

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕВЕРСИВНОГО ЭЖЕКТОРНОГО УПЛОТНЕНИЯ ВАЛА РОТОРНОЙ МАШИНЫ

Cherepanov A.P.

JUSTIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE REVERSIBLE EJECTOR SHAFT SEAL OF A ROTARY MACHINE

Аннотация. Рассмотрено теоретическое обоснование эффективности реверсивных эжекторных уплотнений валов роторных машин, вентиляторов, печей аэродинамического нагрева, воздуходувок, турбокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов и других нагнетательных машин. Принцип бесконтактного эжекторного уплотнения базируется на комплексе фундаментальных законов гидроаэродинамики и теории пограничного слоя, что обеспечивает её работоспособность и высокую эффективность, особенно в режиме реверсивного вращения и исключаящего трение и искрообразование между уплотнительными поверхностями при работе роторной машины.

Ключевые слова: вал, вакуум, зазор, реверсивное вращение, ротор, уплотнение, управление, эжектор.

Abstract. The theoretical justification of the effectiveness of reversible ejector shaft seals of rotary machines, fans, aerodynamic heating furnaces, blowers, turbochargers of gas pumping units and other injection machines is considered. The principle of non-contact ejector sealing is based on a set of fundamental laws of hydroaerodynamics and boundary layer theory, which ensures its operability and high efficiency, especially in the mode of reversible rotation and eliminating friction and sparking between sealing surfaces during operation of the rotary machine.

Keywords: control, gap, reverse rotation, rotor, seal, shaft, vacuum, ejector.

Эжекторные бесконтактные уплотнения валов роторных машин широко известны, например [1], при создании перепада давления технологических сред с помощью эжектора, однако при этом возможны утечки среды, снижающие эффективность уплотнения, особенно при реверсивной работе машин. Лабиринтное винтовое уплотнение вала роторной машины [2] с образованием каверн образует с корпусом гидравлический тракт в зонах сужения и расширения потока уплотняющей среды с образованием вихрей и турбулизации потока с потерей энергии и увеличением гидравлического сопротивления. Однако, каверны образуются только со стороны нагнетания рабочего колеса, а при изменении направления вращения и со стороны низкого давления уплотнение вала не обеспечивается. Бесконтактные двухступенчатые уплотнения [3] с уравнительными камерами при изменении направления вращения вала так же имеют низкую эффективность и сложную конструкцию.

Бесконтактное эжекторное уплотнение роторной машины при реверсивном вращении вала [4] основано на создании эжектирования при увеличении скорости и развороте потока в направлении от уплотняемого зазора между корпусом и валом. В этом случае образуется каверна, которая способствует пони-

жению давления в зоне ее соприкосновения со стенкой вследствие увеличения скорости за счет уменьшения поперечного сечения потока в этой зоне [5].

Общий вид уплотнения вала роторной машины [4] показан на рисунке 1, вращение вала по часовой стрелке – на рисунке 2, против часовой стрелки – на рисунке 3. Уплотнение содержит кольцевую сужающуюся камеру, которая кольцевым каналом выходит в торцовый зазор между диском рабочего колеса и кожухом. Заборник регуляторами давления соединен с кольцевой камерой правым и левым патрубками. В правой и левой канавках зазора установлены датчики давления и разрежения, соединенные с входом блока управления, а на его выходе - через усилители с управляющими входами регуляторов давления.

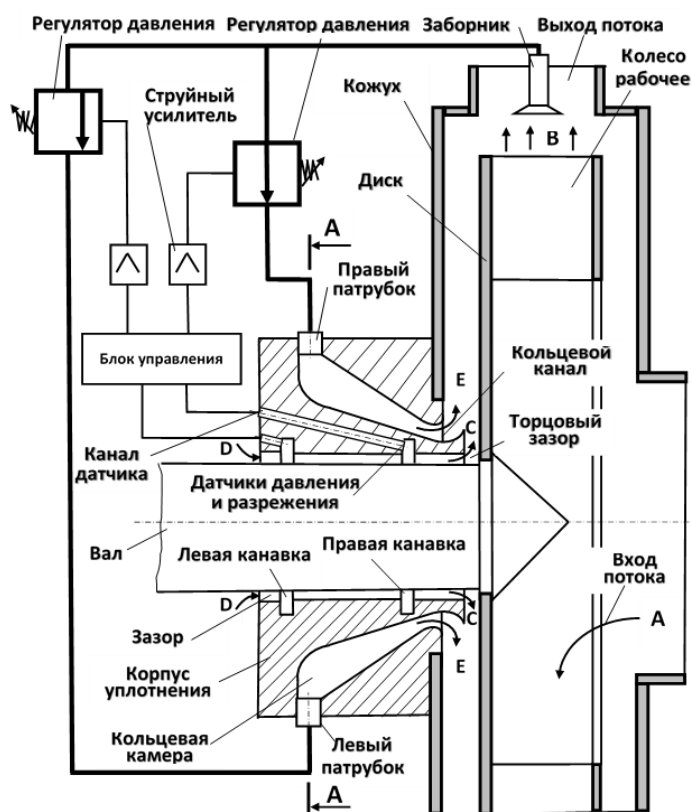


Рисунок 1 - Общий вид уплотнения вала

Стрелками E, C и D показан ход потоков. Направление вращения вала отслеживается блоком управления. Если вал вращается по часовой стрелке, то управляющий сигнал подается на правый регулятор давления, если против часовой стрелки – на левый регулятор давления. При работе роторной машины поток сжимается рабочим колесом и подается потребителю. Часть потока заборником подается на вход регуляторов давления, а с их выходов под давлением подается, либо в правый, либо в левый патрубки кольцевой камеры.

При вращении вала роторной машины по часовой стрелке, поток подается в кольцевую камеру правым регулятором давления (рисунок 1) через правый патрубок, закручивается по часовой стрелке (рисунок 2), сжимается и разворачивается на радиальное направление по стрелке E.

Радиальное движение потока E вызывает эжектирующий эффект в зоне C, где в зазоре между валом и корпусом создается разрежение и подсасывание атмосферного воздуха (стрелка D), противодействующего утечке рабочей среды. Одновременно с этим разрежением в правой канавке, а затем и в левой канавке создаются отрицательные сигналы, которые датчиками разрежения передаются на блок управления и суммируются. Блоком управления через усилитель подается сигнал на частичное перекрытие правого регулятора и снижение

давления в кольцевой камере, вызывающего снижение эжектирующего эффекта в зоне С и перетекание потока из пространства Е в зону С, создавая в ней давление, из-за чего в правой канавке, а затем и в левой канавке создаются положительные сигналы, которые датчиками давления передаются на блок управления и суммируются. Блоком управления через усилитель подается сигнал на частичное открытие правого регулятора на повышение давления в кольцевой камере, которое вновь повышает эжектирующий эффект в зоне С и создает разрежение в зазоре между валом и корпусом, не давая потоку выходить в атмосферу. Если вал роторной машины вращается против часовой стрелки, то поток в кольцевую камеру подается левым регулятором давления через левый патрубок и закручивается против часовой стрелки (рисунок 3), а уплотнение вала осуществляется также, как и при вращении вала по часовой стрелке.

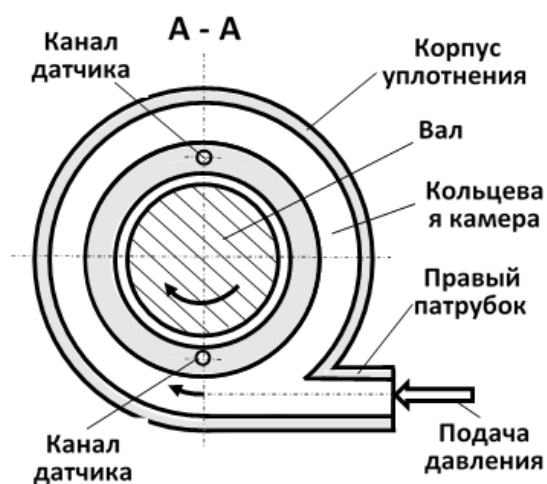


Рисунок 2 - Вращение вала по часовой стрелке

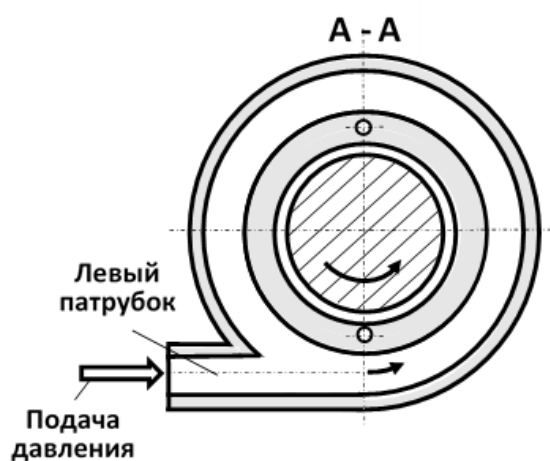


Рисунок 3 - Вращение вала против часовой стрелки

Основой работы устройства является эффект эжекции — передача кинетической энергии от более быстрого потока к более медленному. Согласно уравнению Бернулли для идеальной жидкости (с пренебрежимо малыми потерями):

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const}$$

где p — статическое давление; v — скорость потока; ρgh — гидростатическое давление.

Перепады давления, создаваемые эжектором и центробежными силами, составляют малую величину, поэтому в газодинамике уплотнений членом уравнения ρgh принимают равным нулю, так как сила тяжести незначительно влияет на движение газа в малых радиальных зазорах по сравнению с силами давления и инерции. В предложенной конструкции при вращении вала поток рабочей среды подается в сужающуюся кольцевую камеру. Уменьшение поперечно-

го сечения канала (сопло Лавалю рисунок 1) приводит к увеличению скорости потока (v) и, как следствие, к локальному падению статического давления в зоне зазора между валом и корпусом (зона С на рисунке 1). Создаваемое разрежение является движущей силой для подсасывания атмосферного воздуха (стрелка D), который формирует противодействие и блокирует утечку рабочей среды. Теоретически, чем выше скорость вращения вала, тем больше перепад давления и тем эффективнее уплотнение.

При турбулизации и диссипации энергии (второе начало термодинамики) в отличие от ламинарного течения в гладких щелях, каверны, выполненные на поверхности вала, и изменение направления потока вызывают образование вихрей, а каверна работает как микродиффузор, где происходит срыв пограничного слоя. Необратимые потери энергии: кинетическая энергия упорядоченного движения переходит в тепловую энергию хаотического движения молекул. Согласно II-му началу термодинамики, энтропия системы возрастает, что эквивалентно значительному увеличению гидравлического сопротивления уплотнительного тракта. Высокое сопротивление снижает расход утечек. Перемычки между кавернами при вращении вала действуют подобно лопаткам центробежного насоса вызывают центробежный эффект. Возникающие центробежные силы отбрасывают частицы рабочей среды радиально наружу, от вала к корпусу. Это создает дополнительное гидростатическое давление на стенки канала, что способствует «запиранию» зазора и препятствует осевому перетеканию газа. Этот эффект математически описывается через центробежное ускорение:

$$a = \omega^2 \cdot r,$$

где ω — угловая скорость, r — радиус вала.

Как известно, классические винтовые и лабиринтные уплотнения [2, 3] асимметричны и теряют эффективность при смене направления вращения.

Предложенное решение использует симметричную конструкцию с активным управлением:

- Датчики давления/разрежения в правой и левой канавках фиксируют градиент давления, возникающий из-за направления вращения.
- Блок управления (система отрицательной обратной связи) подает сигнал на тот регулятор давления, который соответствует текущему направлению вращения.
- Теоретически это позволяет динамически перестраивать конфигурацию потока: эжектор всегда работает «вслед» за валом, поддерживая зону разрежения именно с той стороны, откуда ожидается утечка. Это обеспечивает инвариантность эффективности уплотнения от направления вращения.

Трение и искры возникают при механическом контакте поверхностей в контактных уплотнениях (сальники, торцевые уплотнения).

В данной конструкции радиальный зазор между валом и корпусом сохраняется всегда. Физический контакт отсутствует, так как герметизация достига-

ется не силой сжатия упругого элемента, а аэродинамической силой потока. Следовательно, теоретически исключены:

- Механический износ (закон Гука — упругие деформации не задействованы в работе уплотнения).
- Тепловыделение от трения.
- Искрообразование (что критически важно для взрывоопасных сред).

Разработанное эжекторное уплотнение представляет собой активную аэродинамическую систему с самоадаптацией.

Теоретически работа бесконтактного эжекторного уплотнения [4] базируется на синтезе эжекционного эффекта (уравнение Бернулли), турбулизации пограничного слоя (увеличение энтропии), центробежного нагнетания и принципов автоматического управления. Такой подход позволяет преодолеть фундаментальный недостаток всех известных бесконтактных уплотнений — зависимость эффективности от направления вращения вала — и одновременно обеспечивает абсолютную механическую безызносность.

Предложенное бесконтактное эжекторное уплотнение дает возможность обеспечить эффективность уплотнения при изменении направления вращения вала, исключает трение и искрообразование между поверхностями герметизируемого канала при работе роторной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Скаскевич А.А.** Основы герметологии: тексты лекций / А.А. Скаскевич, В.А. Струк. — Гродно: ГрГУ, 2010. — 140 с. ISBN 978-985-515-359-8.

2. **Патент № 2129670 Российская Федерация, МПК F04D 29/08, F16J 15/44 (1995.01).** Бесконтактное уплотнение вала : №97106260/06 : заявл. 17.04.1997 :опубл. 27.04.1999 / Голубев Г.А., Добрынин А.Н., Дюжев Г.С. и др. ; заявитель НПЭЭнергомаш им. акад.В.П.Глушко. — 4 с. : ил. — Текст : непосредственный.

3. **Патент № 2357106 Российская Федерация, МПК F04D 29/10 (2006.01).** Система уплотнений турбокомпрессора : № 2007144403/06 : заявл. 29.11.2007: опубл. 27.05.2009 / Пшик В.Р., Емельяненко Е.И., Харин М.Ю. и др. ; заявительОАО "Сумское машиностроительное научно-производственное объединение имени М.В. Фрунзе". — 7 с. : ил. — Текст : непосредственный.

4. **Патент № 2808544 Российская Федерация, МПК F04D 29/10 (2006.01).** Способ бесконтактного эжекторного уплотнения вала роторной машины и устройство для его осуществления : № 2023114892 : заявл. 06.06.2023 : опубл. 29.11.2023 / Черепанов А.П. ; заявитель АНГТУ. — 12 с. : ил. — Текст : непосредственный.

5. **Чупраков Ю.И.** Гидропривод и средства гидроавтоматики: Учебное пособие для вузов по специальности «Гидропривод и гидроавтоматика». М.: Машиностроение, 1979 - 232 с.: ил. — Текст : непосредственный.