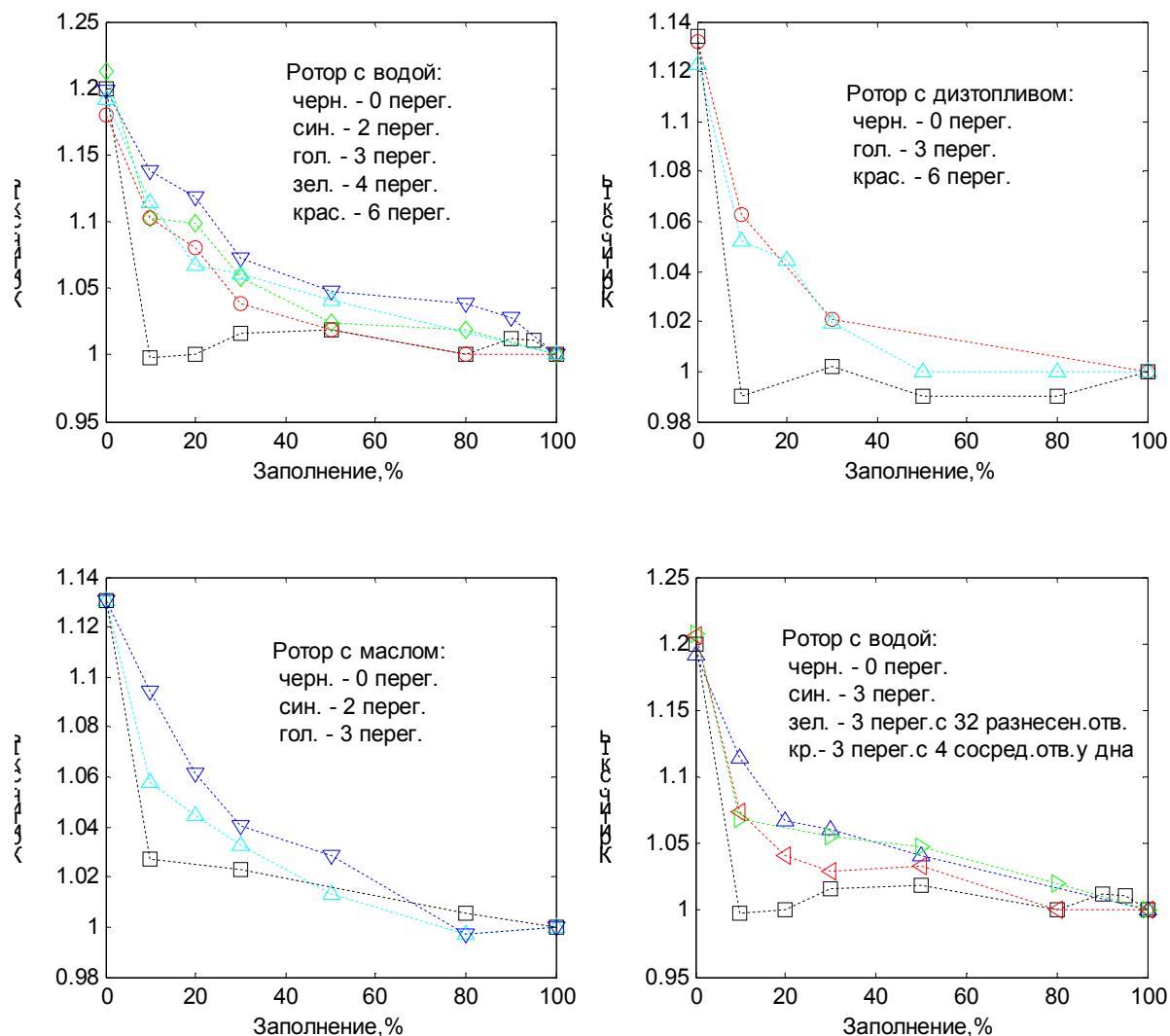
\* – по данным производителей данных жидкостей при 20°C.

Критическая частота частично заполненного ротора (рис.2) без перегородок не зависит от объема жидкости в нём, за исключением случая весьма малых её количеств – недостаточных для смачивания всей боковой стенки полости при прецессии, и близка к той, которую имеет полный ротор. При повышенной вязкости жидкости возникает нормальная тенденция повышения критической скорости ротора с уменьшением его массы, т.е. при опорожнении, которая, по-видимому, для масел остается пренебрежимо слабой. Герметичные перегородки приводят к явной зависимости критической скорости ротора от объема залитой жидкости и видно без какой-либо связи с количеством перегородок и вязкостью жидкости.

Влияние негерметичности секторов полости на критическую скорость оценено с помощью ротора, содержащего воду и три перегородки. Каждая из них имела одинаковую проницаемость, что реализовано 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 32x32 мм<sup>2</sup>. Расстояние между смежными рядами отверстий составляло 2.5 мм. Таким образом, суммарная площадь отверстий в одном ряду  $4\pi$  или  $3\pi$  мм<sup>2</sup> по отношению к площади участка перегородки  $2.5 \times 32$  мм<sup>2</sup>, на котором они располагались, была порядка 15%.

Жидкостный обмен между секторами полости через переливные каналы приводит к промежуточным значениям критической скорости по сравнению с ротором без перегородок или с непроницаемыми перегородками (рис.2). Эта тенденция особенно заметна при 10%-ом заполнении экспериментального ротора водой. Очевидно, чем больше поперечное сечение переливных каналов в перегородках, тем ближе значения критической скорости ротора с проницаемыми секторами к критической скорости полного ротора, т.е. ротора без перегородок. В общем, для этого необходимо и достаточно, чтобы переливные каналы находились на дне слоя жидкости, т.е. как можно ближе к периферийным краям перегородок,

а также соизмерялись с вязкостью жидкости. Проходное сечение каналов следует увеличивать пропорционально вязкости.



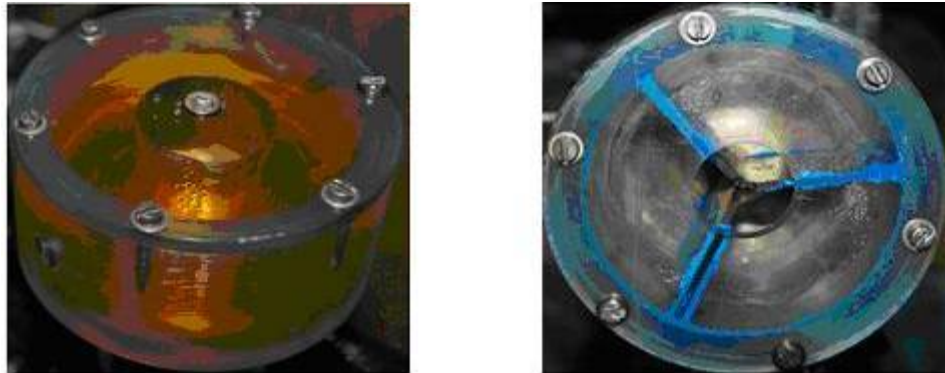
**Рис.2.** Критическая скорость экспериментального ротора в зависимости от количества и вязкости жидкости, а также от количества перегородок и особенностей переливных отверстий в каждой из них

Эффект резкого изменения критической скорости при небольшом количестве жидкости разумно использовать для снижения уровня синхронных вибраций ротора, вызванных его дисбалансом, в т.ч. при прохождении его критической скорости. На основании полученных экспериментальных данных, наиболее перспективной в этом смысле видится система ротора с маловязкой жидкостью, тремя перегородками и донными переливными каналами (непосредственно на концах перегородок у боковой стенки полости).

Идея сдерживания вибрации с использованием жидкости внутри ротора в том, чтобы скачком перейти с одной АЧХ системы на другую при частоте вращения, когда прецессия становится значительной. Это реализуемо с помощью вливания достаточного количества жидкости.

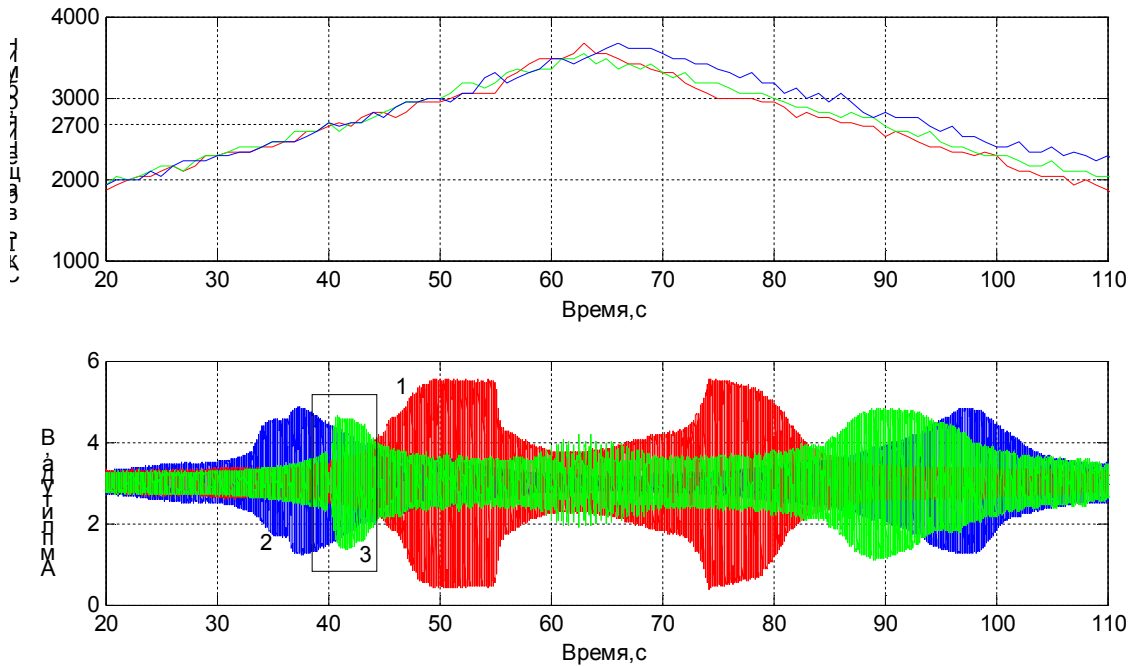
Из фотографий экспериментальной роторной полости, частично заполненной той или иной жидкостью (рис.3), можно видеть, что были изготовлены две крышки. Крышка с малым резьбовым отверстием и соответствующим винтом в центре использовалась в «тандеме» со шприцем, чтобы реализовать любое наполнение, в т.ч. 100%-ое. Крышка с центральным отверстием большого диаметра позволяла производить быстрое наполнение полости

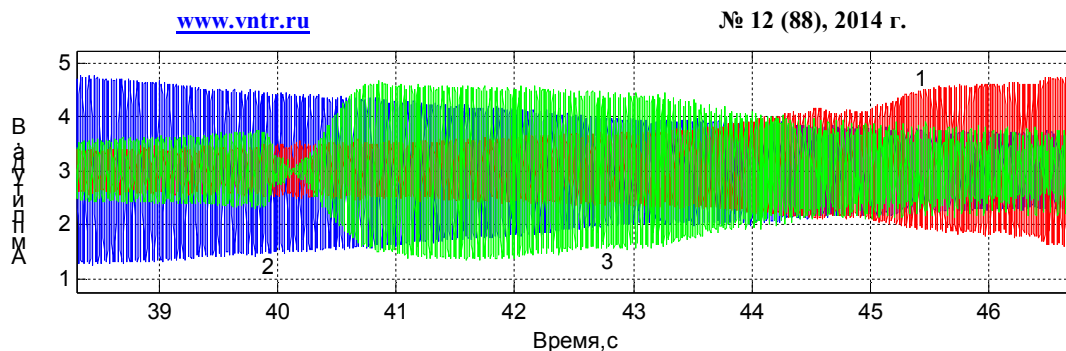
жидкостью, типа воды и смазочных масел, без специальных приспособлений, в т.ч. прямо на ходу, т.е. без остановки ротора.



**Рис.3.** Полость экспериментального ротора с маслом (слева) и с водой и перегородками (справа)

Амплитуды ( $A = \sqrt{x^2 + y^2}$ ) квазистационарных колебаний экспериментального ротора с пустой 1 и полной 2 полостью, а также с половинным её заполнением на ходу 3 – с вливанием жидкости при вращении со скоростью 2700 об/мин – показаны на рис.4. Здесь важно уточнить, в последнем случае ротор был пустым вначале разгона, затем на 40-ой секунде, пока угловая скорость была около 2700 об/мин, он заполнялся водой до половины объема его полости за короткий промежуток времени (в течение менее одной секунды), далее ротор предоставлялся сам себе, т.е. разгонялся и останавливался без какого-либо вмешательства.





**Рис.4.** Угловая скорость и поперечное отклонение пустого (кр.), полного (син.) и частично заполненного на ходу (зел.) ротора

Как видно из амплитуд, при разгоне (до 62-ой секунды) происходит заметное снижение уровня и сужение полосы резонансных колебаний ротора. Максимальное отклонение заполняемого на ходу ротора 3 уменьшается примерно на 20 и 40 % по сравнению с полным 2 и пустым 1 ротором соответственно. Увеличенный фрагмент осциллограмм показывает, что во время вливания ротор испытывает позитивный шок – возвращается к недеформированному состоянию – его амплитуда прецессии падает до нуля (напряжение датчиков устремляется к номинальному 3 В), далее ротор входит в «половинный» резонанс на приобретаемой критической скорости (2600 об/мин). Реализуется лишь «закритическая половина» резонанса – полоса после критической скорости. Поскольку скорость вращения и вливания 2700 об/мин выше критической 2600 об/мин, резонансная амплитуда также уменьшается.

При останове (с 62-ой секунды) ширина резонанса остается примерно одинаковой. Пик резонанса в первом случае приходится на 3000, во втором – на 2500, в третьем – на 2600 об/мин, т.е. на критическую скорость ротора в зависимости от количества воды в нём.

В идеале «зеленый» ротор мог бы незаметно перейти от АЧХ пустого ротора («красная» вибрация) к АЧХ полного ротора («синяя» вибрация) за счет быстрого вливания жидкости, когда амплитуды колебаний пустой и полной систем сравниваются (44-ая секунда). В действительности, как показали эксперименты в т.ч. с маслом, во-первых поймать такой момент затруднительно, особенно при неравножесткости ротора или опор, а во-вторых достижению абсолютного успеха мешает вязкость жидкости. Вливание жидкости в полость, а затем её растекание по внутренней поверхности ротора не являются мгновенными процессами.

Таким образом, вливаемая в полость жидкость безусловно быстро, но в то же время постепенно «перенастраивает» ротор так, что его критическая скорость безразрывно изменяется, в частности с 3000 до 2600 об/мин. Стремительное изменение инерции и, следовательно, критической скорости ротора синхронно сдвигает диапазон его резонансного состояния. Отсюда ротор непременно войдет в резонанс в той или иной мере. Тем не менее, вливание жидкости – это эффективный и перспективный метод подавления резонансных вибраций ротора, особенно в сочетании с большим угловым ускорением. В этом случае достижимо сжатие их полосы и размаха подобно гармошке.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-08-01120\_a

### Список литературы

1. 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.

2. Ehrich F.F. The Influence of Trapped Fluids on High Speed Rotor Vibration. *Journal of Engineering for Industry*, Vol.89, Ser.B, No.4 (1967), pp.806-812.
3. Дубовик В.А., Пашков Е.Н. Стационарное вращение неуравновешенного ротора с жидкостным автобалансирующим устройством при действии сил внешнего трения // *Известия Томского политехнического университета*, 2006. Т.309. №4. С.145-147.
4. Дубовик В.А., Пашков Е.Н. Движение неуравновешенного ротора с жидкостным автобалансирующим устройством при нарастающей по линейному закону угловой скорости // *Известия Томского политехнического университета*, 2006. Т.309. №2. С.204-206.
5. Дерендяев Н.В., Солдатов И.Н. Волновые движения в слое вращающейся вязкой несжимаемой жидкости // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2007, №1. С.151-155.
6. Дерендяев Н.В. Устойчивость вращения роторных систем, содержащих жидкость. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2014. 154 с.
7. Preussner C., Kollmann F.G. On the Stability of a Spinning, Fluid Filled and Sected Rotor. *Computers and Structures*, Vol.30 (1988), No.1/2, pp.131-141.
8. Ehrich F.F. *Handbook of Rotordynamics*, McGraw-Hill, Inc., New-York, 1992.
9. Богоряд И.Б., Лаврова Н.П. Математическое моделирование движения жидкости, частично заполняющей вращающийся цилиндр с радиально расположенными ребрами // *Прикладная механика и техническая физика*, 2011. Т.52, №4. С.100-105.
10. Никифоров А.Н. Обобщенная математическая модель ротора Джеффкотта-Лавалья с учетом его проскальзывания при контакте и несоосности со статором // *Вестник научно-технического развития*, № 5 (57), 2012. С.41-56.
11. Никифоров А.Н. Виброударное и безотрывное движение в том числе обкатка с проскальзыванием ротора по упругозакрепленному статору // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, №6, 2012. С.19-30.