

УДК 533.2+534.14, 67.05

Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин.

Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы¹

В. Н. УСКОВ

*БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Маршала Д. Ф. Устинова
190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1*

П. В. БУЛАТ

*ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашины»
198035, Санкт-Петербург, ул. Степана Разина, 7/78*

Considered oscillatory regime arising in the gap between the stator and the rotor of the gas bearing at the end of the nozzle supply system underexpanded supersonic jets interacting with the surface of the rotor. The results of investigation of the vibrational modes of motion of the rotor, the causes, mechanisms, and the amplitude-frequency characteristics of pressure fluctuations in the supply system of the working fluid and the lubricating layer of the gas bearing.

Keywords: gas bearings with gasfed, hybrid gas bearing, the critical frequency, the Reynolds equation, mode air hammer, flow rate fluctuations.

Ключевые слова: газостатический подшипник, гибридный газовый подшипник, критическая частота, уравнение Рейнольдса, режим пневмомолоток, расходные колебания.

Проектирование системы подачи воздуха в воздушный зазор газостатического подшипника распадается на решение трех взаимосвязанных задач: регулирование расхода подачи воздуха, обеспечивающего максимальную жесткость смазочного слоя; подавление колебаний давления и расхода в системе подачи и смазочном слое; оптимальное для заданной опорной поверхности газового подшипника распределение рабочего тела.

Задача дросселирования давления в системе подачи заключается в обеспечении единого давления подачи рабочего тела при отличающемся уровне противодействия в отверстиях питания. Разница в величине противодействия возникает из-за перекашивания вала в опоре, а также из-за эксцентриситета положения вала при наличии радиальной нагрузки на валу.

При сверхкритическом перепаде давления из дросселя (по другой терминологии компенсатора или сопла) истекает сверхзвуковая струя, которая может быть недорасширенной или перерасширенной в зависимости от величины противодействия. Известно, что натекание струи на соосные или перпендикулярные ее оси стенки может приводить к возникновению колебаний. С одной стороны, колебания являются нежелательным эффектом, вызывающим вибрацию и неустойчивые режимы работы установки. С другой стороны, колебания рабочего тела в смазочном слое создают дополнительную подъемную силу, что увеличивает грузоподъемность опоры при заданном расходе рабочего тела, либо улучшает экономичность при заданной несущей способности.

Исходя из выше сказанного, важно иметь представления о диапазоне параметров, в котором возможно возникновение колебаний, а также их амплитудно-частотных характеристиках.

Полезно уметь управлять процессом возникновения колебаний, а также их подавлением.

Релаксационные колебания давления и расхода в ГСП

При работе системы подачи газа в сверхкритическом режиме из отверстий в сопла и смазочный слой истекают сверхзвуковые струи, взаимодействующие с поверхностью цилиндра ротора (рис. 1) [1]. Наличие в первой бочке ортогональной оси струи преграды приводит к смещению тройных конфигураций скачков уплотнения ближе к соплу, по сравнению с затопленными струями, в область других (по сравнению с параметрами перед маховским диском в затопленной струе) параметров перед центральным скачком уплотнения. На рис. 2 приведены экспериментальные графики изменения статических давлений по преграде в недорасширенной импактной струе при различных удалениях среза сопла до преграды h (здесь и далее все линейные размеры отнесены к радиусу среза сопла r_a).

При определенных, зависящих от числа Маха M_a сопла и нерасчетности истечения n , удалениях h давления в центре и на периферии преграды совпадают (рис. 2, кривая 2). Эти удаления примерно и соответствуют началу автоколебательного режима.

Возникновение этого режима происходит внезапно, при незначительном изменении h , и характеризуется большими пульсациями давления на преграде. Тройная конфигурация T становится нестационарной и совершает интенсивные колебания между соплом и преградой. Внутри ударного слоя появляются бегущие волны разрежения и сжатия, а иногда и ударные волны, что подтверждают данные эксперимента и численных расчетов [2–6].

¹ Окончание. Часть I. см. Вестник МАХ. 2012. №3. стр. 3–7.

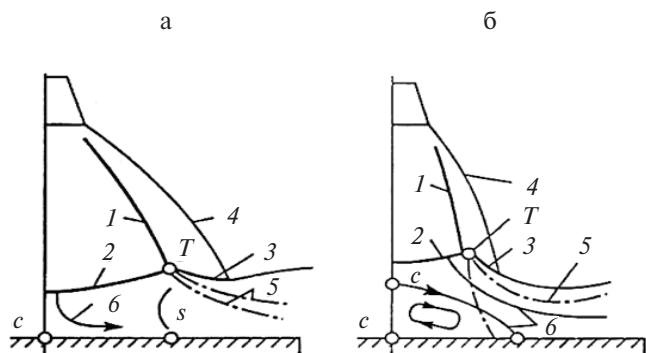


Рис. 1. Ударно-волновые картины перед преградой при натекании на нее сверхзвуковой струи:

а — стационарный режим обтекания;

б — течение с центральной циркуляционной зоной;

- 1 — висячий скачок уплотнения; 2 — центральный скачок уплотнения; 3 — отраженный скачок; 4 — граница струи; 5 — зона смешения; 6 — линия тока; 5 — звуковая линия;
- с — точка торможения потока; s — звуковая точка;
- T — тройная конфигурация ударных волн

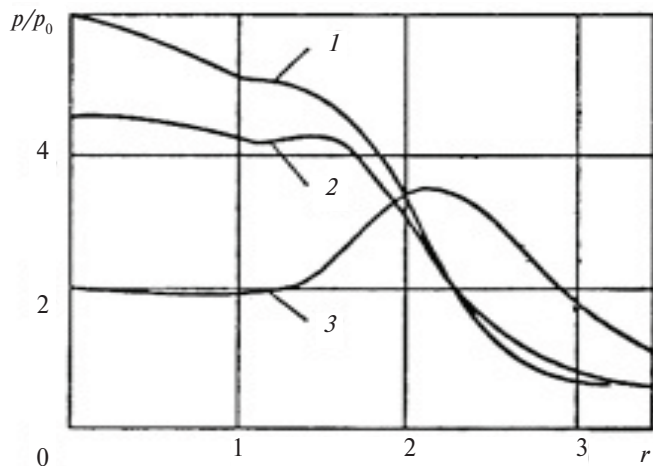


Рис. 2. Типичные распределения статического давления вдоль преграды ($M_a = 2, n = 2,45$):

1 — $h = 3,5$; 2 — $h = 4,25$; 3 — $h = 9$

Одномерная модель колебательного цикла

В одномерной постановке процессы, происходящие в ударном слое при автоколебательном режиме, можно пояснить схемой, представленной на рис. 3.

Ударная волна 1 отражает результат запирания центрального потока за центральным скачком уплотнения периферийным потоком, достигающим поверх-

ности преграды на некотором удалении от ее центра (рис. 3, а). Волна бежит от преграды по дозвуковому потоку (рис. 3, б) и, достигая покоящегося центрального скачка уплотнения 2, взаимодействует с ним. В результате интерференции центральный скачок уплотнения превращается в ударную волну 3, встречную сверхзвуковому потоку и направленную к соплу (рис. 3, в). Заметим, что вместе с ударной волной 1 вдоль скачка 1 [1] перемещается и тройная конфигурация. Поскольку интенсивность скачка 1 при приближении к соплу падает, то уменьшается различие газодинамических переменных в потоках, разделенных тангенциальным разрывом. Отраженная волна разрежения 4 распространяется в направлении преграды по потоку или области торможения за волной 1 (рис. 3, в). Контактный разрыв 5, разделяющий потоки за ударной волной 3 и за волной разрежения 4, может перемещаться к соплу.

Отражение волны 4 от преграды происходит в виде волны разрежения, которая движется к соплу и после рефракции на контактном разрыве 5 догоняет ударную волну 3. В результате интерференции ударная волна 3 превращается в сносимую (дрейфующую, по терминологии [7]) ударную волну 6, которая относительно сверхзвукового потока бежит в сторону преграды с дозвуковой скоростью (рис. 3, г). Скорость потока за дрейфующей ударной волной может оставаться сверхзвуковой [7], поэтому натекание этого потока на преграду может приводить к появлению ударной волны 7. Повышенное давление на преграде снимает «блокаду» центрального потока, и он уходит из ударного слоя. Отметим, что перемещение связанной с ударной волной тройной конфигурации к преграде приводит к увеличению различий в газодинамических переменных на тангенциальном разрыве, способствующих новому запиранию центрального потока. Не вдаваясь в детали этих процессов и в анализ перемещающихся тройных конфигураций, который выполнен в [8], можно постулировать, что ударно-волновые процессы приведут к схеме, показанной на рис. 3, б. Изложенная схема объясняет механизм внутренней обратной связи автоколебательного режима.

Таким образом, автоколебательный режим взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой обусловлен неравномерным распределением параметров в струе, зависит от геометрических и газодинамических параметров сопла, размеров преграды и ее удаления от сопла.

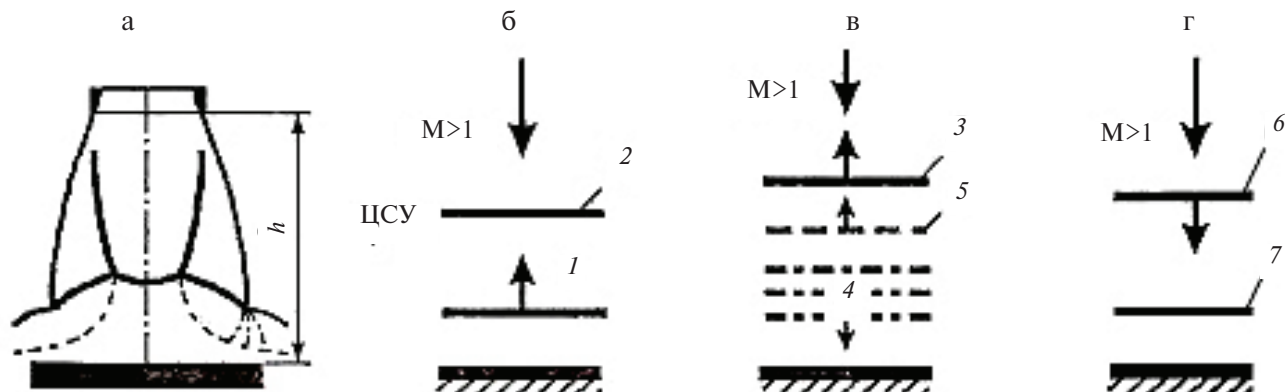


Рис. 3. Схема ударно-волнового процесса автоколебательного режима

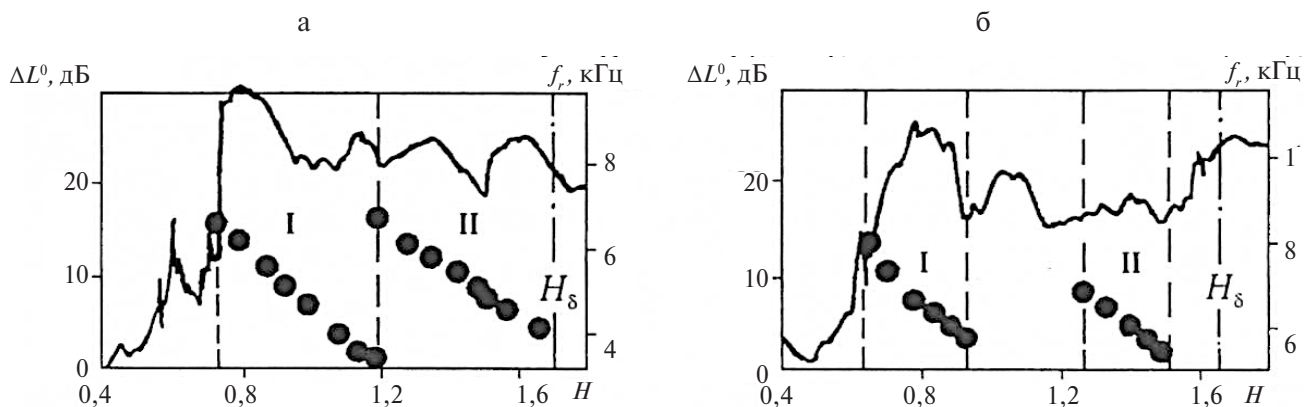


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики автоколебаний:
 а — $r_{np} = 3,45$, б — $r_{np} = 7,45$ для $n = 5$

Области существования колебательных режимов

Совместное влияние геометрических и газодинамических факторов на структуру течения и параметры автоколебаний при взаимодействии сверхзвуковых струй с нормально расположенной плоской безграничной или ограниченной преградой проявляется через обобщенный параметр подобия $x^* = 2M_a(\gamma n) 0,5$, где γ — показатель адиабаты. При изменении значения отношения $h/x^* = H$ в системе «струя — преграда» чередуются стационарные и нестационарные режимы обтекания.

Для имитации истечения струй из сопел питающей системы газостатического подшипника использовалось коническое сопло Лавала с числом $M_a = 1,5$, углом полураствора, равным 5° и радиусом выходного сечения $r_a = 5$ мм. Экспериментальные исследования проводились в следующих диапазонах параметров:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1,4, M_a = 1,5, n = 3 \text{ и } 5, \\ r_{np} &= 2,5; 2,8; 3,45; 3,8; 4,6; 5,28; 5,72; 6,27; 6,9; 7,45; \\ h &= 3 \div 16. \end{aligned}$$

В ходе эксперимента получены кривые изменения интегрального уровня пульсаций давления на преграде ΔL^0 как функции h при вариации радиуса преграды r_{np} для струи с $n = 3$ (рис. 4, а) и $n = 5$ (рис. 4, б).

На рис. 4 сплошные кривые соответствуют интегральному уровню ΔL^0 ; темные точки — частотам основного тона f_r ; штриховые вертикальные линии разделяют начало и конец нестационарных режимов; штрихпунктирная — радиальное течение с невозмущенной первой бочкой струи H_δ ; цифрами I и II обозначены первый и второй режимы колебаний.

Параметры системы «центральный скачок уплотнения — преграда» оказывают влияние на частоту пульсаций давления f_r . Увеличение отхода центрального скачка уплотнения от преграды с ростом расстояния h , а также с увеличением n и числа M_a сопровождается уменьшением частоты f_r .

Анализ частот нестационарных процессов показал, что на участках возникновения и прекращения автоколебаний в частотных спектрах присутствует только одна дискретная составляющая, уровень превышения которой над широкополосным фоном значителен (15–25 дБ).

По мере изменения расстояния h возникают два режима с существенно различными механизмами поддержания колебаний. Первый режим автоколебаний характеризуется

наличием в частотном спектре нескольких дискретных составляющих (наряду с основным тоном присутствуют обертоны, до 40 дБ превышающие общий уровень сплошного шума струи); мощным колебанием ударно-волновой структуры и давления на преграде с большой амплитудой и сравнительно низкой частотой. Колебания имеют ярко выраженную периодическую структуру.

Наличие в частотном спектре нескольких (кратных) дискретных составляющих есть следствие нелинейного характера пульсаций давления, вызванных ударно-волновыми процессами в области между центральным скачком уплотнения и преградой.

Второй режим, значительно меньший по протяженности (в 2–5 раз по отношению к первому), характеризуется единственной дискретной составляющей (порядка 40–30 дБ) частотного спектра, умеренным колебанием ударно-волновых структур и давления на преграде (кривые II на рис. 3).

Анализ амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления в точке торможения преграды (см. рис. 4), а также границ существования нестационарных режимов позволил установить с точки зрения размера два типа преград:

— тип «малых преград конечных размеров» ($r_{np} < 2$), для которого существуют оба нестационарных режима (рис. 4, а), занимающих непрерывно всю область расстояний h до момента возникновения течения с невозмущенной первой бочкой (штрих-пунктирная линия H_δ);

— тип «бесконечных преград», при котором существуют также оба нестационарных режима, разделенных областью стационарного течения с центральной циркуляционной зоной [1].

Именно бесконечные преграды имеют отношение к рассматриваемому нами случаю.

Список литературы

1. Усков В. Н., Булат П. В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбоходильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник МАХ. 2012. № 3.
2. Набережнова Г. В., Нестеров Ю. Н. Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой. В сб.: ТР. ЦАГИ. 1976. Вып. 1765.
3. Остапенко В. А., Солотчин А. В. Силовое воз-

действие сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1974. № 13. Вып. 3.

4. Горшков Г. Ф., Усков В. Н., Фаворский В. С. Особенности нестационарного обтекания безграничной преграды недорасширенной струей. // ПМТФ. 1993. Т. 34. № 4.

5. Усков В. Н., Цымбалов В. В., Цымбалова Е. Н. Численное решение задачи о нестационарном взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой. В сб.:

Моделирование в механике. — Новосибирск: ВЦ ИТПМ СО АН СССР, 1987. Т. 18. № 6.

6. Альбазаров Б. Ш. Численное моделирование взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой. Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. — Л., 1991.

7. Усков В. Н. Бегущие одномерные волны. Уч. пособие. — СПб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2000.

8. Омельченко А. В., Усков В. Н. Оптимальные ударно-волновые системы. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 6.



С О В Е Р Ш Е Н Н Ы Е М А Ш И Н Ы

Коллективу
Международной академии холода,
президенту МАХ
Бараненко А. В.

Уважаемые юбиляры!

Коллектив ЗАО «БАРРЕНС» шлет Вам сердечный привет и поздравляет Международную академию холода с 20-летним юбилеем!

Ваш труд направлен на развитие холодильной отрасли в России и очень важен для дальнейшего развития и прогресса.

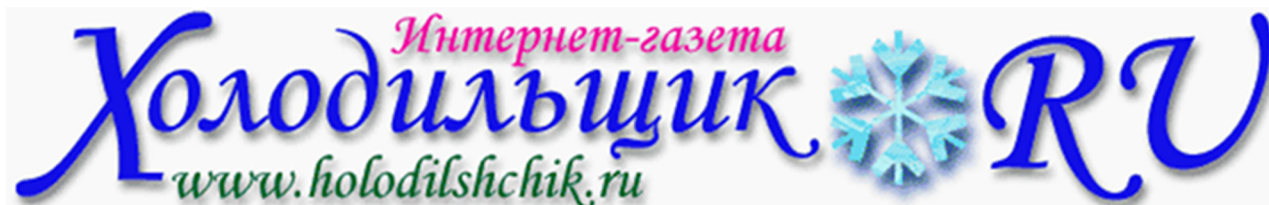
Мы искренне желаем ученым, научным сотрудникам и всем труженикам огромного коллектива Международной академии холода здоровья, прогресса, новых достижений и открытий в технике низких температур и холодильных технологий пищевых производств.

Мы твердо верим, что инновационные достижения в создании бессмазочных компрессоров и в решении проблем уплотнительной техники принесут совместный успех и позволят быть на передовых рубежах науки и техники.

МАХ объединяет и связывает специалистов в области Холода и мы искренне признательны коллективу Академии за ее огромный труд!

Желаем всему коллективу Международной академии холода и ее Президенту Александру Владимировичу Бараненко здоровья, счастья и процветания!

*Генеральный директор ЗАО «БАРРЕНС»
А. В. Захаренко*



Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-20452 от 22 марта 2005 года

ПЕРВАЯ В РОССИИ ИНТЕРНЕТ-ГАЗЕТА ПО ХОЛОДИЛЬНОЙ И БЛИЗКОЙ ЕЙ ТЕМАТИКЕ

- холодильные новости;
- бытовое, торговое и промышленное холодильное оборудование;
- холодильники;
- охладители жидкости (чиллеры);
- оснащение и строительство супермаркетов;
- холодильный транспорт;
- кондиционирование и вентиляция;
- искусственные и природные хладагенты;
- холодильные масла;
- качество пищевых продуктов;
- сервис холодильных систем;
- литература по холодильной и близкой ей тематике;
- модульная, баннерная, видео- и аудиореклама;
- выставки, конференции, семинары;
- обучающие курсы для холодильщиков и многое другое...

**<http://www.holodilshchik.ru> (<http://холодильщик.рф>)
e-mail: info@holodilshchik.ru**