

Торцевые уплотнения вала насосов Grundfos



Торцевые уплотнения вала насосов Grundfos

Copyright 2009 GRUNDFOS Management A/S. Все права защищены.

Данные материалы защищены законом об авторском праве и международными договорами. Никакая часть данных материалов не может воспроизводиться в какой-либо форме или какими-либо способами без предварительного письменного разрешения на то GRUNDFOS Management A/S.

Оговорка об отказе от ответственности

Были приняты все разумные меры для обеспечения точности информации, содержащейся в настоящих материалах. Тем не менее, GRUNDFOS Management A/S не несет ответственности за какие-либо убытки, независимо от того, прямые, косвенные, побочные или последующие, возникающие вследствие использования какой-либо информации, содержащейся в материалах, или в силу принятия такой информации за основу.

Первое издание
Наборщик: Gills Illustrations Services
Печать: Scanprint A/S

Содержание

Вступление	5
Глава 1. Введение	7
1. Типы уплотнений вала	8
2. Торцевое уплотнение вала	10
3. Принцип работы	12
4. История развития	22
Глава 2. Типы торцевых уплотнений вала и системы уплотнения	25
1. Типы торцевых уплотнений вала	26
2. Системы уплотнения	31
3. Выбор торцевого уплотнения вала	42
Глава 3. Материалы	45
1. Материалы уплотнения	46
2. Пары материалов уплотнения	51
3. Испытание уплотнений вала	55
4. Вторичные уплотнения	59
5. Материалы других компонентов уплотнения вала	61
Глава 4. Трибология – наука о трении, износе и смазке поверхностей	63
1. Смазка	65
2. Износ	72
Глава 5. Повреждения торцевых уплотнений вала	75
1. Введение	76
2. Повреждения вследствие отсутствия смазки	77
3. Повреждения вследствие загрязнения	78
4. Повреждения вследствие химического и физического воздействия	80
5. Повреждения вследствие неправильной установки	84
6. Повреждения вследствие изменения условий работы	86
7. Анализ повреждений уплотнения вала	88
Глава 6. Стандарты и сертификаты	93
1. Европейский стандарт EN 12756	94
2. Сертификаты	97

Вступление

Технология и ее применение в нашей продукции является основой успеха компании Grundfos. Так было с самого начала существования компании Grundfos, и так будет в будущем.

Для большинства насосов главным элементом, обеспечивающим качество насоса в течение всего срока его службы, является хорошее и надежное уплотнение вала. Компания Grundfos обладает многолетним опытом в области разработки, производства и использования торцевых уплотнений вала в насосах, и наши решения в этой области вносят существенный вклад в обеспечение нашей ведущей позиции в области технологии производства насосов.

Я рад представить вам эту книгу, которую я рекомендую использовать в нашей организации. Готовясь к будущему и работая вместе, важно, чтобы мы системно использовали накопленные знания, которые теперь изложены в данной книге.

Наслаждайтесь чтением!

Карстен Бьерг
Президент Концерна Grundfos

Глава 1

Введение



1. Типы уплотнений вала
2. Торцевые уплотнения вала
3. Принцип работы
4. История развития

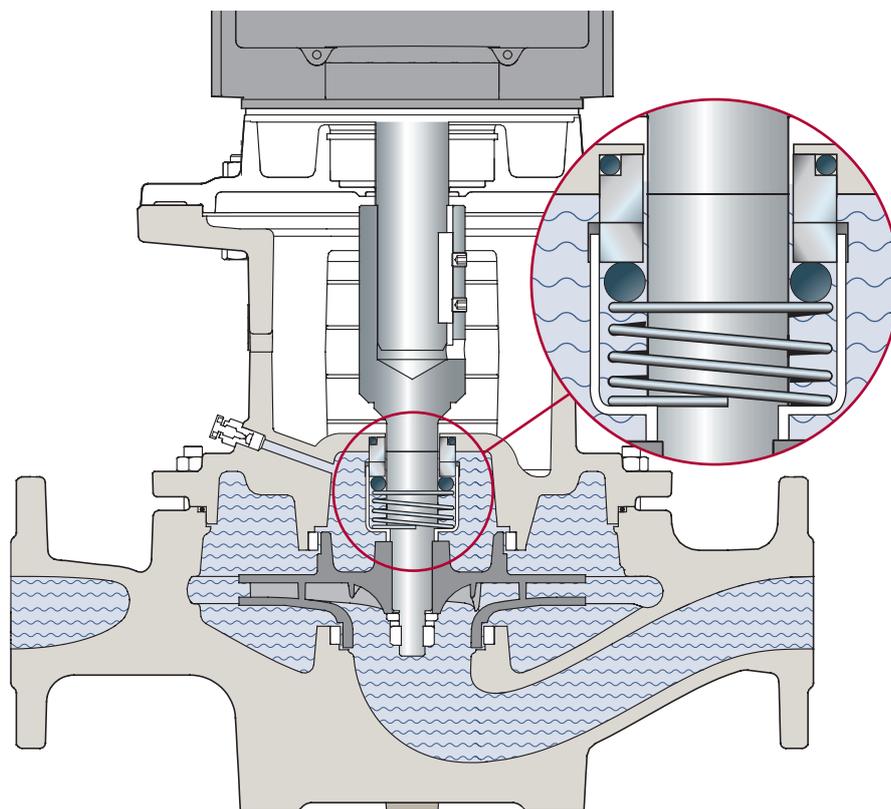


Рис.1.1. Положение уплотнения вала в насосе

1. Типы уплотнений вала.

Центробежный насос со сквозным валом не полностью герметизирован. Поэтому основная задача, которую необходимо решить всей отрасли по производству насосов, состоит в минимизации утечки перекачиваемой жидкости из рабочей полости насоса.

Практически всегда в центробежных насосах с вращающимися валами предусматривается уплотнение вала. Уплотнение вала является барьером между внутренней частью насоса и атмосферой.

Существует бесчисленное количество вариантов уплотнений вала, отражающих многообразие типов насосов и необходимость в конкретных решениях для конкретных ситуаций. Наиболее часто уплотнение вала включает в себя вращающуюся и неподвижную часть. При правильной конструкции насоса и соблюдении условий установки вращающаяся часть движется по смазочной пленке толщиной всего 0,00025 мм. Если пленка становится значительно толще, происходит утечка перекачиваемой жидкости. Если пленка становится значительно тоньше, возрастают потери на трение, контактные поверхности перегреваются, что приводит к износу поверхностей уплотнения и нарушению герметизации.

Состояние уплотнения оказывает огромное влияние на рабочие характеристики насоса. При правильной эксплуатации уплотнение остается незаметным. Но как только оно начнет протекать, это не замедлит сказаться либо на работе насоса, либо на состоянии окружающей среды. Поэтому важность уплотнения вала никогда нельзя недооценивать при проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании насоса.

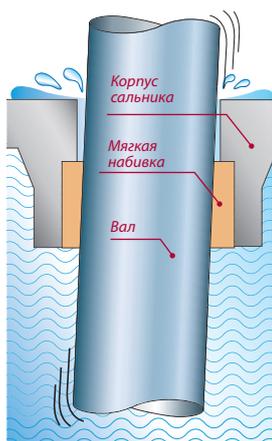


Рис.1.2. Плетеная набивка сальника в корпусе

Сальниковое уплотнение

Сальниковое уплотнение с плетеной набивкой является простейшим типом уплотнения вала. Прокладка помещается между валом и корпусом насоса.

На рис. 1.2 представлено сальниковое уплотнение в корпусе. В корпусе сальникового уплотнения мягкое прокладочное кольцо сжимается в осевом направлении, пока оно не соприкоснется с валом. При незначительном износе мягкой набивки, сальниковое уплотнение необходимо снова сжать, чтобы предотвратить утечку.

Вибрации и неправильное относительное расположение компонентов приведут к протечке этого типа уплотнения.

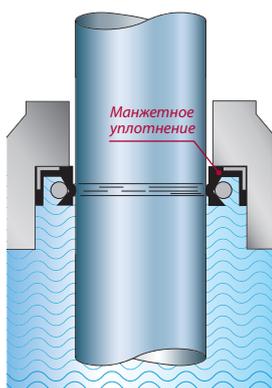


Рис.1.3. Манжетное уплотнение

Манжетное уплотнение

Универсальный тип манжетного уплотнения представляет собой резиновое кольцо, скользящее вплотную к валу (см. рис. 1.3). Этот тип уплотнения в основном используется в случае небольшого перепада давлений и низкой скорости вращения.

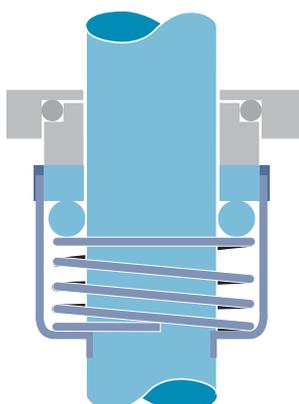


Рис.1.4. Торцевое уплотнение вала

■ Неподвижная ■ Вращающаяся

Торцевое уплотнение вала

Торцевое уплотнение вала состоит из вращающейся и неподвижной частей (см. рис. 1.4).

Вращающаяся часть прижимается в осевом направлении к неподвижной части.

Далее мы подробно рассмотрим множество конструктивных исполнений и вариантов применения торцевого уплотнения вала.

2. Торцевое уплотнение вала.

В этом разделе кратко описаны конструкция и элементы торцевого уплотнения вала.

Как было указано выше, конструкция центробежного насоса со сквозным валом не исключает протечек. Торцевое уплотнение вала, по сути, представляет собой дроссель, смонтированный на валу. Оно сводит к минимуму вероятность утечки из рабочей полости насоса. Чтобы снизить вероятность утечки, зазор между неподвижной и вращающейся частями уплотнения должен быть небольшим.

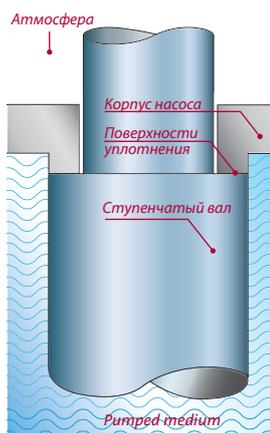


Рис.1.5. Две соосные поверхности, действующие в качестве уплотнения вала

Торцевое уплотнение вала с двумя соосными поверхностями уплотнения.

Наилучший способ создания уплотнения с минимальным зазором и, соответственно, минимальными утечками заключается в прижатии двух соосных поверхностей друг к другу.

Таковыми поверхностями могут являться ступенчатый вал, прижатый к плоской поверхности корпуса насоса (см. рис. 1.5).

При этом вал и корпус насоса должны быть высокоустойчивыми к износу и хорошо выровненными.

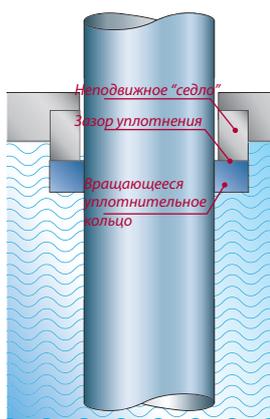


Рис.1.6. Торцевое уплотнение вала с вращающимся уплотнительным кольцом и неподвижным "седлом"

Торцевое уплотнение вала с вращающимся уплотнительным кольцом и неподвижным "седлом".

Более практичное решение – установка вращающегося уплотнительного кольца на вал и неподвижного уплотнительного кольца ("седла") в корпус насоса (см. рис. 1.6). Небольшое пространство между поверхностями уплотнения называется зазором уплотнения.

Данная конструкция позволяет использовать различные материалы для изготовления вращающейся и неподвижной частей уплотнения в зависимости от условий применения.

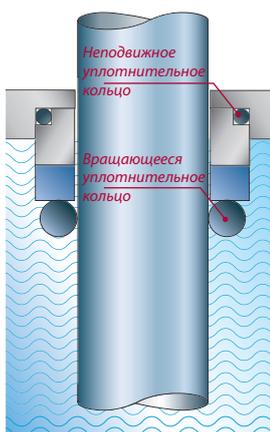


Рис.1.7. Вторичные уплотнения ограничивают утечку

Вторичные уплотнения в составе торцевого уплотнения.

Вторичные уплотнения представляют собой резиновые детали, например, кольцевые уплотнения или компенсаторы, используемые для того, чтобы предотвратить утечку между валом и вращающимся уплотнительным кольцом, а также между неподвижным "седлом" и корпусом насоса (см.рис.1.7).

Чтобы свести утечку к минимуму, вращающееся уплотнительное кольцо должно быть плотно прижато к "седлу". Соответственно, необходимо, чтобы вращающееся уплотнительное кольцо могло перемещаться по оси вала. Для обеспечения осевой гибкости вторичным уплотнением должен быть либо компенсатор, либо кольцевое уплотнение, скользящее по валу.

Вторичное уплотнение, обеспечивающее герметизацию между вращающимся уплотнительным кольцом и валом, вращается вместе с валом. Вторичное уплотнение, обеспечивающее герметизацию между "седлом" и корпусом насоса, неподвижно.

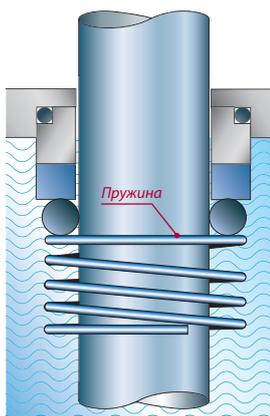


Рис.1.8. Пружина прижимает вращающуюся часть к неподвижному "седлу"

Пружина в составе торцевого уплотнения

Вращающаяся пружина прижимает вращающуюся часть уплотнения к "седлу" и вращающееся уплотнительное кольцо к валу (см. рис. 1.8).

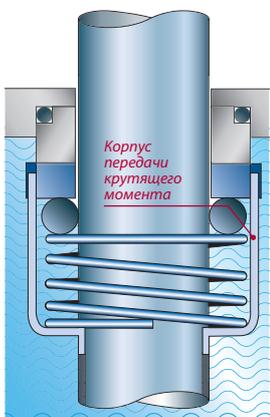


Рис.1.9. Корпус передачи крутящего момента дополняет торцевое уплотнение вала

Корпус передачи крутящего момента

Корпус передачи крутящего момента обеспечивает вращение вращающейся части уплотнения вместе с валом (см. рис. 1.9).

Итак, мы рассмотрели все детали торцевого уплотнения вала.

3. Принцип работы торцевого уплотнения.

В данном разделе описан механизм образования смазочной пленки в зазоре торцевого сильфонного уплотнения вала с жидкой смазкой. При этом конструкция немного отличается от уплотнения, представленного на рис. 1.9.

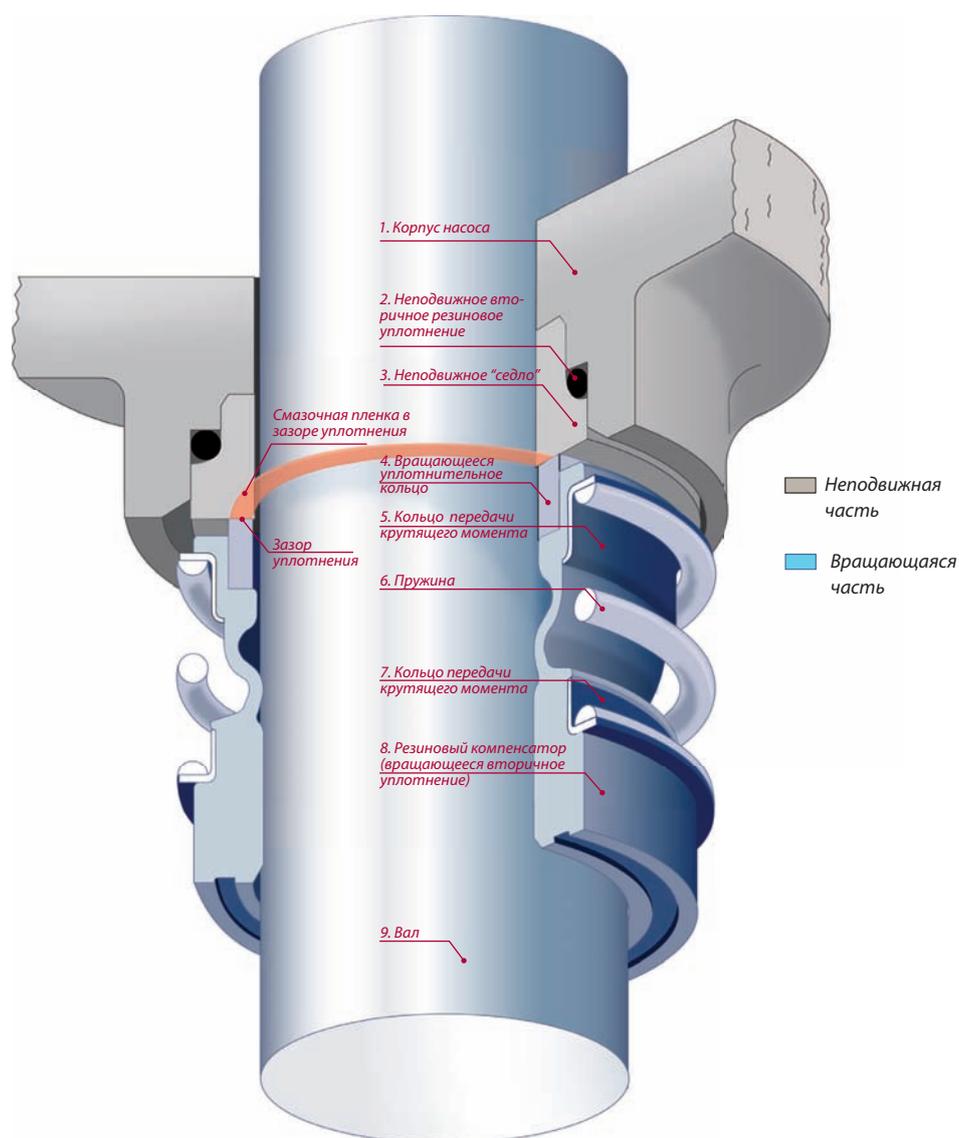


Рис. 1.10: Торцевое сильфонное уплотнение вала

Вращающаяся часть

Вращающаяся часть уплотнения установлена на валу насоса и вращается в жидкости во время работы насоса.

Сжатие резинового компенсатора (8) между валом (9) и одним из двух колец передачи крутящего момента (7) фиксирует вращающуюся часть на валу (см. рис. 1.10).

Пружина (6) передает крутящий момент между кольцами передачи крутящего момента (7 и 5). Вращающееся уплотнительное кольцо (4) устанавливается вместе с резиновым компенсатором (8). Кольцо передачи крутящего момента (5) прижимает резиновый компенсатор (8) к вращающемуся кольцу уплотнения (4). Резиновый компенсатор предотвращает утечку между валом (9) и вращающимся кольцом уплотнения (4) и обеспечивает осевую гибкость, несмотря на загрязнения и отложения.

В резиновом сильфонном уплотнении, представленном на рис. 1.10, осевая гибкость достигается за счет упругой деформации компенсатора. При этом в уплотнении, представленном на рис. 1.9, уплотнительное кольцо скользит вдоль вала.

Сжимающее усилие пружины удерживает две поверхности уплотнения вместе во время простоя и работы насоса благодаря упругости компенсатора (рис.1.10) или уплотнительного кольца (рис.1.9). За счет этой упругости поверхности уплотнения также удерживаются вместе, несмотря на осевые движения вала, износ поверхности и отклонения вала.

Неподвижная часть

Неподвижная часть уплотнения устанавливается в корпусе насоса (1). Она состоит из неподвижного "седла" (3) и неподвижного вторичного резинового уплотнения (2).

Вторичное уплотнение предотвращает утечку между неподвижным седлом (3) и корпусом насоса (1). Оно также предупреждает вращение "седла" в корпусе насоса. Перекачиваемая среда (A), утечку которой необходимо предотвратить, обычно контактирует с внешней кромкой вращающегося кольца уплотнения (B) (см. рис. 1.11). Когда вал начинает вращаться, разница давлений между перекачиваемой средой (A) в корпусе насоса и в атмосфере (D) заставляет среду проникать в зазор уплотнения между двумя плоскими вращающимися поверхностями. Образуется смазочная пленка.

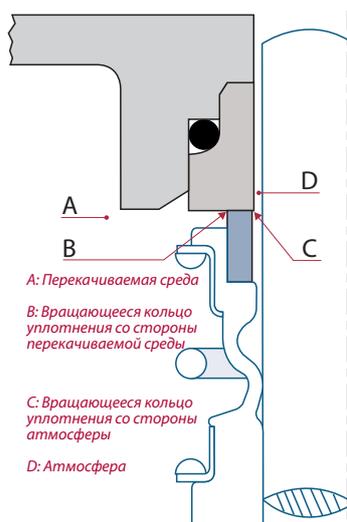


Рис. 1.11: Обозначение положений зазора уплотнения

При этом давление в зазоре уплотнения уменьшается со значения на поверхности (B) до значения на поверхности (C), достигая давления в атмосфере (D). Утечка через уплотнение появится на поверхности (C). Давление на поверхности (B) точно такое же, как и давление жидкости (A). Снижение давления в зазоре уплотнения во время простоя насоса представлено на рис. 1.12а. Замыкающее усилие поддерживается только за счет прямого соприкосновения поверхностей уплотнения.

Размыкающее усилие, вызываемое давлением в смазочной пленке, представлено красными стрелками на рис. 1.13b и 1.14b.

Части уплотнения внутри насоса подвергаются воздействию силы, возникающей от воздействия давления внутри насоса. Осевая составляющая этой силы вместе с силой сжатия пружины создает замыкающее усилие уплотнения.

Во время простоя насоса давление на внешней кромке кольца (B) равно давлению в системе (A) (см. рис. 1.12а).

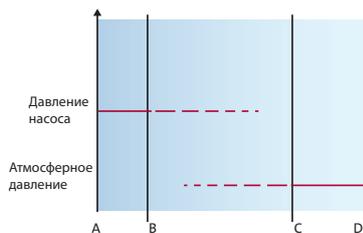


Рис. 1.12а: Давление в состоянии простоя соответствует либо давлению в системе, либо атмосферному давлению

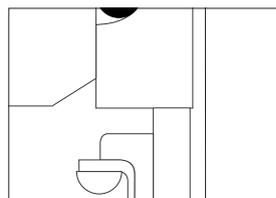


Рис. 1.12 b: В состоянии простоя имеет место только прямой контакт между поверхностями уплотнения

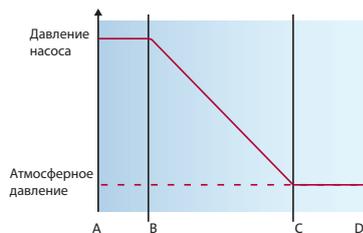


Рис. 1.13а: Распределение гидростатического давления для уплотнения с параллельными поверхностями уплотнения

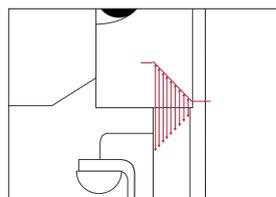


Рис. 1.13 b: Размыкающее усилие, возникающее из распределения гидростатического давления

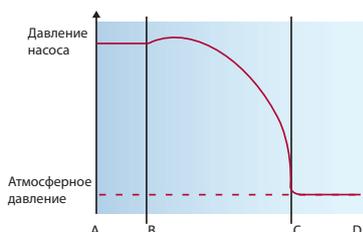


Рис. 1.14а: Распределение давлений в зазоре уплотнения при суммировании гидростатического и гидродинамического давлений

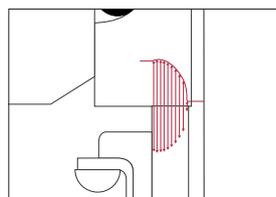


Рис. 1.14 b: Размыкающее усилие, возникающее из распределения комбинированного гидростатического и гидродинамического давления

Когда вал начинает вращаться, кольца уплотнения расходятся, и перекачиваемая среда попадет в зазор уплотнения. Давление линейно снижается от давления насоса (B) до атмосферного давления (C) (см. рис. 1.13а).

Примечание: В данной книге давление насоса означает давление в камере уплотнения.

Линейно понижающееся давление известно как гидростатическое давление в зазоре уплотнения. Размыкающее усилие представлено красными стрелками на рис. 1.13b.

Во время работы насоса (см. рис. 1.14а) давление в смазочной пленке растет. Это похоже на автомобиль, скользящий на мокрой дороге. Такое давление называется гидродинамическим давлением в зазоре уплотнения.

В сочетании с гидродинамическим, гидростатическое давление обеспечивает распределение давлений в зазоре уплотнения. Размыкающее усилие представлено красными стрелками на рис. 1.14b.

Смазка полной жидкой пленкой обеспечивается, если давление в зазоре уплотнения достаточно высокое для того, чтобы компенсировать замыкающее усилие уплотнения.

Замыкающее усилие

Части уплотнения внутри насоса подвергаются действию осевого усилия, возникающего от давления перекачиваемой среды. Вместе с силой сжатия пружины осевое усилие создает замыкающее усилие, действующее на поверхности уплотнения.

Если разность давлений в перекачиваемой среде и в атмосфере больше приблизительно 20 бар, замыкающее усилие становится таким сильным, что предупреждает образование достаточной гидродинамической смазочной пленки. Поверхности уплотнения начинают изнашиваться. Износа можно избежать, уменьшив площадь, на которой гидравлическое давление влияет на осевое усилие, действующее на уплотнение вала. Гидравлическое усилие, действующее на поверхности первичного уплотнения, а также замыкающее усилие уплотнения уменьшаются.

Несбалансированные и сбалансированные торцевые уплотнения вала

Коэффициент балансировки k представляет собой отношение между гидравлически нагруженной площадью A_h и площадью поверхности скольжения A_s .

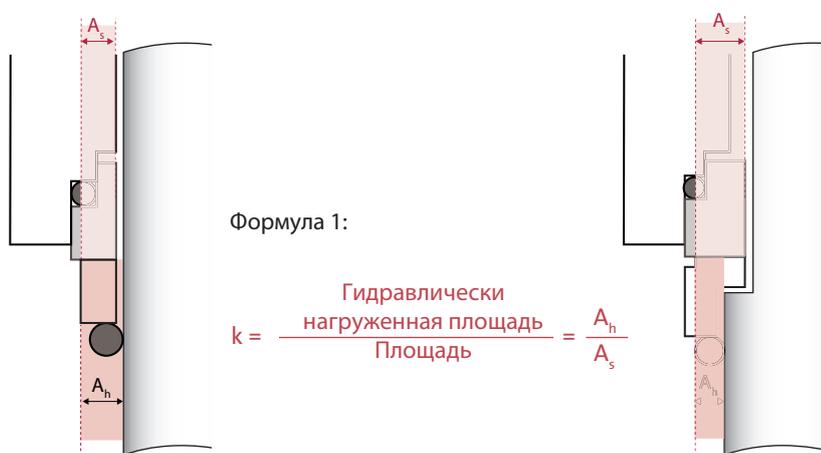


Рис. 1.15а: Несбалансированное уплотнение вала, $k > 1$

Рис. 1.15б: Сбалансированное уплотнение вала, $k < 1$

Давление насоса, действующее на площадь A_h , ведет к тому, что замыкающее усилие действует на уплотнение. Площадь A_h несбалансированного торцевого уплотнения вала больше площади A_s , а коэффициент балансировки k больше 1. Давление в зоне контакта на площади поверхности скольжения превышает давление перекачиваемой среды.

Сила сжатия пружины дополнительно повышает давление в зоне контакта.

Выбранный коэффициент балансировки часто составляет около 1,2.

В пределах низких давлений перекачиваемой среды несбалансированные торцевые уплотнения вала являются достаточными (см. рис. 1.15а).

Площадь A_h сбалансированного торцевого уплотнения вала меньше площади A_s , а коэффициент балансировки k меньше 1. Площадь A_h можно уменьшить, сократив диаметр вала со стороны атмосферы (см. рис. 1.15б).

В пределах высоких давлений перекачиваемой среды или при работе с высокой скоростью используется сбалансированное торцевое уплотнение вала. Давление в зоне контакта на площади поверхности скольжения может быть меньше давления перекачиваемой среды. Выбранный коэффициент балансировки часто составляет около 0,8.

Балансировка торцевого уплотнения вала позволяет получить более толстый слой смазывающей пленки в зазоре уплотнения.

Низкое значение коэффициента k может быть причиной повышения степени утечки или даже привести к размыканию поверхностей уплотнения.

Пример расчета несбалансированного и сбалансированного уплотнения вала

В этом примере мы рассмотрим расчет замыкающего усилия (F_c) торцевого уплотнения вала с жидкой смазкой.

Расчет для несбалансированного торцевого уплотнения вала Grundfos типа А. Более подробную информацию об этом типе уплотнения вала см. в главе 2, тип А (стр. 26).

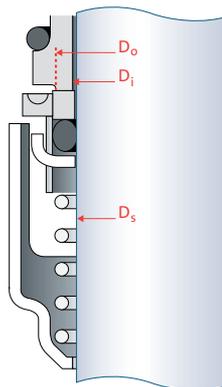


Рис. 1.16: Несбалансированное уплотнение вала Grundfos типа А

Исходные данные:

Диаметр вала, $D_s = 16$ мм

Скользкая поверхность уплотнения, внутренний диаметр, $D_i = 17$ мм

Скользкая поверхность уплотнения, наружный диаметр, $D_o = 22$ мм

Сила сжатия пружины, $F_s = 45$ Н

Для этих данных получают следующие результаты:

Гидравлически нагруженная площадь:

$$A_h = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_s^2) = \frac{\pi}{4} (22^2 - 16^2) = 179 \text{ мм}^2$$

Площадь поверхности скольжения:

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (22^2 - 17^2) = 153 \text{ мм}^2$$

Коэффициент балансировки в соответствии с формулой 1 на странице 15:

$$k = \frac{A_h}{A_s} = \frac{179}{153} = 1.17$$

Замыкающее усилие F_c при давлении 10 бар (1 МПа):

$$F_c = A_h \times P + F_s = 179 \text{ мм}^2 \times 1 \text{ МПа} + 45 \text{ Н} = 224 \text{ Н}$$

Расчет для сбалансированного уплотнения вала Grundfos типа Н для вала диаметром 16:

Диаметр муфты, $D_s = 17,1$ мм

Скользкая поверхность уплотнения, внутренний диаметр, $D_i = 17$ мм

Скользкая поверхность уплотнения, наружный диаметр, $D_o = 22$ мм

Сила сжатия пружины, $F_s = 45$ Н

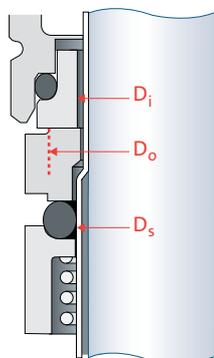


Рис. 1.17: Сбалансированное уплотнение вала Grundfos типа Н

Гидравлически нагруженная площадь:

$$A_h = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_s^2) = \frac{\pi}{4} (22^2 - 17.1^2) = 150 \text{ мм}^2$$

Площадь поверхности скольжения:

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (22^2 - 17^2) = 153 \text{ мм}^2$$

Коэффициент балансировки:

$$k = \frac{A_h}{A_s} = \frac{150}{153} = 0.98$$

Замыкающее усилие F_c при давлении $P = 10$ бар (1 МПа):

$$F_c = A_h \times P + F_s = 150 \text{ мм}^2 \times 1 \text{ МПа} + 45 \text{ Н} = 195 \text{ Н}$$

В представленных выше примерах, где площади поверхностей скольжения и силы сжатия пружины равны, замыкающее усилие уменьшено с 224 Н до 195 Н путем уменьшения коэффициента балансировки с $k = 1,17$ до $k = 0,98$. Меньшее замыкающее усилие обеспечивает меньший износ поверхностей скольжения, так как достигается улучшенная смазка. В результате, степень утечки также увеличивается.

Утечка

Смазочная пленка, образованная в зазоре уплотнения во время работы насоса, приводит к тому, что некоторое количество перекачиваемой среды просачивается в сторону атмосферы. Если торцевое уплотнение функционирует надлежащим образом, и жидкость не просачивается, это означает, что смазочная пленка испарилась под действием тепла, и давление в зазоре уплотнения понизилось. Соответственно, жидкость не просачивается через уплотнение.

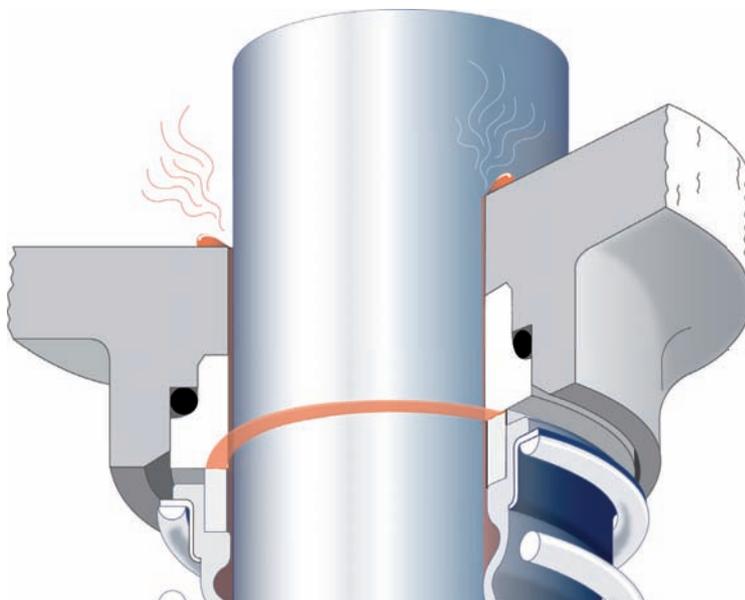


Рис.1.18. Уплотнение с избыточной утечкой

Обратите внимание на то, что вода может испаряться при температурах ниже 100°C, если окружающая атмосфера не насыщена парами. Наглядный пример - сушка одежды на бельевой веревке на улице.

Степень утечки через торцевое уплотнение вала зависит от следующих факторов:

- чистоты поверхностей уплотнения;
- степени неровности поверхностей уплотнения;
- вибрации и стабильности работы насоса;
- скорости вращения;
- диаметра вала;
- температуры, вязкости и типа перекачиваемой жидкости;
- давления насоса;
- правильности монтажа уплотнения.

Расчет скорости утечки

Скорость утечки торцевого уплотнения вала с жидкой смазкой и параллельными поверхностями уплотнения через зазор уплотнения рассчитывается с помощью следующей формулы:

Формула 2:
$$Q = \frac{\pi \times R_m \times h^3 \times \Delta p}{6 \times \eta \times b}$$

где

Q = скорость утечки

R_m = средний радиус поверхности скольжения

h = высота зазора между поверхностями скольжения (толщина смазочной пленки)

Δp = перепад давлений, при котором необходимо обеспечить герметизацию

η = динамическая вязкость перекачиваемой жидкости

b = радиальное удлинение зазора уплотнения (ширина поверхности скольжения).

Скорость утечки Q, таким образом, зависит от радиуса R_m, ширины поверхности скольжения b и перепада давлений Δp. При этом очень важна высота зазора h. Обратите внимание на то, что увеличение высоты в два раза приводит к восьмикратному увеличению утечки, в то время как все остальные условия остаются такими же.

Как следует из формулы 2, утечка уменьшается при увеличении вязкости η. Но с увеличением вязкости увеличивается и толщина смазочной пленки и, соответственно, зазор уплотнения, что может привести к увеличению степени утечки. Зависимость между увеличением высоты зазора уплотнения и увеличением вязкости не является линейной. Поэтому сложно предсказать, приведет ли увеличение вязкости к увеличению или уменьшению степени утечки.

Чистота и соосность двух поверхностей скольжения влияет на высоту зазора уплотнения и, соответственно, на утечку. Гидродинамическое давление повышается с увеличением скорости вращения. Это может привести к увеличению высоты зазора и, соответственно, скорости утечки.

Высота зазора между поверхностями скольжения в 0,2 мкм является типичной для торцевого уплотнения вала, работающего в воде. Следовательно, поверхности уплотнения должны быть очень гладкими и плоскими.

Представленный ниже пример расчета произведен для уплотнения Grundfos типа H, работающего в воде при температуре 20°C и давлении 10 бар. Предполагается, что высота зазора уплотнения составляет 0,2 мкм.

$$\Delta p = 10 \text{ бар} = 1 \text{ МПа} = 1 \times 10^6 \text{ Н/м}^2$$

$$D_o = 22 \text{ мм}$$

$$D_i = 17 \text{ мм}$$

$$\text{Вязкость} = 1 \text{ сСт} = 0.001 \text{ Н} \times \text{с/м}^2$$

$$h = 0,0002 \text{ мм} = 0,2 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Таким образом, $R_m = \frac{(22 + 17)}{4} = 9.75 \text{ мм}$ и $b = \frac{(22 - 17)}{2} = 2.5 \text{ мм}$

Используя формулу 2, получаем следующее значение скорости утечки Q:

$$Q = \frac{\pi \times 9.75 \times 10^{-3} \text{ м} \times (0.2 \times 10^{-6} \text{ м})^3 \times 1 \times 10^6 \text{ Н/м}^2}{6 \times 0.001 \text{ Н} \times \text{с/м}^2 \times 2.5 \times 10^{-3} \text{ м}} = 1.63 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с} = 0.06 \text{ мл/ч}$$

При большей неровности поверхностей уплотнения, приводящей к увеличению высоты зазора уплотнения до 0,3 мкм, степень утечки составляет 0,2 мл/ч.

Непараллельные поверхности уплотнения

На практике поверхности уплотнения деформируются под действием перепадов температур и давлений. Наиболее типичным вариантом деформации является скошенная поверхность уплотнения.

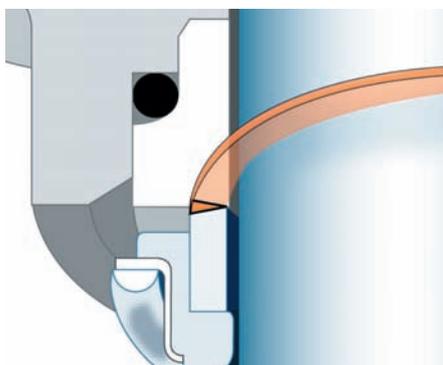


Рис.1.19. Сходящийся зазор уплотнения

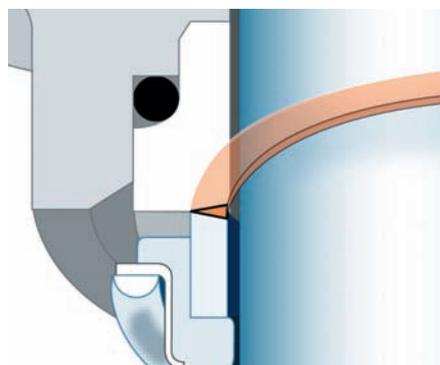


Рис.1.20. Расходящийся зазор уплотнения

Для непараллельных поверхностей уплотнения гидростатическое давление уже не уменьшается линейно от значения на стороне насоса до значения на стороне атмосферы. В этом случае формула 2 не применима для расчета скорости утечки.

Сходящийся зазор уплотнения

Когда зазор уплотнения раскрывается в сторону перекачиваемой среды (см. рис. 1.19), гидростатическое давление повышается. Такой зазор называют сходящимся зазором уплотнения. Он представлен голубой кривой на рис. 1.21.

Расходящийся зазор уплотнения

Когда зазор уплотнения раскрывается в сторону атмосферы (см. рис. 1.20), гидростатическое давление понижается. Такой зазор называют расходящимся зазором уплотнения. Он представлен оранжевой кривой на рис. 1.21.

Распределение давлений в зазоре уплотнения достигается путем сложения гидростатического и гидродинамического давлений. Это показано на рис. 1.22. Обратите внимание на сходство с рис. 1.14а на стр. 14.

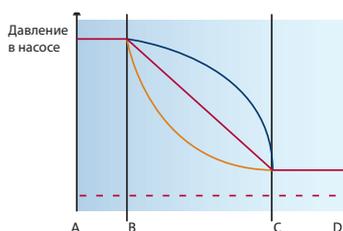


Рис. 1.21: Распределение гидростатического давления для различных геометрий зазора уплотнения

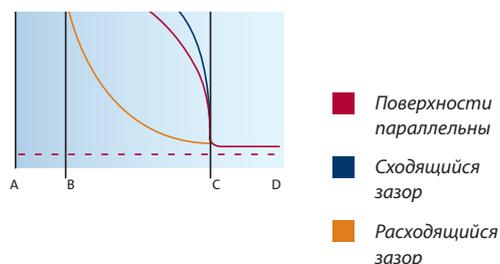


Рис. 1.22: Распределение гидростатического и гидродинамического давлений для различных геометрий зазора уплотнения

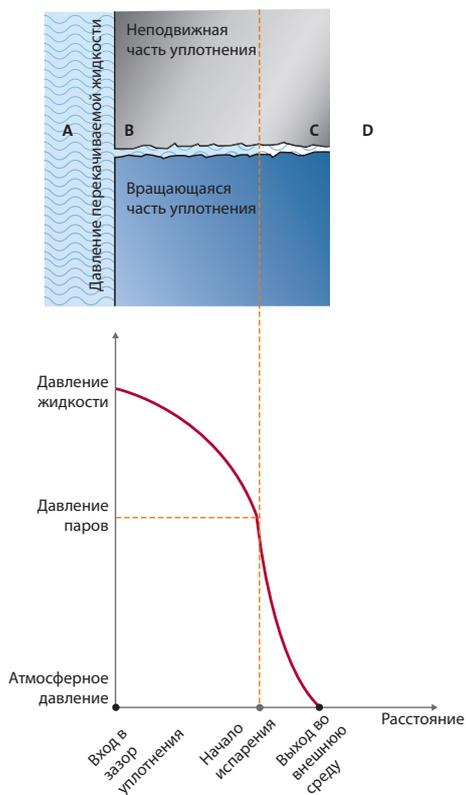


Рис. 1.23: Распределение давлений в зазоре уплотнения с горячей водой

Испарение

Отсутствие или недостаточное образование смазочной пленки часто приводит к повреждению поверхностей уплотнения. Испарение перекачиваемой жидкости в зазоре уплотнения происходит, когда давление ниже давления паров перекачиваемой жидкости.

Выделяющаяся при трении поверхностей уплотнения теплота повышает температуру жидкости, что приводит к повышению давления паров. Это приводит к перемещению точки начала испарения в сторону перекачиваемой жидкости (см. рис. 1.23).

Для уплотнений в холодной воде смазочная пленка распространяется по всему зазору уплотнения. В случае надлежащим образом функционирующего уплотнения со стороны атмосферы просачиваются только пары. Испарение будет происходить даже в холодной воде из-за утечки через очень узкий зазор уплотнения, т.е. 0,0002 мм.

Частичный недостаток смазочной пленки часто наблюдается на поверхностях скольжения уплотнения в направлении атмосферы, когда температура перекачиваемой воды выше 100°C. Это происходит из-за испарения смазочной пленки.

Отложения и следы износа

Когда смазочная пленка в зазоре уплотнения испаряется, растворенные твердые вещества откладываются на поверхностях уплотнения.

Если толщина отложений превышает необходимую толщину смазочной пленки, происходит утечка.

В случае твердых отложений следы износа могут образоваться на одном из колец уплотнения (см. рис. 1.24а). В случае мягких и липких отложений утолщение может привести к тому, что поверхности уплотнения разойдутся, (см. рис. 1.24б).

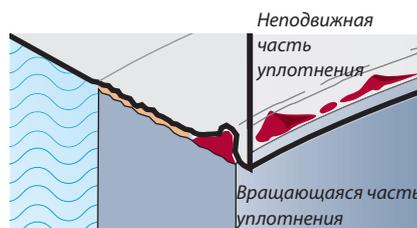


Рис. 1.24а: Образование следов износа

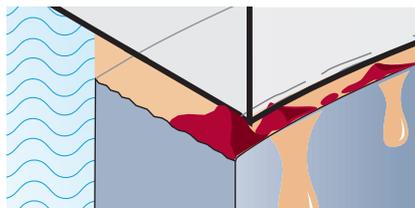


Рис. 1.24б: Нарост отложений на поверхностях уплотнения

Кривая давления паров

Для обеспечения надлежащей жидкой смазки в основной части зазора уплотнения рекомендуется поддерживать температуру уплотнения на 10-15°C выше температуры насыщенных паров. Кривая для воды представлена на рис. 1.25.

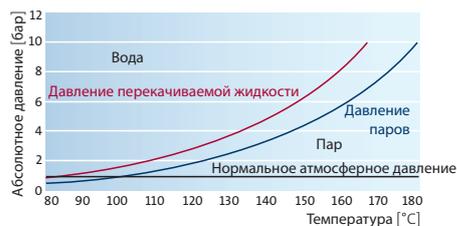


Рис. 1.25: Кривая давления паров для воды

Теплота, выделяющаяся при трении

При трении в торцевом уплотнении вала выделяется теплота. В случае недостаточной смазки выделяемая теплота может составлять до 100 Вт/см². Для сравнения, на сковороде при максимальном нагреве вырабатывается примерно 10 Вт/см². Чтобы свести к минимуму повышение температуры в зазоре уплотнения, нужно отвести тепло. Количество отведенного тепла определяется следующими факторами:

- поток жидкости в камере уплотнения;
- теплопроводность деталей уплотнения;
- теплоотдача в атмосферу.

Иногда влияние этих факторов не значительно, что приводит к испарению смазочной пленки в зазоре уплотнения. В результате, уплотнение работает без смазки.

Потери мощности P из-за трения можно рассчитать по следующей формуле:

$$P = F_c \times f \times v$$

где:

F_c = Замыкающее усилие

f = Коэффициент трения

v = Скорость скольжения

Коэффициент трения (COF) зависит от смазки и материалов поверхностей уплотнения. Для хорошо смазанных поверхностей уплотнения коэффициент варьируется от 0,03 до 0,08.

В случае недостаточной смазки поверхностей уплотнения COF зависит от материалов поверхностей уплотнения. Таким образом, если две поверхности уплотнения изготовлены из таких твердых материалов, как карбид вольфрама, в горячей воде возможен коэффициент COF до 0,4.

Для сбалансированного уплотнения вала Grundfos типа H для вала диаметром 16 при скорости вращения 2900 мин⁻¹ и давлении 10 бар и при допущении, что $f = 0,04$, ситуация будет следующей (см. стр. 16):

$$F_c = 195 \text{ Н}, \quad f = 0,04, \quad v = 3,0 \text{ м/с}$$

$$P = F_c \times f \times v = 195 \text{ [Н]} \times 0,04 \times 3,0 \text{ [м/с]} = 23,4 \text{ [Вт]}$$

Вихревые потери в камере уплотнения вырабатывают небольшое количество тепла, когда скорость скольжения ниже 25-30 м/с. Иногда для узкой камеры уплотнения требуются дополнительные меры предосторожности для отведения тепла, например, увеличенная циркуляция перекачиваемой жидкости вокруг уплотнения (см. главу 2, стр. 31).

4. История развития



Рис. 1.26. Развитие уплотнений вала Grundfos

В начале девятнадцатого века было сделано множество попыток разработать замену для традиционной плетеной набивки, используемой для поршневых и центробежных насосов. Требовалась более надежная система для различных видов вращающихся механизмов, перемещающих жидкости.

В 1930-х гг. James Walker Group предложила торцевое уплотнение вала для холодильных компрессоров. В то же время компания John Crane изобрела первое торцевое уплотнение вала для автомобилей. В начале 1940-х гг. компания разработала и представила запатентованное сифонное уплотнение вала из эластомера.

После этого прорыва в технологии уплотнений были разработаны другие типы торцевых уплотнений вала. После разработки нескольких типов торцевых уплотнений вала, слоганом компании John Crane стало «Правильное уплотнение для правильного применения».

Сегодня John Crane продолжает оставаться лидирующим производителем уплотнений наряду с Grundfos, Burgmann, Flowserve и другими.

Первое торцевое уплотнение вала компании Grundfos

Первое торцевое уплотнение вала Grundfos было выпущено в 1952 г.. Уплотнение было установлено в насосе СР - первом в мире вертикальном многоступенчатом насосе. Это было кольцевое уплотнение с поверхностями из карбида вольфрама.



Рис. 1.27. Иллюстрация уплотнения вала насоса СР из журнала Grundfos Pump Magazine, 1956 г.



Несбалансированное кольцевое уплотнение Grundfos с поверхностями уплотнения из карбида вольфрама успешно использовалось в абразивных жидкостях. Вскоре это привело к разработке уплотнений для других насосов Grundfos, включая насосы BP с внешним эжектором для подачи воды из скважин, многоступенчатые насосы CR, одноступенчатые насосы UPT и "in-line" насосы LM и LP.

Поверхности уплотнения из карбида вольфрама оказались очень успешным вариантом для использования в холодной воде. Но использование такого варианта в горячей воде не рекомендуется из-за очень шумной работы.

Карбид вольфрама в паре с угольным графитом

В начале 1990-х гг. Grundfos разработала резиновое сильфонное уплотнение с поверхностями из карбида вольфрама и угольного графита. Вскоре такое сочетание материалов стало традиционным. Резиновый компенсатор идеально подходит для уплотнений с графитовым "седлом". Это сильфонное уплотнение было разработано для насосов CR, также используется в одноступенчатых насосах LM/LP, CNI, AP и UMT/UPT.

Позднее было разработано картриджное уплотнение, упрощающее установку и обслуживание.

Исполнение карбид кремния/карбид кремния (SiC/SiC) становится стандартным

С 2004 г. сочетание карбид кремния/карбид кремния стало стандартным сочетанием материалов для картриджных уплотнений вала Grundfos. Это сочетание характеризуется великолепной устойчивостью к абразивному износу и хорошими рабочими характеристиками в горячей воде.

Выводы:

В этом разделе были описаны принцип конструкции и используемые материалы торцевого уплотнения вала. Мы узнали, что смазочная пленка очень важна для достижения хороших рабочих характеристик уплотнения. Балансировка уплотнения может изменить толщину смазочной пленки. Для предотвращения чрезмерной утечки смазочная пленка должна оставаться тонкой.

Глава 2

Типы торцевых уплотнений вала и системы уплотнения



1. Типы торцевых уплотнений вала
2. Системы уплотнения
3. Выбор торцевого уплотнения вала



1. Типы торцевых уплотнений вала

В этой главе будут рассмотрены основные принципы работы одинарных торцевых уплотнений вала. В главе описываются торцевые уплотнения вала, используемые в насосах Grundfos, как примеры разнообразных вариантов уплотнений вала для различных вариантов применения.



Тип А

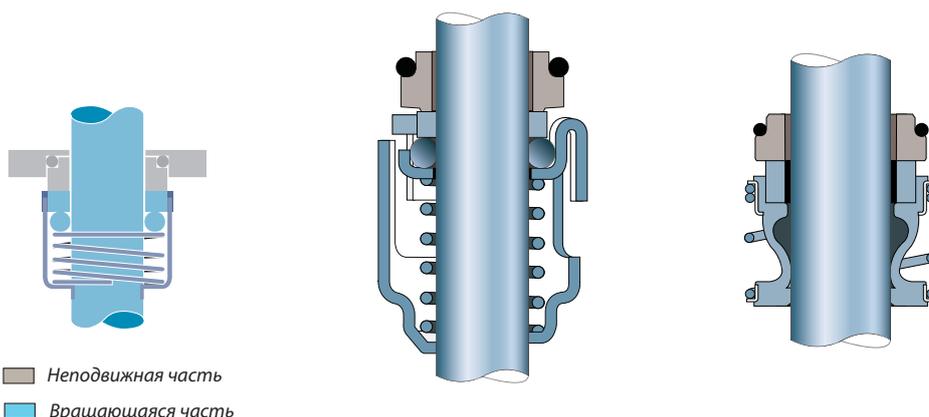
Несбалансированное кольцевое уплотнение с жесткой системой передачи крутящего момента

Прочное кольцевое уплотнение, отличающееся жесткой конструкцией передачи крутящего момента, необходимой для поверхностей из твердых материалов (карбид вольфрама/карбид вольфрама - WC/WC или карбид кремния/карбид кремния - SiC/SiC) даже в случаях недостаточной смазки. В качестве вторичного уплотнения используется уплотнительное кольцо, что создает риск износа на валу под уплотнительным кольцом и застревания уплотнения (блокировки осевого движения вращающегося уплотнительного кольца).

Тип В

Резиновое сильфонное уплотнение

Сильфонное уплотнение с передачей крутящего момента с помощью пружины и сильфона. Таким образом, оно не предназначено для поверхностей из твердых материалов при плохой смазке. Благодаря сильфону уплотнение не изнашивает вал, а осевое движение не блокируется отложениями или перегревом вала.





Тип С

**Несбалансированное
кольцевое
уплотнение с пружи-
ной в качестве
элемента передачи
крутящего момента**

Простое кольцевое уплотнение для низкого давления с пружиной, выступающей в качестве элемента передачи крутящего момента. Таким образом, работа уплотнения зависит от направления вращения вала. Представленное на рисунке уплотнение предназначено для вала, вращающегося против часовой стрелки. Этот тип уплотнения великолепно подходит для использования при низкой температуре в чистой воде для поверхностей уплотнения керамика/графит.



Тип D

**Сбалансированное
кольцевое
уплотнение с пру-
жиной со стороны
атмосферы**

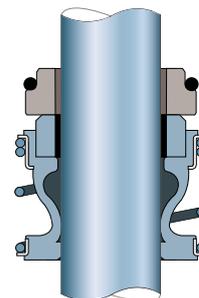
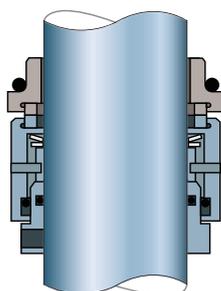
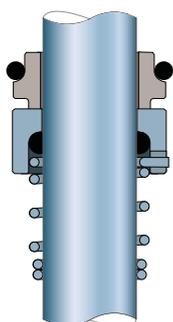
Благодаря балансировке этот тип кольцевого уплотнения подходит для применения при высоком давлении. Уплотнение прекрасно подходит для высоковязких жидкостей, содержащих загрязнения и волокна, так как пружина расположена на стороне атмосферы. Уплотнение отличается жесткой конструкцией элемента передачи крутящего момента.



Тип G

**Резиновое
сильфонное
уплотнение с
уменьшенной
площадью
поверхности
уплотнения**

Резиновое сильфонное уплотнение, аналогичное типу В, но с меньшей площадью поверхности уплотнения. Благодаря уменьшенной площади поверхности уплотнение эффективно при использовании с высоковязкими и предохраняющими от замерзания жидкостями.

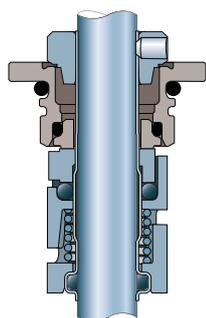




Тип H

Сбалансированное картриджное кольцевое уплотнение с жесткой системой передачи крутящего момента

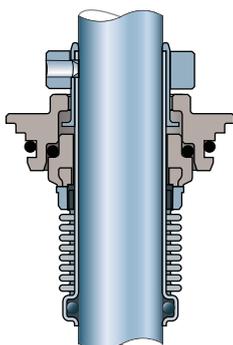
Этот тип уплотнения смонтирован в картридже, что делает его замену безопасной и простой. Так же, как в случае с уплотнением типа D, балансировка делает этот тип кольцевого уплотнения пригодным для применения в средах высокого давления.



Тип K

Сбалансированное сильфонное картриджное уплотнение из прокатного металла

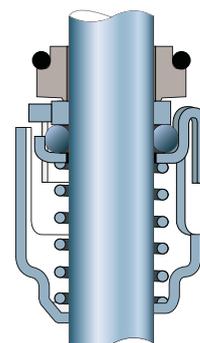
Металлический сильфон действует и как пружина, и как элемент передачи крутящего момента. В уплотнении этого типа есть только неподвижные резиновые части, что снижает риск застревания, как в уплотнении типа B.



Тип R

Несбалансированное кольцевое уплотнение типа A с уменьшенной площадью поверхности уплотнения

Кольцевое уплотнение, похожее на уплотнение типа A, но с уменьшенной площадью поверхности уплотнения. Благодаря уменьшенной площади поверхности уплотнения, коэффициент балансировки превышает значение для уплотнения типа A. Это снижает ограничения для значений рабочего давления и температуры уплотнения. Как и уплотнение типа G, это уплотнение эффективно при использовании с высоковязкими и предохраняющими от замерзания жидкостями.

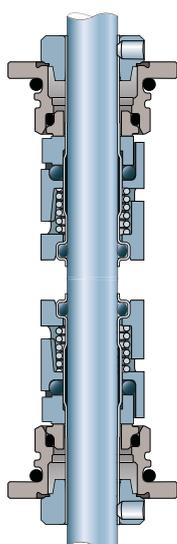




Тип О

Два уплотнения, установленные по схеме "back-to-back" (развернуты друг к другу)

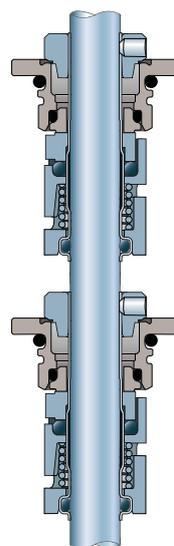
Такое уплотнение предусматривает использование чистой промывочной жидкости с более высоким давлением, чем давление перекачиваемой жидкости. Это полностью исключает вероятность утечки перекачиваемой жидкости в атмосферу, а чистая промывочная жидкость обеспечивает хорошую смазку поверхностей обоих уплотнений (см. описание схемы промывки на стр. 31).



Тип Р

Два уплотнения, установленные по схеме "tandem" (последовательно)

Такое уплотнение предусматривает использование чистой промывочной жидкости с более низким давлением, чем давление перекачиваемой жидкости. Это охлаждает уплотнительные кольца уплотнения в перекачиваемой среде и предупреждает утечку (см. описание схемы промывки на стр. 35).



2. Системы уплотнения

Некоторые описанные выше уплотнения вала могут использоваться в составе специальных систем уплотнения, а также в сдвоенных уплотнениях. Ниже описаны принципы работы таких систем.

Промывка

Иногда необходимо охладить поверхности уплотнения одинарных торцевых уплотнений вала или удалить отложения в камере уплотнения. В таких случаях между напорной стороной насоса и камерой уплотнения может устанавливаться промывочная трубка. Охлаждающая жидкость из камеры уплотнения попадает назад в перекачиваемую жидкость. Это обеспечивает хорошую циркуляцию жидкости в камере уплотнения. Достаточной будет трубка диаметром $\varnothing 10/\varnothing 8$.

Внутренняя циркуляция между напорной стороной и камерой уплотнения также может входить в конструкцию насоса, обеспечивая такие же результаты. См. рис. 2.1.



Рис.2.1: Циркуляционный контур для охлаждения одинарного торцевого уплотнения вала

Двойные уплотнения могут устанавливаться последовательно (по схеме "tandem"), когда их "седла" расположены на валу в одном направлении, или по схеме "back-to-back", когда "седла" расположены на валу в противоположных направлениях.

Цель таких конструкций, помимо прочего, состоит в обеспечении контроля температуры, давления или расхода охлаждающей/нагревающей промывной жидкости.

Системы промывки сдвоенного уплотнения схемы “back-to-back” (тип O).

Между двумя уплотнениями находится жидкость под давлением, служащая в качестве затвора. Затворная жидкость имеет ряд преимуществ для уплотнения со стороны продукта по сравнению с одинарным уплотнением вала (см. рис. 2.2).

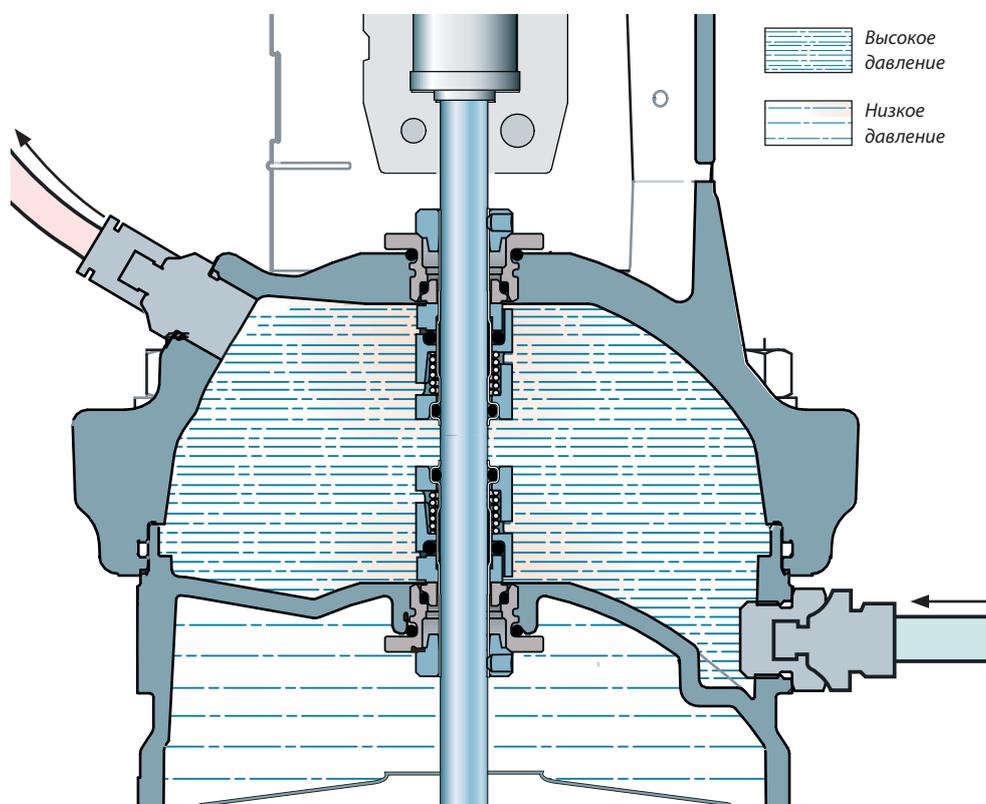


Рис.2.2. Насос CR с двойным уплотнением по схеме “back-to-back”

Такая схема используется для токсичных и взрывоопасных жидкостей, когда недопустимы какие-либо утечки перекачиваемой жидкости в атмосферу.

Давление затворной жидкости выше, чем давление в насосе, в результате чего любая утечка будет происходить только из затворной жидкости в перекачиваемую жидкость. Давление затворной жидкости должно быть не меньше 2 бар или на 10% выше давления перекачиваемой жидкости в районе уплотнения. Так как чистая затворная жидкость имеет высокое давление, она также выступает в качестве смазывающей жидкости для всех поверхностей уплотнения.

Расположение уплотнений по схеме “back-to-back” особенно хорошо подходит для липких жидкостей и/или жидкостей с множеством абразивных частиц, т. к. предупреждается попадание перекачиваемой жидкости в зазор уплотнения, что позволяет избежать чрезмерного износа.

Вода или смесь воды с глицерином чаще всего используются в качестве затворной жидкости для уплотнений, расположенных по схеме "back-to-back", т. к. они не токсичны и совместимы со многими типами перекачиваемых жидкостей. Выбранная затворная жидкость не должна взаимодействовать с перекачиваемой жидкостью.

Для поддержания избыточного давления в затворной жидкости по отношению к давлению перекачиваемой жидкости могут использоваться различные источники давления, описанные в следующих разделах.

Обеспечение фиксированного давления с помощью сосуда

Используется сосуд с жидкостью под давлением, на 10% или 2 бар превышающим давление в перекачиваемой жидкости (см. рис. 2.3).

Преимущества:

- компенсация утечки;
- охлаждение уплотнения за счет естественной конвекции или принудительной циркуляции;
- индикация давления в затворной жидкости;
- возможность сигнализации о низком/высоком уровне затворной жидкости;
- возможность заправки затворной жидкости с сохранением давления в сосуде;
- подвод воздуха под постоянным давлением обеспечивает давление затворной жидкости;
- индикация температуры и уровня жидкости

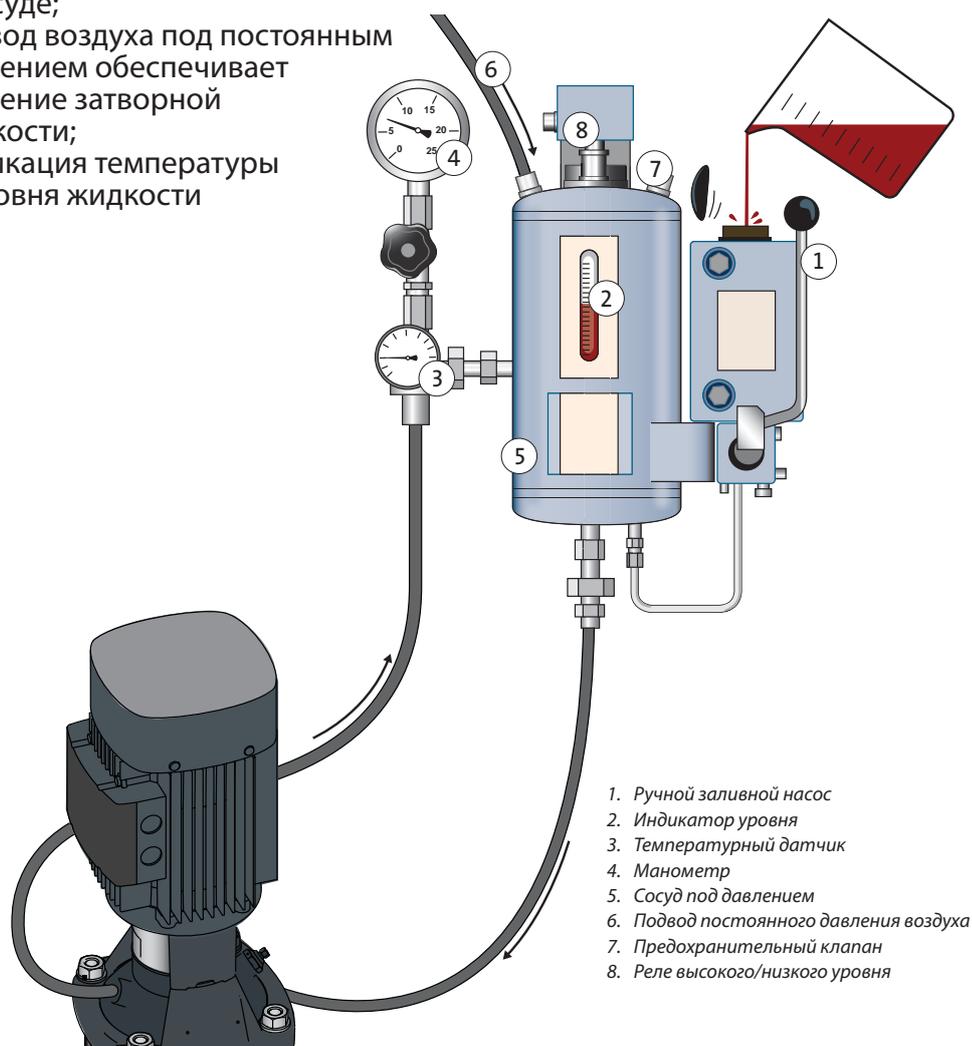


Рис.2.3. Сосуд под постоянным давлением, подсоединенный к насосу CR с комбинацией уплотнений, установленных по схеме "back-to-back"

Фиксированное давление, достигаемое с помощью дозирующего насоса

Другой способ обеспечения фиксированного давления в камере уплотнения – использование дозирующего насоса. Насос автоматически поддерживает уровень, заданный для избыточного давления. Это решение в основном используется для тупиковых ответвлений, когда достаточно охлаждения камеры уплотнения (см. рис. 2.4).

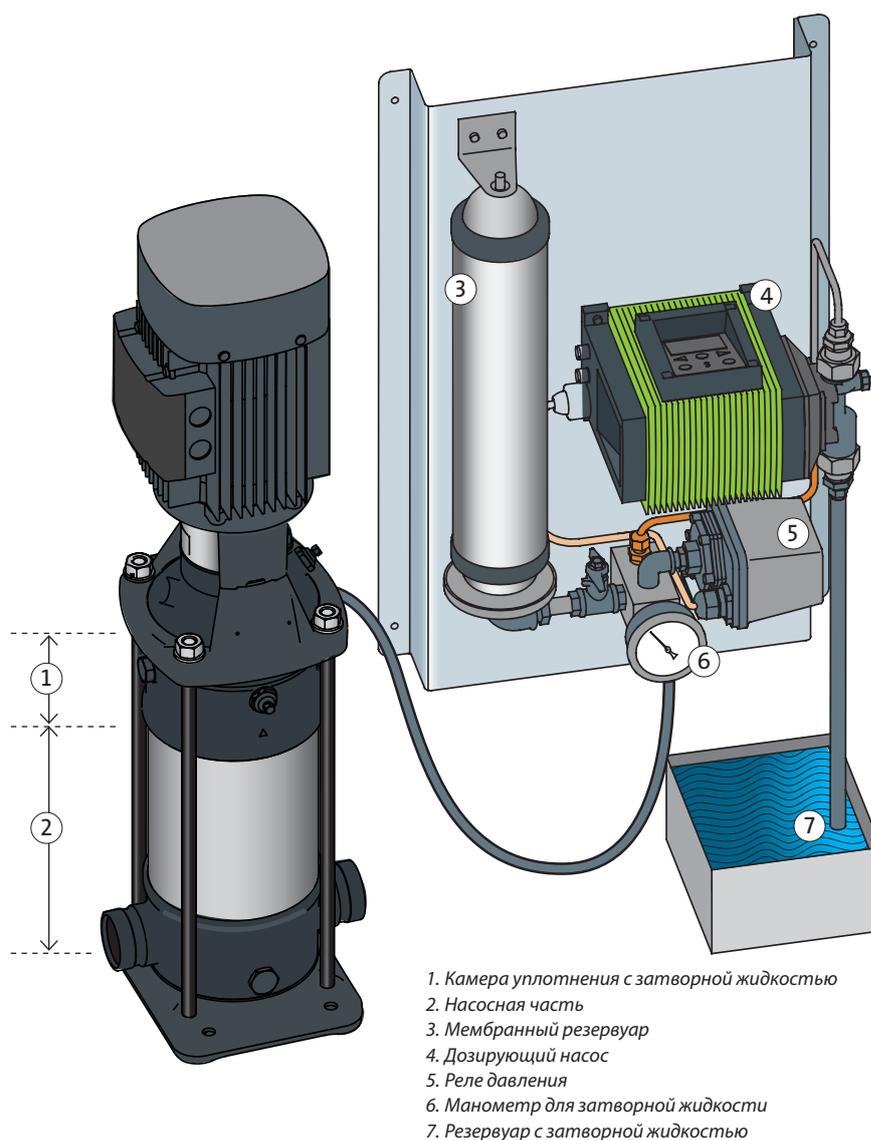


Рис.2.4. Дозирующий насос, поддерживающий фиксированное давление для уплотнений, расположенных по схеме "back-to-back", в насосе CR

Фиксированное давление, достигаемое с помощью напорного гидроусилителя

Напорный гидроусилитель автоматически создает давление, которое на 2 бара выше давления перекачиваемой жидкости, независимо от конкретного давления перекачиваемой среды.

Система поддерживает избыточное давление автоматически, пока она не будет опустошена. Для гидроусилителя требуется рабочий цикл с перерывами, так как его необходимо заполнять.

На стороне впуска затворной жидкости необходим обратный клапан во избежание обратного давления на источник (см. рис. 2.5).

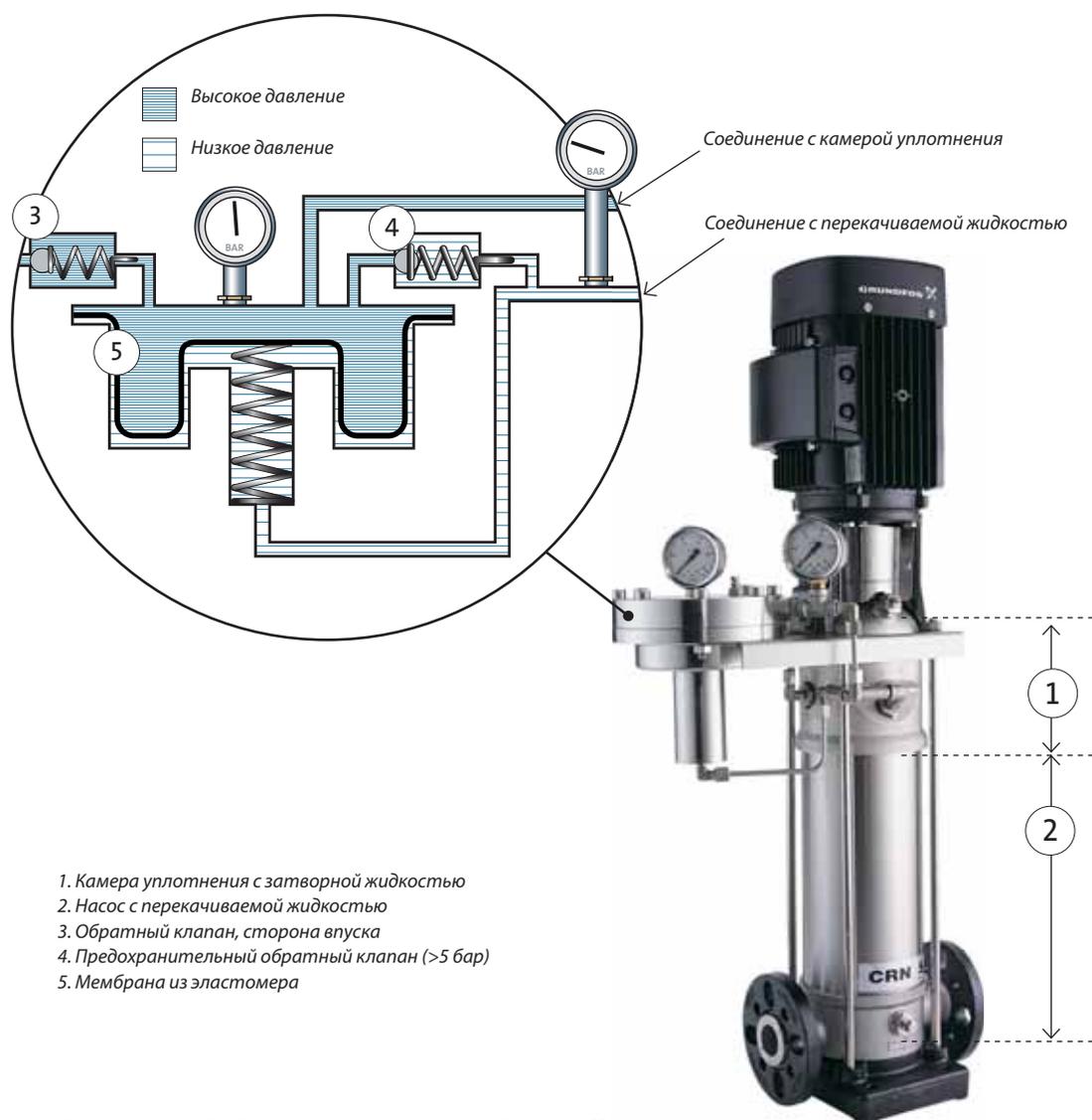


Рис.2.5. Напорный гидроусилитель, установленный в насосе CRN

Системы промывки сдвоенного уплотнения, установленного по схеме "tandem" (тип Р)

Система представляет собой камеру уплотнения с двумя торцевыми уплотнениями, установленными друг за другом (схема "tandem"). Промывочная жидкость между двумя уплотнениями обладает более низким давлением по сравнению с давлением перекачиваемой жидкости, что дает следующие преимущества для уплотнения вала со стороны продукта:

- В зазоре уплотнения отсутствует испарение. Это предотвращает образование отложений, а также кристаллизацию со стороны промывочной жидкости.
- Промывочная жидкость смазывает и охлаждает, даже когда насос работает всухую или с пониженным давлением (см. рис. 2.6).

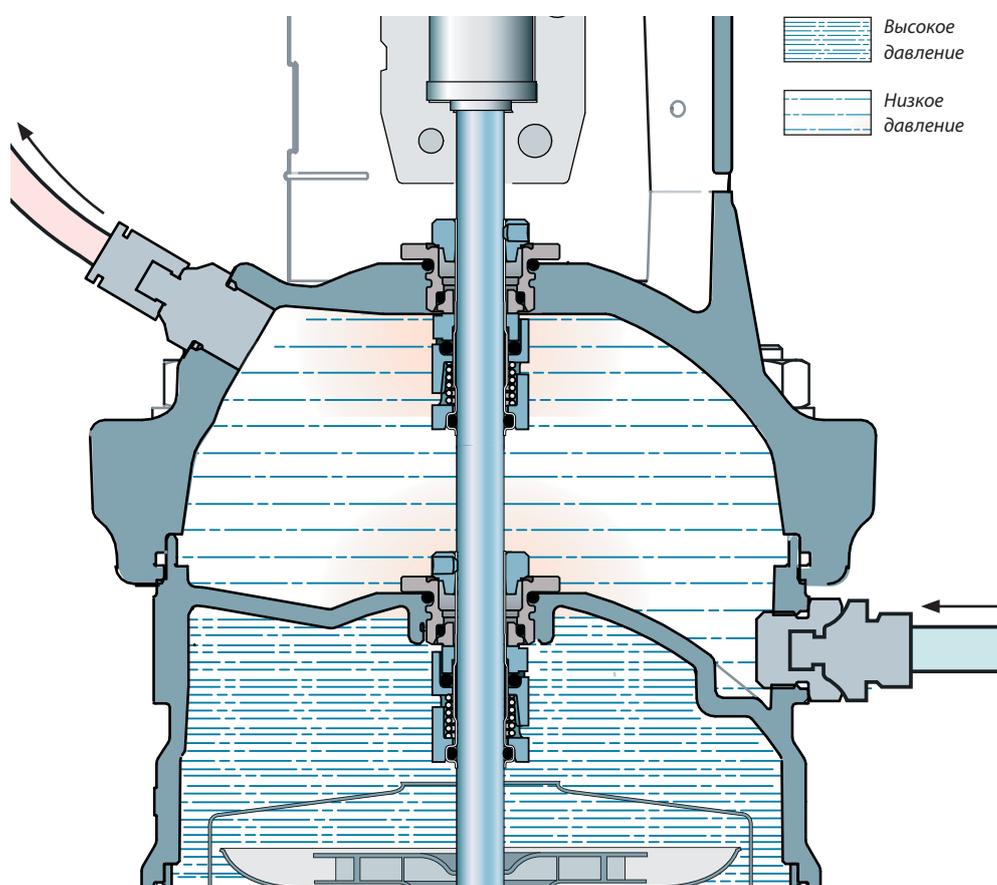
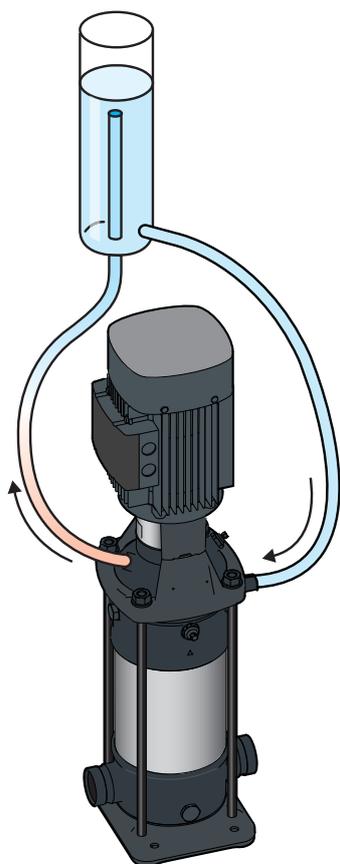


Рис.2.6: Насос CR с двойным уплотнением по схеме "tandem"

Существует несколько вариантов подачи промывочной жидкости из напорного резервуара в камеру уплотнения:

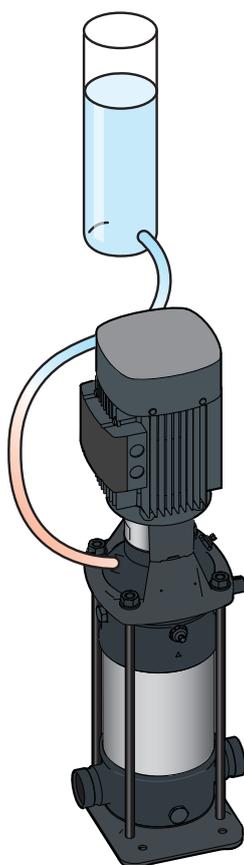
Камера уплотнения, соединенная с резервуаром замкнутым контуром

Промывочная жидкость, циркулирующая под действием естественной конвекции или отдельного насоса, смазывает и охлаждает поверхности уплотнения. При такой схеме промывочную жидкость в резервуаре необходимо заменять через некоторое время, так как она загрязняется перекачиваемой жидкостью.



Камера уплотнения с тупиковым соединением с резервуаром

Резервуар соединяется с камерой уплотнения с помощью одной трубки. Промывочная жидкость смазывает поверхности уплотнения, но охлаждает их меньше, чем в случае циркуляции. Промывочную жидкость в резервуаре необходимо заменять через некоторое время, так как она загрязняется перекачиваемой средой.



Камера уплотнения с внешней промывочной жидкостью

Такая схема позволяет промывочной жидкости проходить через камеру уплотнения и затем стекать. Промывочная жидкость эффективно охлаждает и смазывает поверхности уплотнения и позволяет контролировать утечку через уплотнение.

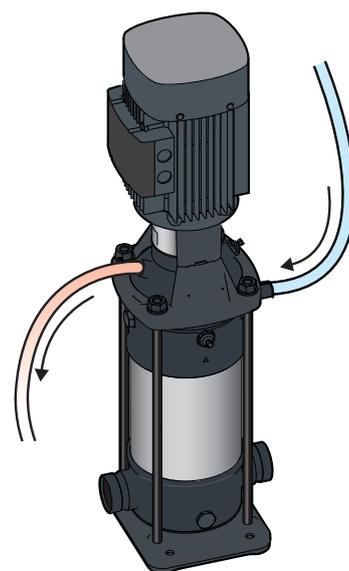


Рис.2.7. Варианты схем промывки сдвоенного торцевого уплотнения, установленного по схеме "tandem".

Другие системы уплотнений

Стерильные уплотнения вала

Требования к уплотнениям вала в насосах, спроектированных для применения в стерильных и санитарно-гигиенических условиях, полностью отличаются от требований, предъявляемых к другим уплотнениям.

Часто необходимо, чтобы уплотнение отвечало стандартам и нормам. Некоторые из них коротко изложены в главе 6.

В некоторых случаях материалы уплотнения должны отвечать специальным руководствам в отношении возможности очистки и устойчивости к перекачиваемой среде, и допускать возможность очистки и стерилизации без разборки. Кроме того, низкие показатели шероховатости и электрополировка поверхностей необходимы для деталей, расположенных на стороне среды, - на рисунке отмечены желтым.

Особое внимание необходимо уделять деталям уплотнения вала из эластомеров. Детали из эластомеров должны быть устойчивыми к перекачиваемым средам и температурам в ходе очистки. Цель этих требований состоит в том, чтобы обеспечить очистку всех поверхностей уплотнения вала, контактирующих с перекачиваемыми жидкостями (см. рис. 2.8, 2.9 и 2.10).

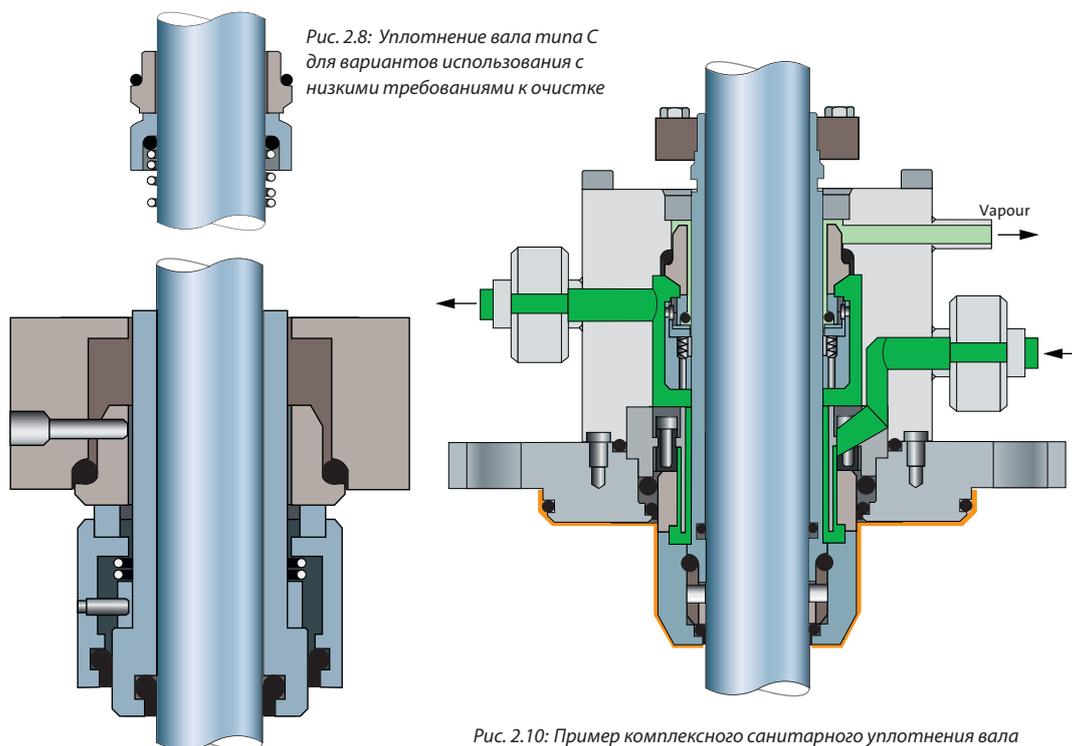


Рис. 2.8: Уплотнение вала типа C для вариантов использования с низкими требованиями к очистке

Рис. 2.9: Уплотнение вала типа D для вариантов использования с умеренными требованиями к очистке. Вторичные уплотнения были изменены, зазоры исключены

Рис. 2.10: Пример комплексного санитарного уплотнения вала мешалки, к которому предъявляются самые высокие требования к стерилизации и очищаемости. Барьерной жидкостью (зеленая) может быть паровой конденсат. Поверхности, отмеченные желтым, являются электрополированными. Вторичные уплотнения со стороны среды были изменены, зазоры исключены.

Торцевые уплотнения вала для высоких скоростей вращения

Когда скорость вращения превышает 15-20 м/с, "седло" должно быть вращающимся, для уменьшения дисбаланса уплотнения (см. рис. 2.11).

Одно из главных преимуществ вращающегося "седла" - возможность быстрого выравнивания положения при нарушении соосности вала с помощью пружины и, следовательно, предупреждение изнашивания муфты под уплотнительным кольцом.

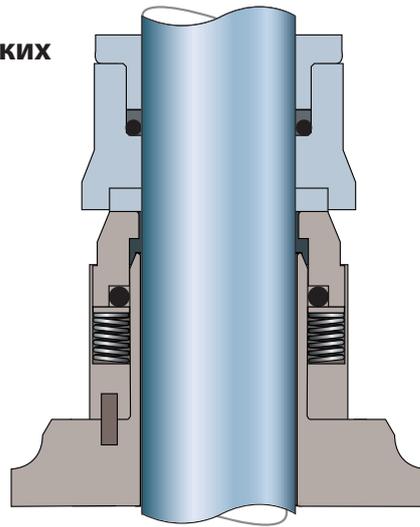


Рис.2.11. (Справа) Пример высокоскоростного уплотнения вала для насоса ВМЕ

Система уплотнения с воздушным охлаждением для высоких температур

В случаях перекачивания чистой жидкости при высоких температурах, например, горячей воды или нагретого масла, может быть целесообразным увеличение длины насоса.

При этом под камерой уплотнения будет находиться воздушная камера. Благодаря такому расположению стандартное уплотнение вала находится на расстоянии от горячей перекачиваемой среды, что позволяет уплотнению вала формировать стабильную смазочную пленку в зазоре уплотнения. Обмен между перекачиваемой жидкостью в насосной части и камере уплотнения очень ограничен, благодаря дросселю вокруг вала.

Автоматический воздуховыпускной клапан необходим для вентилирования камеры уплотнения. При этом уплотнение не зависит от внешних соединений (см. рис. 2.12).

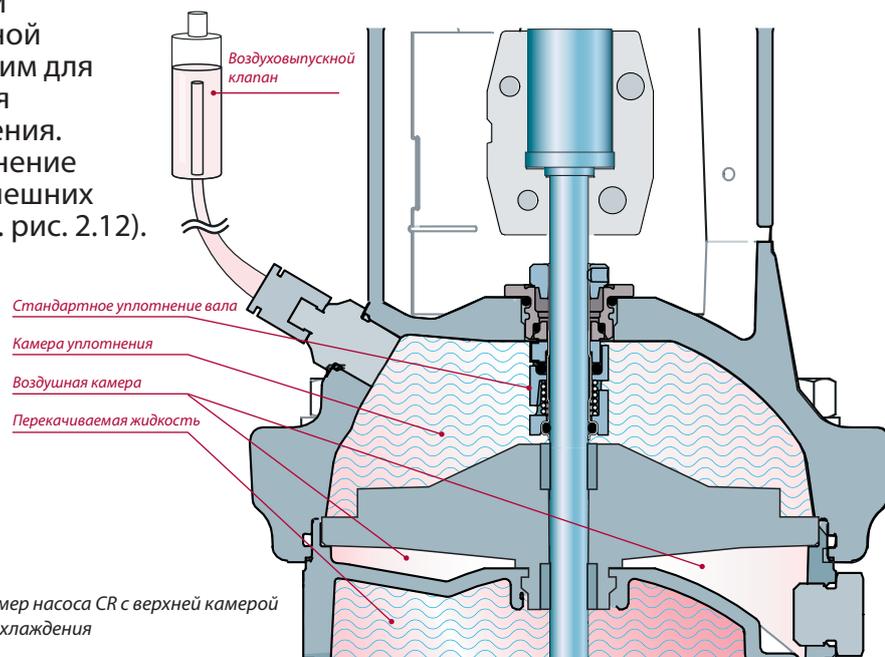


Рис. 2.12. Пример насоса CR с верхней камерой воздушного охлаждения

Система уплотнения с магнитным приводом

Система с магнитным приводом кардинально отличается от всех описанных выше типов уплотнения вала.

В случаях, когда необходимо абсолютно предотвратить утечку через уплотнение вала, решением может быть использование кожуха, отделяющего насосную часть от атмосферы. Система с магнитным приводом представляет собой наружный и внутренний магнитные роторы, разделенные таким кожухом (см. рис. 2.13). Система с магнитным приводом передает крутящий момент от двигателя к валу насоса. В системе имеются только неподвижные уплотнительные кольца для изолирования чистой перекачиваемой жидкости от магнитных частиц. Данная система уплотнения не зависит от внешних соединений.

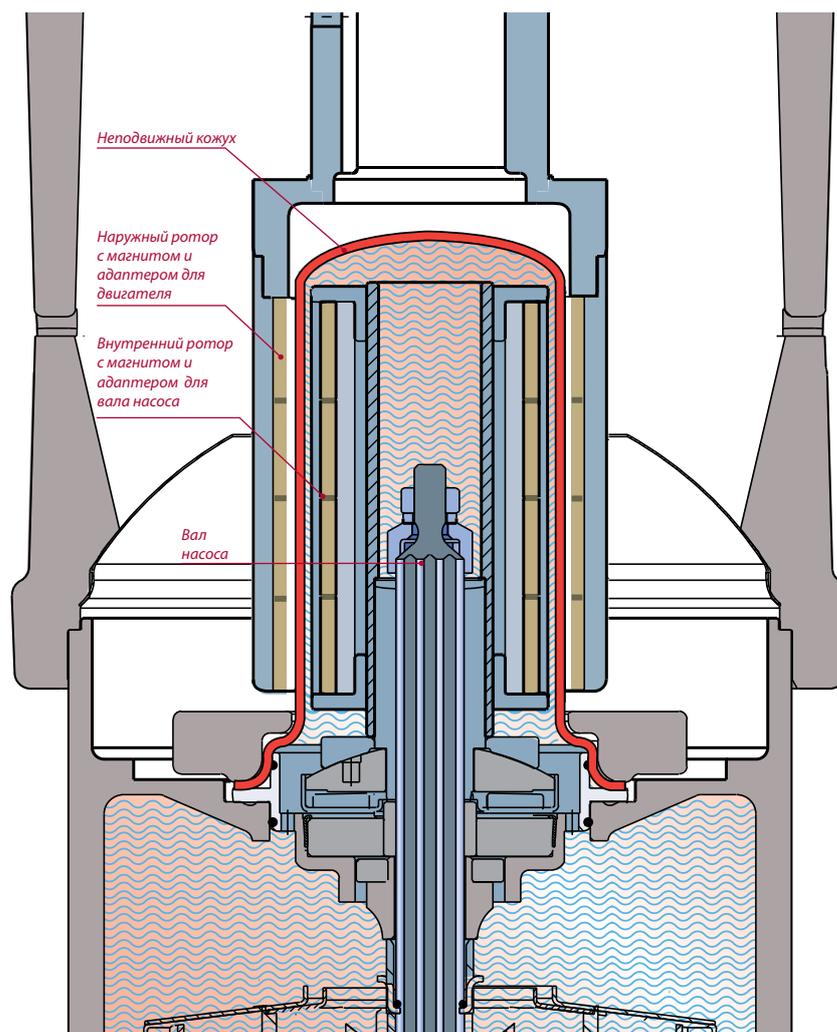


Рис. 2.13. Герметичная система уплотнения с магнитным приводом

Система наружного уплотнения

Для перекачивания некоторых типов чистых и очень агрессивных, но не токсичных, жидкостей целесообразно изолировать вращающуюся часть уплотнения с пружинами и оправку для уплотнения от перекачиваемой жидкости.

Для этого типа сбалансированного уплотнения необходимо создать внутреннее избыточное давление для удержания вместе поверхностей уплотнения. Зазор между валом и "седлом" такой большой, что позволяет циркулировать жидкости для охлаждения поверхностей уплотнения. (см. рис. 2.14).

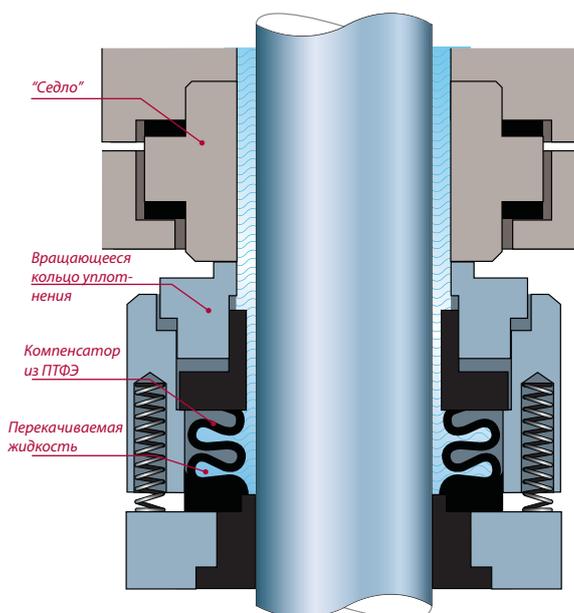


Рис. 2.14. Сбалансированное внешнее уплотнение вала для агрессивных сред

Система уплотнения для погружных двигателей

Перепад давлений внутри и снаружи погружного двигателя небольшой. Соответственно, могут использоваться стандартные торцевые уплотнения вала, а также манжетные уплотнения (см. рис. 2.15). Тем не менее, срок службы торцевых уплотнений вала значительно больше.

Для предотвращения чрезмерного повышения давления внутри двигателя разработаны специальные меры.

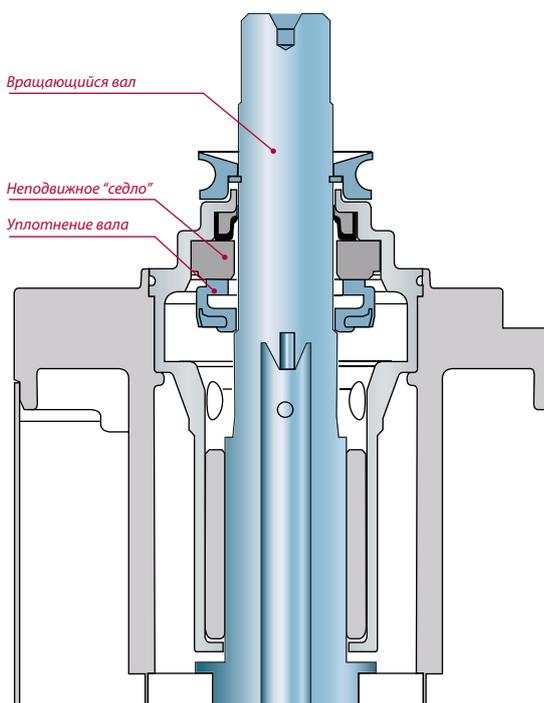
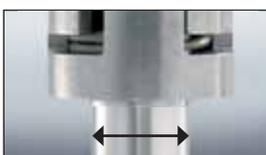


Рис. 2.15. Погружной двигатель с торцевым уплотнением вала

3. Выбор торцевого уплотнения вала

Выбор торцевого уплотнения вала зависит от следующих параметров:

- диаметра вала
- типа перекачиваемой жидкости
- температуры в районе уплотнения
- давления в районе уплотнения
- скорости вращения вала.



Диаметр вала

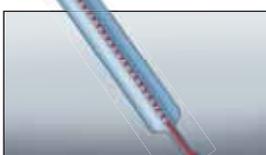
Диаметр уплотнения вала необходимо подбирать в соответствии с валом насоса. В случае отсутствия уплотнения с необходимым диаметром, диаметр вала можно изменить с помощью втулки.



Тип перекачиваемой жидкости

Необходимо учитывать устойчивость материалов уплотнения вала к воздействию перекачиваемой жидкости.

Вязкость перекачиваемой жидкости влияет на смазку уплотнения и утечку через него. Вязкость большинства жидкостей зависит от температуры. Одинарное уплотнение вала может использоваться для динамической вязкости до 2500 сП (сантипуаз). В случае более высокого коэффициента вязкости необходимо использовать комбинацию уплотнений по схеме "back-to-back".



Температура

Детали уплотнения из эластомеров должны выдерживать температуру перекачиваемой жидкости в районе уплотнения. Она может отличаться от температуры перекачиваемой жидкости. Если температура выше точки кипения перекачиваемой жидкости, смазка будет недостаточной. Это следует учитывать при выборе конструкции и материалов уплотнения.



Давление в районе уплотнения

Для высоких давлений следует использовать сбалансированное уплотнение.



Скорость вращения вала

В случае низкой скорости вращения, уплотнения вала с поверхностями из твердых материалов могут создавать шум, так как смазочная пленка в зазоре уплотнения будет очень тонкой. При скорости выше 15 м/с следует использовать сбалансированное уплотнение с вращающимся "седлом", чтобы уменьшить дисбаланс уплотнения.

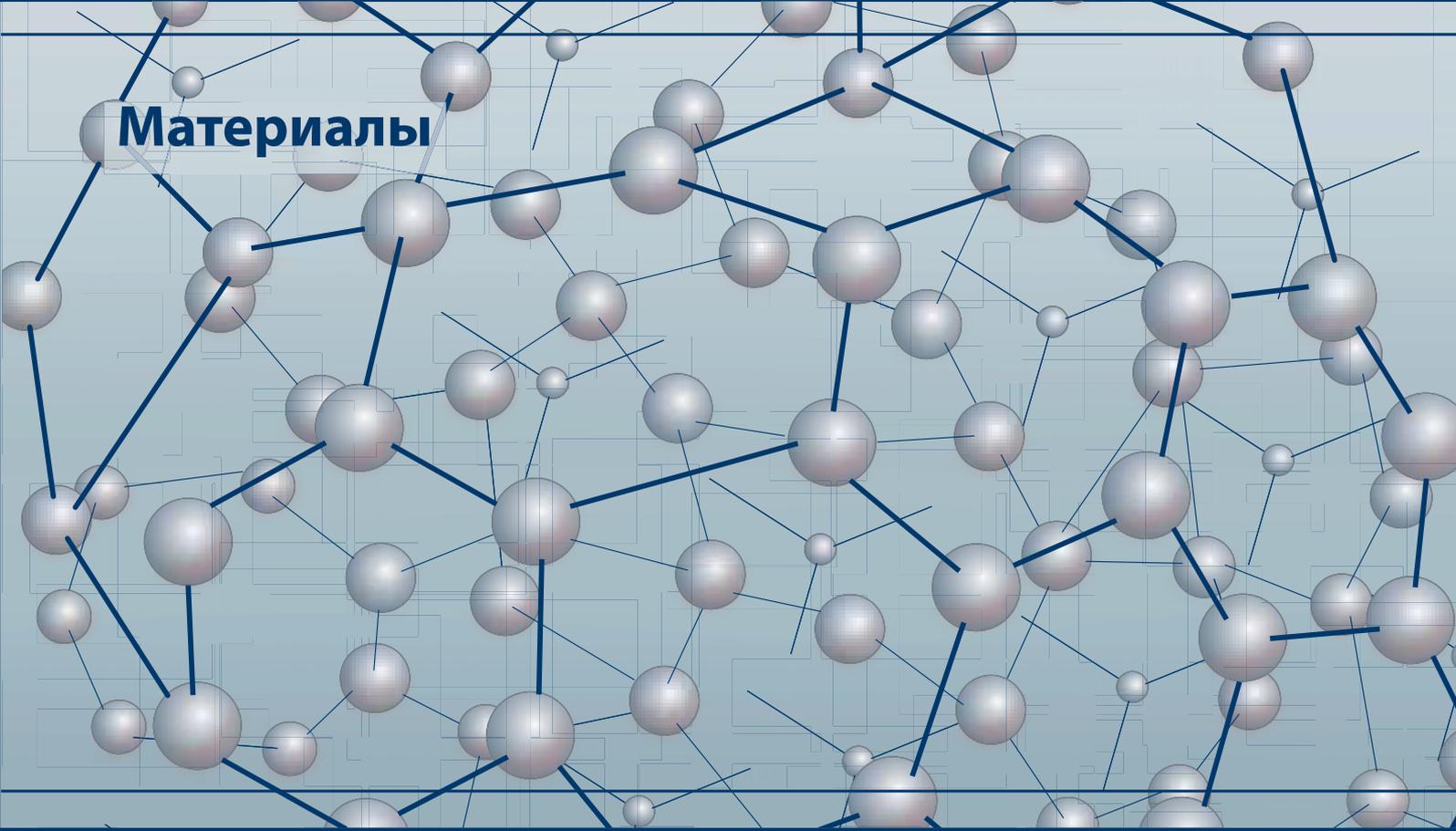
Кроме указанных параметров при выборе материала поверхностей уплотнения, иногда необходимо учитывать содержание абразивных частиц и примесей в перекачиваемой жидкости. В некоторых случаях важным фактором также является объем пространства для размещения уплотнения вала. Для правильного размещения торцевого уплотнения вала также учитывайте содержание абразивных частиц и риск скопления разрушающих частиц со стороны атмосферы, а также степень угрозы для здоровья, взрывоопасность и токсичность перекачиваемой жидкости.

Выводы:

Торцевые уплотнения вала могут быть различными для обеспечения различных рабочих характеристик. Выбор уплотнения зависит от перекачиваемой жидкости, рабочей температуры, давления и скорости вращения. Для применения в тяжелых условиях одинарные торцевые уплотнения могут объединяться в системы уплотнения с использованием трубок, мембран, пружин, клапанов и отдельных подсистем для дополнительного охлаждения жидкостью.

Глава 3

Материалы



1. Материалы поверхности уплотнения
2. Пары материалов поверхностей уплотнений
3. Испытание уплотнений вала
4. Вторичные уплотнения
5. Материалы других частей уплотнения вала

В предыдущих главах был описан состав и принцип работы торцевых уплотнений вала. В этой главе описываются самые распространенные материалы, используемые для различных компонентов торцевого уплотнения вала, а также испытания уплотнений с поверхностями из разных материалов.

1. Материалы поверхности уплотнения

Немногие материалы могут использоваться для поверхностей уплотнения. Для поддержания утечки на минимальном уровне зазор уплотнения должен быть очень маленьким. В результате, смазывающая пленка будет очень тонкой. Следовательно, материалы поверхности уплотнения должны выдерживать трение друг об друга при высокой нагрузке и скорости. Поэтому материалы для поверхностей уплотнения должны обладать низким коэффициентом трения, высокой твердостью, хорошей устойчивостью к коррозии и высокой теплопроводностью.

Выбор материалов поверхностей уплотнения имеет решающее значение для функционирования и срока службы торцевого уплотнения вала. Далее будут описаны наиболее распространенные материалы, применяемые для уплотнений вала.

Угольный графит



Рис. 3.1. Микроснимок структуры угольного графита, пропитанного сурьмой

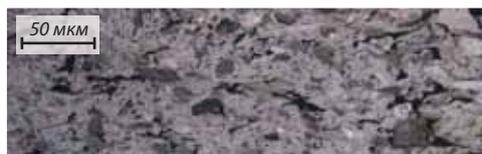


Рис. 3.2. Микроснимок структуры угольного графита, пропитанного смолой

Угольный графит является смесью твердого углерода и графита.

Угольный графит широко используется в качестве материала поверхности уплотнения благодаря его антифрикционным свойствам. Материал подходит для использования в качестве парного материала с поверхностями из многих других видов материалов.

Пропитанный угольный графит

Каждый производитель угольного графита предлагает свои марки угольного графита в зависимости от качества твердого углерода, содержания графита, размера зерна, способа смешивания и обжига. После прессования и обжига пористость угольного графита варьируется от 5% до 20%. Для получения герметичного продукта угольный графит необходимо пропитать, используя металлы или смолы в качестве пропиточных веществ.

Для пропитки используются легкоплавкие металлы, как, например, сурьма (Sb), олово (Sn), свинец (Pb) или сплавы этих металлов (см. рис. 3.1).

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код А (см. стр. 96).

Пропитка смолами часто осуществляется с помощью фенольной смолы (см. рис. 3.2). В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код В.

Для особых целей пропитанный смолой угольный графит может быть дополнительно подвергнут термической обработке, чтобы преобразовать смолу в углерод. Возможно, необходимо будет повторить процедуру пропитки и термической обработки несколько раз для получения герметичного пропитанного углеродом графита.

Склеенный смолой угольный графит

Смолы, содержащие до 70% угольно-графитовых наполнителей, могут отливаться под давлением и использоваться без обжига. Материал известен как «склеенный смолой графит». Склеенный смолой графит обладает более низким износом и химической устойчивостью по сравнению с пропитанным смолой графитом.

Свойства

В вакууме коэффициент трения графита высок, тогда как при нормальных условиях он низкий.

В случае применения в горячей воде (> 100°C) пропитанный металлами угольный графит обладает более низким коэффициентом трения и более высокой устойчивостью к износу, чем аналогичные типы угольного графита, пропитанного смолой. Недостатком пропитки металлом является ограниченная устойчивость к коррозии.

Кроме того, в случае пропитанного металлом угольного графита не может быть получено разрешение для использования с питьевой водой (см. главу 6).

Стандартное значение коэффициента сухого трения угольного графита о твердый материал поверхности уплотнения составляет 0,1-0,2 при нормальных внешних условиях. Жесткость и вязкость угольного графита низки. Эти свойства должны учитываться при проектировании и установке торцевых уплотнений вала. В холодной чистой воде торцевое уплотнение вала с одной поверхностью уплотнения из угольного графита служит в течение нескольких лет. Тем не менее, если уплотнение используется в горячей воде или в воде, содержащей твердые частицы, уплотнение необходимо регулярно заменять.

Оксид алюминия (глинозем)

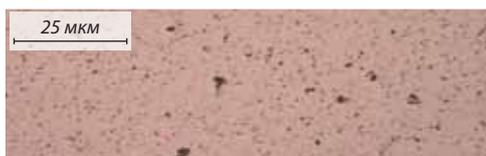


Рис. 3.3. Микроснимок поверхности глинозема



Рис. 3.4. Микроснимок вытравленной поверхности глинозема

Оксид алюминия является керамическим материалом, также известным как «глинозем». Глинозем обычно используется в качестве материала поверхности уплотнения благодаря его хорошей износостойчивости и низкой цене.

Каждый поставщик предлагает собственные марки глинозема с различными составами стеклофазы и различными размерами зерна (см. рис. 3.3 и 3.4).

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код V.

Свойства

Устойчивость к коррозии в воде ограничивается определенным диапазоном значений степени кислотности, зависящей от состава стеклофазы, а также степени чистоты. Наилучшая устойчивость к коррозии достигается с 99,99% глиноземом. При этом цена материала резко увеличивается с увеличением степени чистоты. Глинозем подходит только для использования при низкой нагрузке из-за его низкой теплопроводности по сравнению с карбидом вольфрама и карбидом кремния. В торцевом уплотнении глинозем, в основном, используется в паре с угольным графитом. Глинозем обладает высокой жесткостью, но устойчивость к тепловому удару ограничена.

Карбид вольфрама (W)



Рис. 3.5. Микроснимок поверхности карбида вольфрама



Рис. 3.6. Микроснимок вытравленной поверхности карбида вольфрама

Карбид вольфрама (WC) - тип твердых металлов на основе твердой фазы карбида вольфрама и обычно более мягкой фазы металлического связующего вещества. Правильный технический термин для материала, обозначаемого WC, – «цементированный карбид вольфрама». Тем не менее, для удобства часто используется сокращенный термин «карбид вольфрама», при этом подразумевается «цементированный».

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код U.

Свойства

Твердость WC ниже большинства керамических материалов, в то время как износостойчивость исключительно высока, в основном благодаря его высокой жесткости. WC – это тяжелый материал с плотностью приблизительно 14 г/см³. WC с кобальтом (Co) в качестве связующего материала устойчив к коррозии в воде, но только если насос изготовлен из инертного материала, например, чугуна. Устойчивость к коррозии некоторых типов WC с хром-никель-молибденом в качестве связующего материала аналогична устойчивости нержавеющей стали EN 1.4401 (AISI 316). WC с фазой связующего вещества, составляющей менее 0,5%, обладает наибольшей устойчивостью к коррозии, хотя материал не устойчив в такой среде, как, например, вода, содержащая гипохлорит. Благодаря его чрезвычайно высокой износостойкости, WC является предпочтительным материалом поверхности уплотнения для вариантов применения, связанных с присутствием абразивных частиц.

Карбид кремния (SiC)

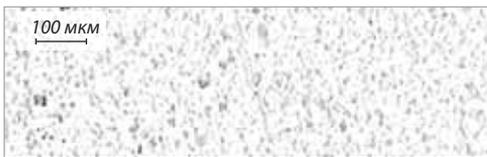


Рис. 3.7. Микроснимок поверхности плотного карбида кремния



Рис. 3.8. Микроснимок поверхности карбида кремния с графитовой смазкой

Карбид кремния может изготавливаться различными способами, что придает ему различные свойства.

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код Q.

Основные типы SiC в зависимости от технологии производства:

- Спеченный вакуумным способом.
Этот тип чаще всего используется для поверхностей уплотнения.
- Реакционно-связанный.
Этот тип обладает ограниченной устойчивостью к коррозии в щелочной воде из-за содержания свободного кремния.
- Спеченный в жидкой фазе.
Этот тип обладает ограниченной устойчивостью к коррозии в щелочной воде из-за содержания стеклофазы.
- Преобразованный угольный графит.
Этот тип производится из угольного графита. Он может представлять собой тонкий слой SiC на поверхности угольного графита.

Свойства

Спеченный вакуумным способом SiC является хрупким и требует осторожного обращения. Это легкий материал с плотностью немного выше 3 г/см^3 . Он обладает высокой износостойкостью и устойчивостью к коррозии.

Спеченный вакуумным способом SiC обладает стандартной пористостью менее 2%, но есть и более пористые марки. Поры являются разрозненными, не взаимосвязанными и распределенными контролируемым образом по всей толще материала.

Сферические поры выполняют функцию резервуаров для жидкости или смазки, помогая сохранять пленку жидкости на границе поверхностей скольжения деталей. Этот механизм смазки на основе пор позволяет пористому SiC превзойти традиционные реакционно-связанные и спеченные типы SiC по эффективности в горячей воде.

Сложное спекание или добавление различных наполнителей может вносить изменения в стандартные марки SiC. Наполнители могут добавляться для достижения улучшенной электропроводности, повышения жесткости или уменьшения трения.

Включения углерода или графита могут использоваться в качестве сухой смазки для уменьшения трения. Для успешного использования включений графита в качестве смазки необходимо оптимизировать связь между SiC и графитом, а также размер и количество включений графита.

Алмазные покрытия

Алмаз является самым известным материалом, используемым для изнашиваемых деталей. Алмаз обладает самой высокой твердостью и теплопроводностью по сравнению со всеми известными материалами. Кроме того, он отличается великолепной устойчивостью к коррозии и низким коэффициентом трения. Эти свойства делают алмаз идеальным материалом для поверхностей уплотнения. Главным недостатком является цена.

В последнее десятилетие алмазные покрытия были запущены в серийное производство. Такие покрытия могут представлять собой поликристаллический алмаз или аморфный углерод, называемый алмазоподобным углеродом (DLC). Поликристаллический алмаз имеет решетчатую структуру алмаза, где вокруг каждого атома углерода на одинаковом расстоянии расположены четыре соседних атома углерода (связи sp^3) (см. рис. 3.9). В покрытиях DLC часть атомов углерода расположена в структурах, аналогичных алмазной решетке, а часть атомов – в структуре, аналогичной решетке графита, которая является гексагональной (см. рис. 3.10).

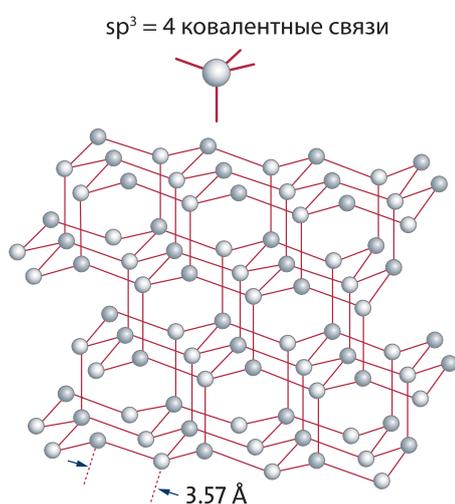


Рис. 3.9. Атомы углерода в кристаллической решетке алмаза (связи Sp^3)

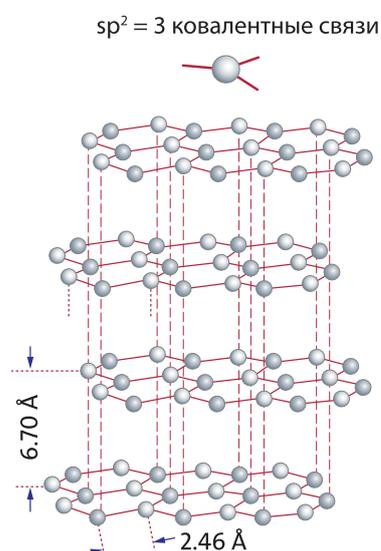


Рис. 3.10. Атомы углерода в кристаллической решетке графита (связи Sp^2)

Могут создаваться различные варианты покрытий DLC, твердость которых варьируется от 1000 до 4000 HV (твердость по Виккерсу). Толщина покрытия DLC варьируется от 0,1 до 10 мкм и значительно влияет на себестоимость. При небольшой толщине покрытия сцепление с основой должно быть очень сильным для предупреждения расслоения, когда покрытие DLC используется на поверхности уплотнения.

Лучшими свойствами обладают толстые покрытия из поликристаллического алмаза, нанесенные на твердую основу. При этом если на другую поверхность торцевого уплотнения не нанесено аналогичное покрытие, она может подвергаться износу.

2. Пары материалов уплотнения

Угольный графит / Карбид вольфрама (WC)

Сочетание угольный графит и WC широко используется при подборе материалов поверхностей торцевого уплотнения.

Пара угольный графит/WC выдерживает работу без смазки в течение нескольких минут без повреждения торцевого уплотнения вала.

Устойчивость к коррозии зависит от марки угольного графита, а также легирующих присадок связующего вещества для WC.

Если перекачиваемая жидкость содержит твердые частицы, следует ожидать, что поверхности уплотнения будут изнашиваться.

Благодаря благоприятным смазочным свойствам угольного графита уплотнение пригодно для использования даже в условиях недостаточной смазки, например, в горячей воде. Но при этом в таких условиях износ поверхности из угольного графита сокращает срок службы уплотнения.

Уровень износа зависит от таких факторов, как давление, температура, тип перекачиваемой жидкости, диаметр уплотнения, марка угольного графита и тип конструкции уплотнения (см. рис. 3.11).

На всех графиках рабочих характеристик в главе 3 речь идет о работе со скоростью 3000 об./мин.

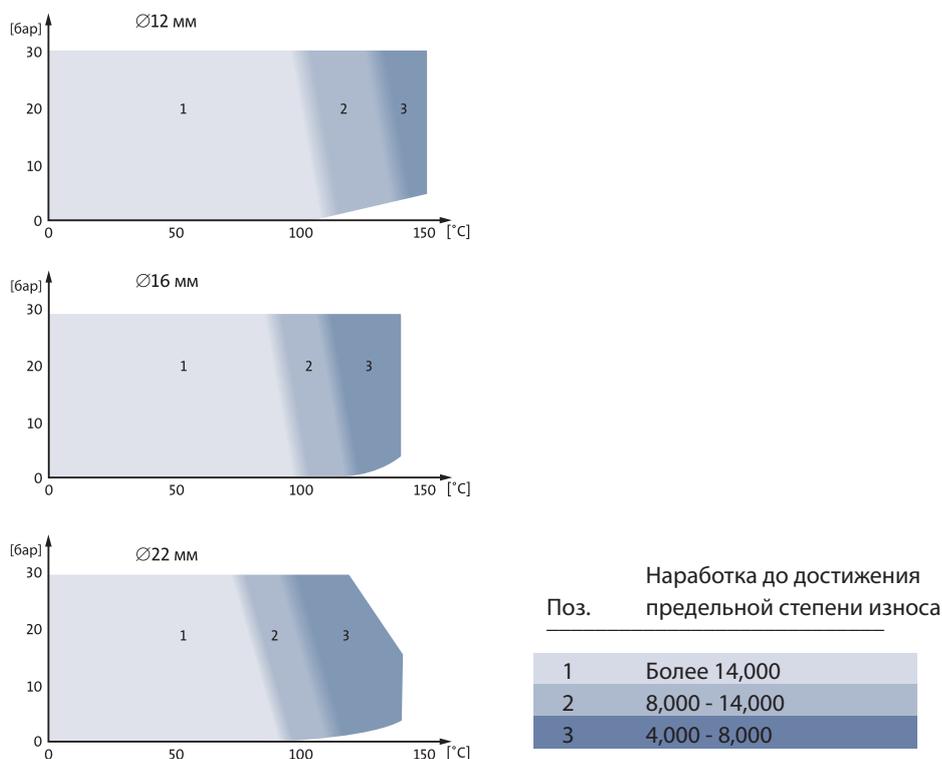


Рис. 3.11. Графики зависимости от давления и температуры, отражающие срок службы уплотнений вала типа H из графита/WC в воде для трех различных диаметров вала

Низкие скорости вращения уменьшают смазку между поверхностями уплотнения. Это может привести к увеличению износа. Тем не менее, так как рабочее расстояние короче, в большинстве случаев уровень износа не изменяется.

Угольный графит / вакуумно-спеченный карбид кремния (SiC)

Угольный графит/SiC – это еще одно широко используемое сочетание материалов для поверхностей торцевого уплотнения.

Пара угольный графит/SiC обладает очень хорошей устойчивостью к коррозии.

Свойства при работе без смазки аналогичны свойствам пары угольный графит/WS.

Использование пары угольный графит/SiC в горячей воде может привести к интенсивному износу поверхности из SiC, в зависимости от марки угольного графита и воды.

Использование пористого SiC или карбида с графитной смазкой в паре с угольным графитом приводит к значительно меньшему износу по сравнению с плотным SiC (см. рис. 3.12).

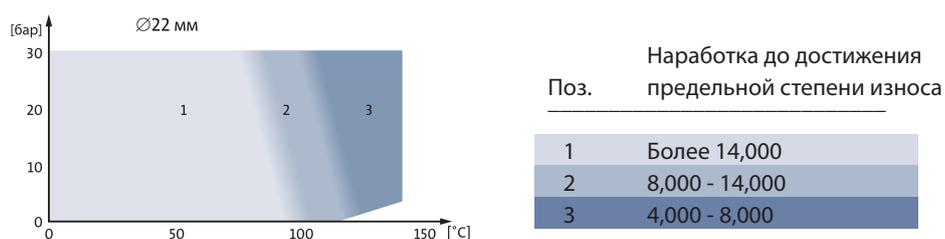


Рис. 3.12. График давления/температуры, отражающий срок службы уплотнения вала типа H из графита/SiC в воде для вала диаметром 22

Угольный графит /глинозем

Угольный графит в паре с глиноземом широко применяют в качестве материалов поверхностей уплотнения для недорогих уплотнений массового производства.

Устойчивость к коррозии часто ограничена в воде диапазоном от pH 5 до pH 10, в зависимости от используемой марки глинозема.

Свойства при работе без смазки аналогичны свойствам пары угольный графит/WS, но рабочие характеристики в горячей воде намного хуже (см. рис. 3.13).

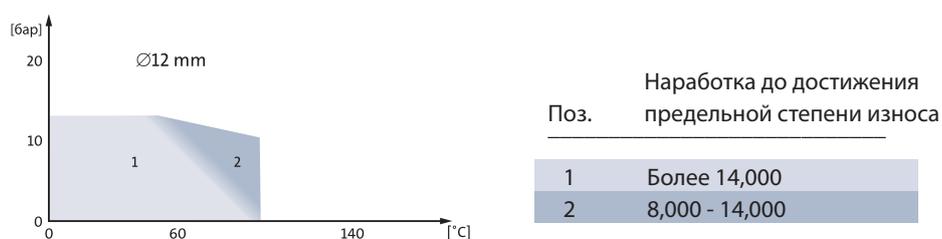


Рис. 3.13. График давления/температуры, отражающий срок службы уплотнения вала типа C из графита/глинозема в воде для вала диаметром 12

Карбид вольфрама (WC) / Карбид вольфрама (WC)

Уплотнение вала с поверхностями из WC обладает чрезвычайной устойчивостью к износу. Будучи очень прочным, WC выдерживает работу в тяжелых условиях.

Трение WC о WC без смазки очень высокое. Поэтому пара материалов поверхностей уплотнения WC/WC плохо подходит для работы без смазки. Уплотнение вала с поверхностями уплотнения из WC/WC, работающее совершенно без смазки, может быть повреждено менее чем за одну минуту работы.

В случае превышения определенных предельных значений давления и температуры уплотнение может создавать шум. Шум свидетельствует о плохой смазке и износе уплотнения в перспективе. Ограничения использования зависят от диаметра и типа конструкции уплотнения.

На графиках давления/температуры различных уплотнений показаны области, в которых может появиться шум (см. рис. 3.14).

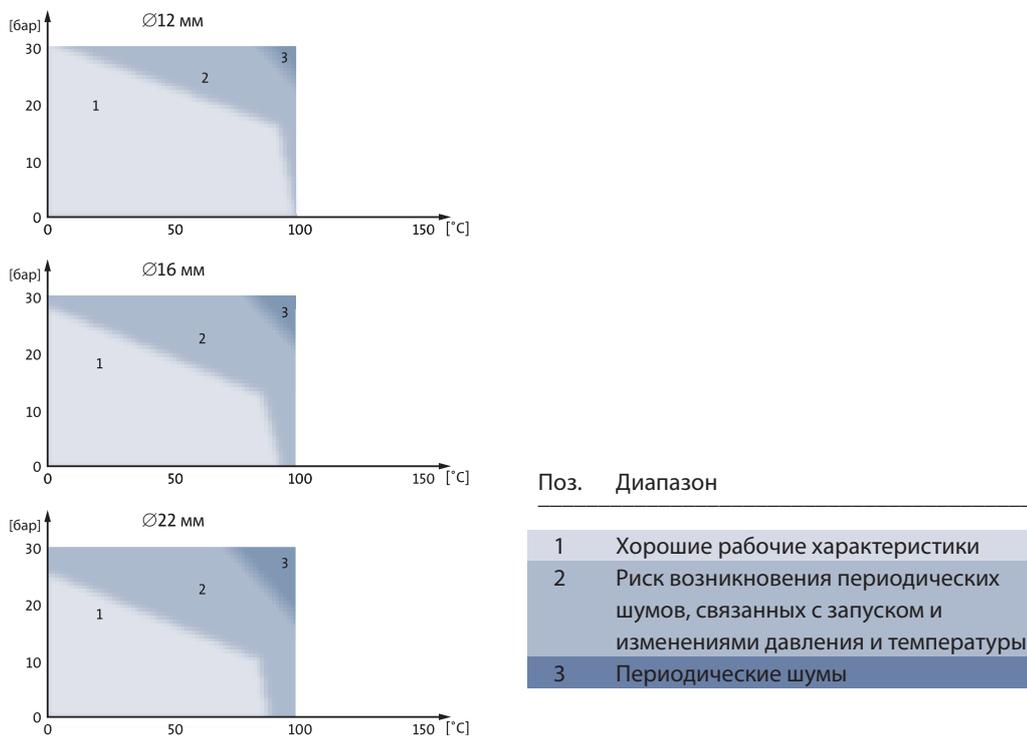


Рис. 3.14. Графики давления/температуры уплотнений вала типа H из WC/WC в воде для трех различных диаметров вала

Примечание: Период притирочного износа пары поверхностей уплотнения WC/WC с шумом составляет до четырех недель. Тем не менее, обычно во время первых дней эксплуатации шум не возникает из-за большей степени утечки.

Карбид кремния (SiC) / Карбид кремния (SiC)

Являясь альтернативой WC/WC, пара SiC/SiC используется там, где требуется более высокая устойчивость к коррозии. Эта пара материалов обладает хорошей устойчивостью к абразивному износу благодаря высокой твердости. Трение высоко, но для некоторых марок SiC, содержащих твердые смазки, коэффициент трения уменьшается вдвое, что в некоторой степени улучшает свойства работы без смазки. Уплотнения, в которых используются такие марки SiC, могут работать в течение нескольких минут без смазки перекачиваемой средой.

Рабочие характеристики уплотнений из пористых марок SiC или марок SiC, содержащих твердые смазки, в горячей воде можно увидеть на рис. 3.15.

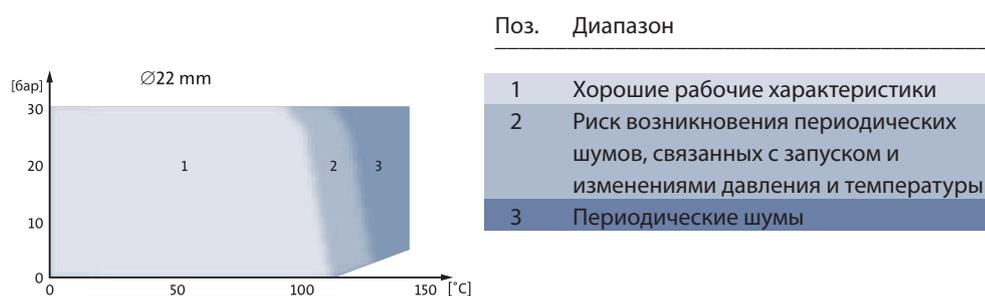


Рис. 3.15. График давления/температуры уплотнения вала типа H из SiC/SiC в воде для вала диаметром 22 мм

3. Испытание уплотнений вала

Различные типы простейших испытательных стендов, например, кольцо-кольцо или даже штифт-диск, могут быть использованы для оценки возможности использования того или иного материала в торцевом уплотнении. Такие испытания позволяют получить информацию о трибологических характеристиках материалов и могут даже выявить изнашивание в трибологической системе. Для получения точной картины рабочих характеристик уплотнения вала, испытания должны проводиться в условиях, имитирующих условия применения уплотнения.

Рабочие характеристики уплотнения в горячей воде

Смазка поверхностей уплотнения в горячей воде ограничена. Это происходит из-за низкой вязкости воды при высоких температурах, а также испарения в зазоре уплотнения. Ограничения температуры и давления для уплотнений вала можно получить с помощью проведения всесторонних испытаний.

В случае превышения этих ограничений можно ожидать появление шума из уплотнений и усталостного износа.

График на рис. 3.16 показывает изменение границы хороших рабочих характеристик с изменением скорости вращения. При снижении скорости границы смещаются в сторону более низких температур.

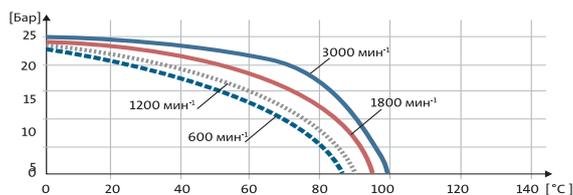


Рис. 3.16. Пример границ стабильного трения уплотнения вала при разных скоростях

Испытания в горячей воде выполняются в проточной воде. При давлениях и температурах ниже соответствующей кривой со стабильным трением поверхности уплотнения подвергаются минимальному износу. Некоторый износ можно ожидать выше соответствующей кривой.

Другой способ отражения температурных пределов состоит в построении кривой зависимости степени износа от температуры при фиксированном давлении (рис. 3.17).

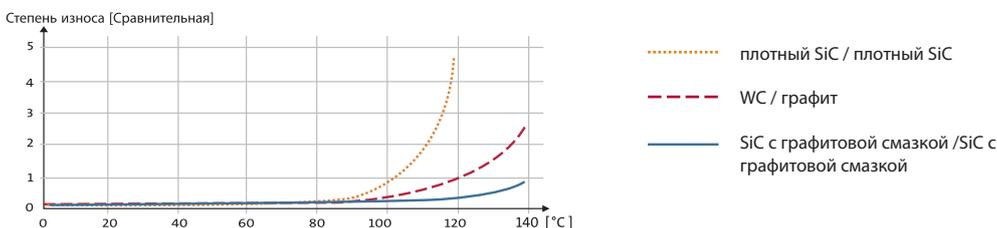


Рис. 3.17. Сравнительная степень износа поверхностей уплотнения для различных пар материалов

Работа без смазки

Работа без смазки может привести к серьезному повреждению уплотнения.

Так как иногда сложно полностью избежать работы без смазки, важно провести испытание рабочих характеристик при эксплуатации уплотнения без смазки. Это очень просто сделать путем эксплуатации уплотнения вала совершенно без смазки с подсоединенными к "седлу" термopарами или с термографическим оборудованием. На полученные результаты незначительное влияние оказывает относительная влажность воздуха в помещении для испытаний. На рис. 3.18 показаны графики изменения температуры, измеренные на "седле" различных уплотнений, эксплуатируемых без смазки.

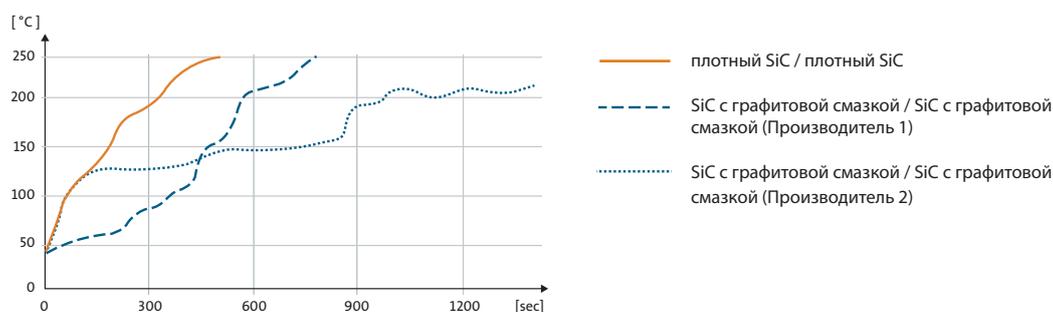


Рис. 3.18. Температура "седла" при работе уплотнений с поверхностями из различных марок SiC без смазки

Как видно из графика на рис. 3.18, пара плотный SiC/плотный SiC и SiC с графитовой смазкой/ SiC с графитовой смазкой (Производитель 1) демонстрируют неудовлетворительные рабочие характеристики при эксплуатации без смазки, аналогичные характеристикам пары WC/WC. Пара SiC с графитовой смазкой/ SiC с графитовой смазкой (Производитель 2) имеет лучшие рабочие характеристики при эксплуатации без смазки. Испытания демонстрируют значительные колебания даже в рамках одной и той же марки SiC.

Рабочие характеристики уплотнения в воде, содержащей абразивные частицы

Если обе поверхности уплотнения изготавливаются из твердых материалов, например керамических материалов, редко наблюдается износ поверхностей уплотнения из-за воздействия абразивных частиц. Зазор в торцевом уплотнении обычно составляет менее 0,3 микрона. Теоретически это означает, что в зазор уплотнения могут попасть только частицы размером менее 0,3 микрона. На практике край поверхности уплотнения не совершенно четкий. Соответственно, частицы размером в несколько микрон могут попасть в зазор уплотнения. Обычно такие маленькие частицы вызывают только полировочный износ поверхностей уплотнения из твердых материалов.

Когда одной из поверхностей является графитовое кольцо, край поверхности уплотнения будет изнашиваться, и это позволит более крупным частицам попасть на поверхность уплотнения.

Такие частицы могут задержаться на графитовой поверхности уплотнения и вызвать износ второй твердой поверхности.

Рабочие характеристики уплотнения в воде, содержащей гликоль

Вода, содержащая гликоль, может вызвать утечку через уплотнение. Это вызвано наличием таких добавок, как ингибиторы, антиоксиданты, щелочи и т.п.. Некоторые добавки, например, силикаты и фосфаты, могут кристаллизоваться в зазоре уплотнения в форме твердых частиц. Эти твердые кристаллы вызывают износ уплотнений, в которых одна из поверхностей выполнена из графита (см. рис. 1.24а, стр. 20).

Органические пленкообразующие вещества, так называемые ингибиторы, прилипают ко всем поверхностям, контактирующим с жидкостью, включая основную часть поверхности уплотнения. Многие ингибиторы могут вызывать формирование липких слоев в зазоре уплотнения, что приведет к утечке. Уплотнения из WC/WC или SiC/SiC обладают лучшей способностью к самоочищению по сравнению с уплотнениями в исполнении графит/SiC. Высокое замыкающее усилие и узкая поверхность уплотнения уменьшают риск образования отложений (см. тип G, стр. 28 и тип R, стр. 29).

На рис. 3.19 показаны результаты испытаний, проведенных с различными материалами поверхностей уплотнения в воде, содержащей гликоль, с высоким содержанием добавок.

Степень утечки [сравнительная]

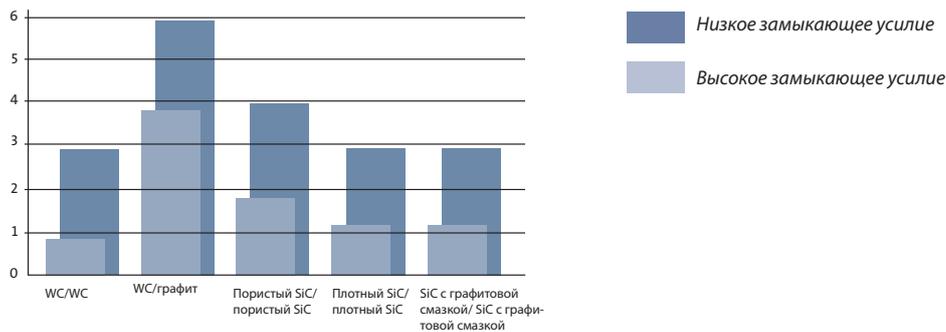


Рис. 3.19. Утечка через уплотнения с различными парами материалов в предохраняющей от замерзания жидкости на основе воды

Для предотвращения образования большого зазора уплотнения и чрезмерной утечки предпочтение отдается шлифовке поверхности. С другой стороны, если поверхность будет слишком гладкой, может произойти заклинивание поверхностей уплотнения. Соответственно, часто выбирается компромиссное решение, - различная степень чистоты двух поверхностей уплотнения. Степень утечки пары твердых материалов повышается, пока поверхности уплотнения не станут гладкими в результате притирки.

Уплотнения с одной поверхностью из графита часто отличаются меньшей суммарной утечкой во время периода притирки по сравнению с уплотнением с парой твердых материалов. Уплотнения с высоким замыкающим усилием отличаются более коротким периодом притирки, так как смазочная пленка тоньше.

Рабочие характеристики уплотнения в чистой воде

Чистая вода может вызывать коррозию многих керамических материалов. Для вакуумно-спеченного SiC, границы зерен, содержащих спекающие добавки, могут быть разрушены.

Разрушение наблюдается только на поверхностях уплотнения, где высокие при контакте с шероховатой поверхностью могут создаваться высокие касательные напряжения.

Контролируя процесс спекания, можно получить марки SiC, которые обладают большей устойчивостью к чистой воде.

На рис. 3.20 представлены результаты испытаний с использованием плотных марок SiC в очищенной от минеральных солей воде с температурой 40°C и проводимостью 2 мкС/см. Специальные марки SiC, устойчивые к коррозии, демонстрируют безотказную работу в течение 11 000 часов испытания при таких условиях.

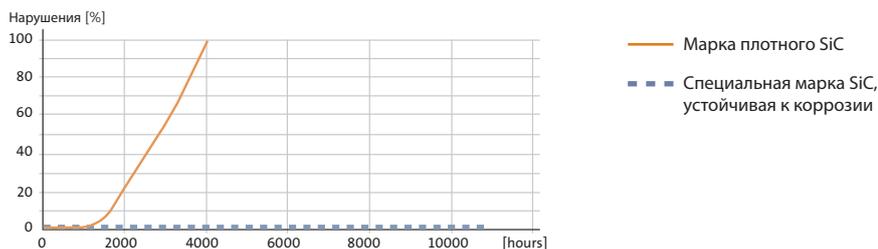


Рис. 3.20: Нарушение уплотнений из SiC в очищенной от минеральных солей воде проводимостью 2 мкС/см

Слипание поверхностей уплотнения

Очень гладкие и плоские поверхности уплотнения легко прилипают друг к другу. Иногда слипание может быть настолько сильным, что будет препятствовать запуску двигателя. Либо может вызвать вращение неподвижного седла во вторичном уплотнении.

Слипание поверхностей уплотнения может иметь различные механизмы возникновения.

Физическое слипание

Вакуум может возникать, когда две плоские и гладкие поверхности плотно прижимаются друг к другу. Соответственно, требуется большое осевое усилие для того, чтобы разделить две поверхности, тогда как для вращения поверхностей требуется меньшее касательное усилие. Касательное усилие при запуске равно усилию, необходимому для очень низкой скорости вращения (см. рис. 3.21).

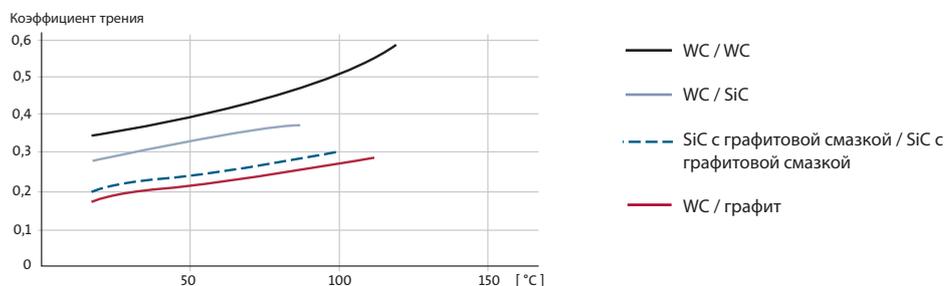


Рис. 3.21: Коэффициент трения различных пар материалов поверхностей уплотнения в воде при низкой скорости вращения

Химическое слипание поверхностей

Все поверхности, подверженные воздействию внешней среды, покрыты слоем оксидной пленки (см. рис. 4.12, стр. 72).

Устойчивость оксидного слоя может изменяться, когда поверхность входит в тесный контакт с другой поверхностью или когда она подвергается воздействию перекачиваемой жидкости. Это изменение в устойчивости может быть вызвано образованием химических связей с оксидами других поверхностей. Чем инертнее оксидная пленка по отношению к окружающей среде, тем слабее связи с другой поверхностью.

Если среда агрессивна к материалу поверхности уплотнения, продукты коррозии поверхности уплотнения могут образовывать химические связи, что приводит к возникновению больших сил сцепления.

Для предотвращения таких механизмов сцепления предпочтение отдается таким крайне инертным типам материалов, как карбид кремния.

Химическое слипание, связанное с воздействием связующих веществ

Если перекачиваемая жидкость содержит ионы, которые могут осаждаться на поверхности уплотнения, то они в дальнейшем могут действовать в качестве связующего вещества между поверхностями уплотнения.

Этот механизм слипания может возникать в жесткой воде и жидкостях, содержащих летучие вещества, и может уменьшаться при использовании пары графит/SiC.

Использование карбида кремния с твердой смазкой поверхности также уменьшает слипание, так как твердая смазка размазывается тонким слоем по поверхностям, обеспечивая слабые касательные усилия.

4. Вторичные уплотнения

Как уже было сказано выше, для обеспечения продолжительного срока службы торцевого уплотнения важно подобрать правильное сочетание материалов поверхностей уплотнения. Но и вторичные уплотнения, изготовленные из эластомеров, например, уплотнительные кольца и компенсаторы, имеют первостепенное значение для надежного функционирования торцевого уплотнения вала в течение всего срока службы.

Эластомеры относятся к полимерам с высокой степенью эластичности.

Обиходное название эластомеров - «резина».

Эластомеры являются предпочтительным материалом для вторичных уплотнений из-за их упругих свойств. Они остаются гибкими в рамках рабочего диапазона температур для выбранного торцевого уплотнения вала. Выбор типа эластомера, в основном, основан на химическом составе и температуре перекачиваемой жидкости.

Обзор устойчивости разных типов эластомеров к температурам и химическому воздействию приведен на рис. 3.22.

Чаще всего в торцевых уплотнениях вала используются следующие эластомеры:

NBR

Сополимер бутадиена и акрилонитрила (NBR) относится к группе ненасыщенных сополимеров.

Изменение состава путем увеличения содержания акрилонитрила повышает устойчивость к маслам, но уменьшает гибкость. По сравнению с натуральным каучуком, NBR более устойчив к маслам и кислотам.

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код P (см. стр. 96).

HNBR

Гидрогенизированный сополимер бутадиена и акрилонитрила (HNBR) обладает такой же хорошей устойчивостью к маслам, как NBR, а также хорошей устойчивостью к озону, щелочным металлам и аминам. HNBR отличается более высоким температурным диапазоном устойчивости в воде по сравнению с NBR.

MVQ

К силиконовой резине относится большая группа материалов, основным компонентом которых является метилвинилсиликон (MVQ). Силиконовые эластомеры обладают относительно небольшой прочностью на разрыв и низкой устойчивостью к износу. Тем не менее, они имеют много уникальных свойств. Силикон обладает хорошей жаростойкостью до + 230°C и хорошей гибкостью при низких температурах до - 60°C, а также хорошей стойкостью к атмосферным воздействиям.

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код S.

EPDM

Этиленпропиленовый монодиен (EPDM) может иметь различные свойства в зависимости от содержания дициклопентадиена, этилдиена и винилнорборнена. По сравнению с NBR материал отличается очень плохой устойчивостью к минеральным маслам, но великолепной устойчивостью к горячей воде. EPDM обладает хорошей устойчивостью к полярным жидкостям и плохой устойчивостью к неполярным жидкостям.

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код E.

FKM

Фторуглеродный мономер (FKM) относится к группе каучуков, разработанных для использования во многих жидкостях при очень высоких температурах, благодаря насыщению фтором. Материал отличается плохой устойчивостью к горячей воде, но великолепной устойчивостью к маслам и химическим веществам. FKM обладает плохой устойчивостью к полярным жидкостям и хорошей устойчивостью к неполярным жидкостям.

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код V.

FXM

Фторированный сополимер (FXM) отличается хорошей устойчивостью к химическому воздействию и выдерживает широкий диапазон температур при использовании в горячей воде.

FFKM

Перфторированный эластомер (FFKM) отличается наилучшей устойчивостью к химическому воздействию по сравнению с любыми другими известными эластомерами. Устойчивость FFKM к химическому воздействию аналогична устойчивости политетрафторэтилена (PTFE - тефлон), а его упругие свойства сходны с резиной. Материал используется для герметизации в самых сложных условиях. FFKM является очень дорогим материалом и может изготавливаться только в относительно простых формах.

В соответствии со стандартом EN 12756 материалам этой группы присвоен код K.

Перекачиваемая среда	Эластомер						
	NBR	HNBR	MVQ	EPDM	FKM	FXM	FFKM
Вода, макс. темп. [°C]	80	100	120	140	90	275	230
Минеральные масла, макс. темп. [°C]	100	150	120	-	200	275	230
Кислоты	+/-	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+
Щелочи	+	+	+/-	+	-	+	+
Гликоль	+	+	+	+	-	+	+
Масла, топливо	+/-	+/-	+/-	-	+	+/-	+
Растворители	-	-	-	-	+/-	-	+
Абразивные частицы	+/-	+	-	+	+/-	+/-	-

Пояснения: + = великолепная +/- = хорошая при определенных условиях - = плохая - = катастрофическая

Рис. 3.22. Обзор устойчивости эластомеров к температурам и химическому воздействию

5. Материалы других компонентов уплотнения вала

Как и поверхности уплотнения и эластомеры, прочие детали торцевого уплотнения также должны быть подобраны в соответствии с условиями применения. Количество деталей торцевого уплотнения зависит от сложности его конструкции.

Детали, передающие крутящий момент

Для передачи крутящего момента от поверхностей уплотнения на вал и корпус насоса могут использоваться металлические или полимерные детали. Это особенно важно в случае использования пары твердых материалов, создающих большое трение. Металлические детали часто изготавливают из нержавеющей стали с устойчивостью к коррозии, аналогичной другим деталям насоса или превышающей этот уровень. Полимеры или штампованный листовый металл часто используются для торцевых уплотнений серийного производства. Порошковые металлические детали могут использоваться для небольших серий и механически обработанных деталей, выпускаемых в небольшом количестве.

Торцевое уплотнение вала может закрепляться на валу разными способами, но наиболее распространенным является крепление с помощью винтиков из нержавеющей стали или компрессионного фитинга.

Пружины и компенсаторы

Металлические пружины используются для того, чтобы прижать поверхности уплотнения вала и резиновых сильфонных уплотнений друг к другу. Для пружин используются сплавы, характеризующиеся различными уровнями устойчивости к коррозии.

Компенсаторы сильфонных уплотнений могут использоваться для обеспечения усилия, которое прижимает поверхности уплотнения друг к другу. Это относится как к металлическим компенсаторам, так и к полимерным и резиновым компенсаторам. Металлические компенсаторы изготавливаются из очень тонкого листового материала. Часто они подвергаются деформации в холодном состоянии для обеспечения высокого предела текучести. Размер зерна материала должен быть маленьким по сравнению с толщиной компенсатора.

Степень устойчивости материалов, используемых для компенсаторов упомянутых выше типов, к коррозии должна превышать устойчивость других деталей насоса.

Направляющие

Торцевые уплотнения для высокого давления могут включать в себя полимерные или металлические диски для того, чтобы свести к минимуму зазор между вращающейся поверхностью уплотнения и валом/муфтой. Это снижает риск выдавливания кольцевого уплотнения (см. рис. 5.19, стр. 86). Сильфонные уплотнения могут иметь полимерные или металлические направляющие для размещения вращающейся поверхности уплотнения по центру вала.

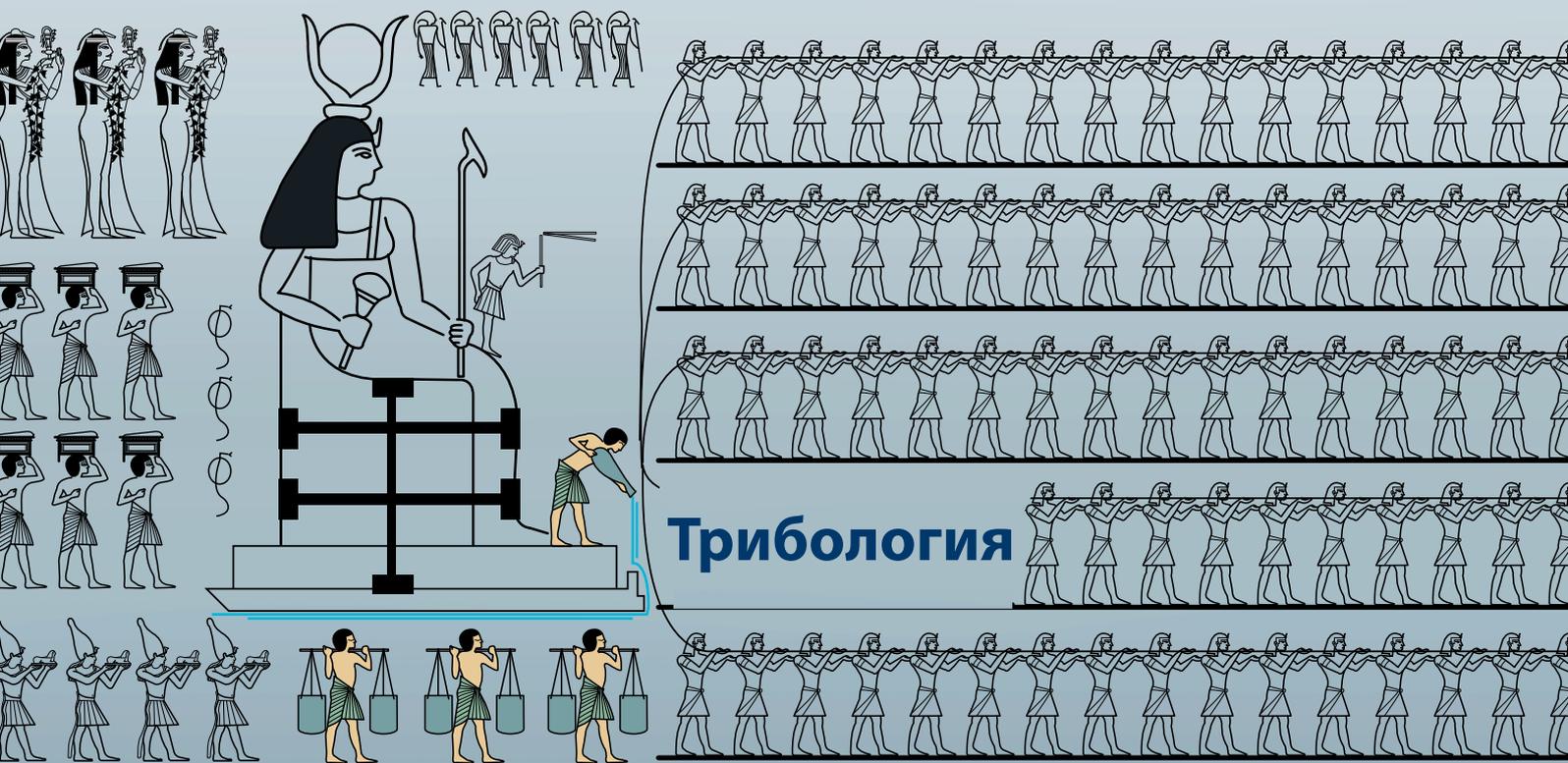
Трубки, пробки и держатели

Трубки и пробки для картриджных уплотнений могут изготавливаться из металла или жестких полимеров. Это также относится к держателям для уплотнительных колец и зажимным кольцам для резиновых деталей. Выбор материала зависит от устойчивости к коррозии, прочности и необходимого постоянства размеров, а также количества установленных одинаковых уплотнений.

Выводы:

Материалы для торцевых уплотнений вала должны выбираться в соответствии с условиями применения. Необходимо учитывать устойчивость к химическому воздействию, рабочий температурный диапазон, коэффициент трения и износостойкость.

Глава 4



1. Смазка
2. Износ

Наука о трении, износе и смазке называется трибологией. Слово происходит от греческого «tribos», что означает «трение». Как указано в главе 1, поверхности торцевого уплотнения вала трутся друг о друга при наличии очень тонкой смазочной пленки между ними.

Трибология – это очень древняя наука. На древней египетской надписи, подобной представленной на рис. 4.1., показано как 172 раба могли тащить большую статую на санях.

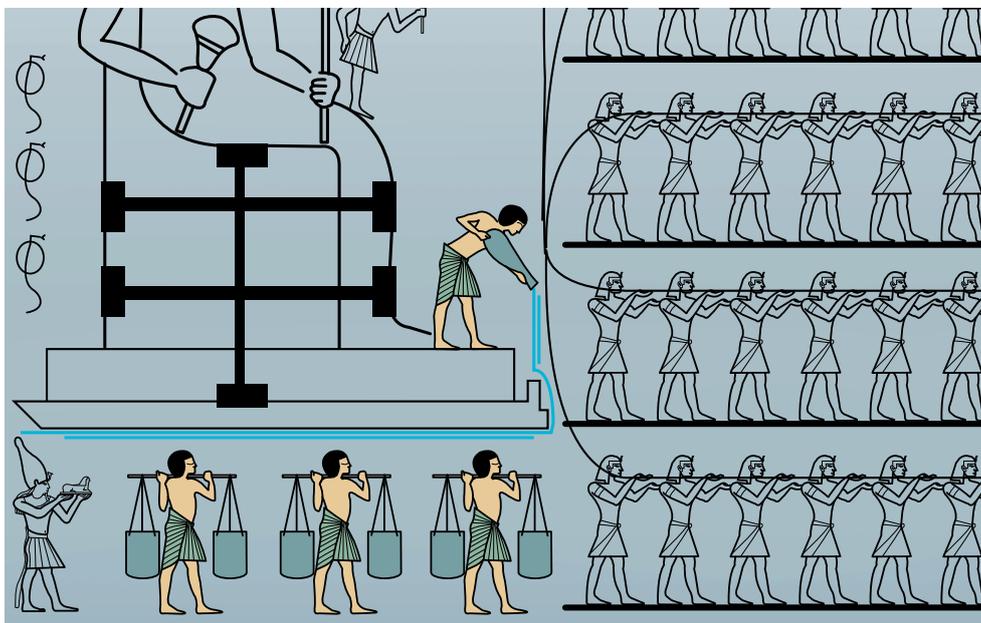


Рис. 4.1. Предполив, что сани сделаны из дерева и скользили по деревянной поверхности, можно рассчитать, что это возможно только при условии смазки водой. Человек, стоящий на санях, льет воду под сани для смазки, а еще три раба подносят ему воду.

1. Смазка

Распределение давления в смазочной пленке состоит из гидростатической и гидродинамической составляющих. Гидростатическая составляющая возникает из-за разности давлений на стороне перекачиваемой жидкости и атмосферы. Гидродинамическое давление возникает при работе насоса из-за скольжения поверхностей. Различные системы смазки для гидродинамического давления часто описываются с помощью так называемой кривой Штрибека (см. рис. 4.2).

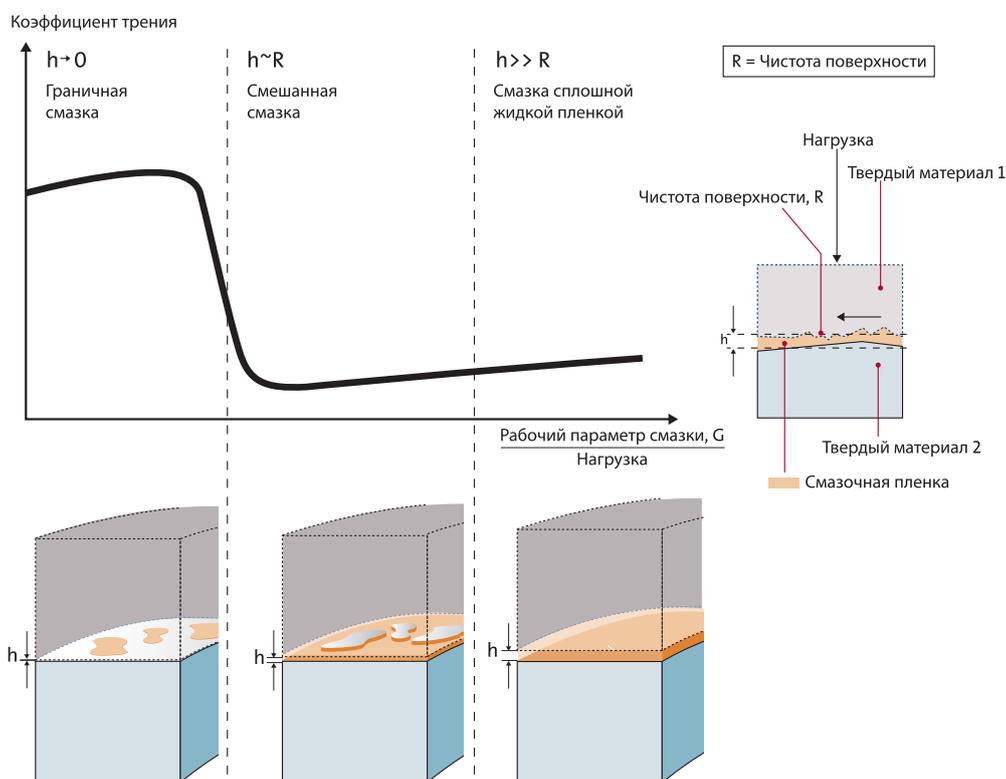


Рис. 4.2. Кривая Штрибека, представляющая различные способы смазки

При высоких скоростях и небольших нагрузках гидродинамическое давление полностью разделяет скользящие детали, обеспечивая возможность образования сплошной жидкой смазочной пленки. При более низких скоростях или больших нагрузках гидродинамического давления недостаточно для того, чтобы полностью разделить скользящие детали. В этом случае имеет место смешанная смазка, когда часть нагрузки несут непосредственно точки касания поверхностей. Рельеф поверхности влияет на то, где будет обеспечена смешанная смазка. При еще более низких скоростях или больших нагрузках, создаваемое гидродинамическое давление становится недостаточным. Эта система смазки называется граничной смазкой. Толщина смазочной пленки торцевого уплотнения вала должна быть очень маленькой, чтобы предотвратить чрезмерную утечку. Соответственно, для уплотнения всегда используется смешанная или граничная система смазки.

Рабочий параметр смазки (G)

Значение на оси абсцисс на рис. 4.2 называется рабочим параметром смазки, определяемым по следующей формуле:

$$G = \frac{\eta \omega}{k \Delta p + p_s}$$

h : динамическая вязкость

w : Угловая скорость ($2\pi \cdot v$ [c^{-1}])

k : коэффициент балансировки уплотнения

Δp : перепад давлений на поверхности уплотнения

p_s : давление в зазоре уплотнения, вызванное пружиной.

Более подробную информацию о рабочем параметре смазки можно найти в [1].

Для небольших значений G утечка очень мала, и уплотнение работает в режиме граничной смазки. В случае высоких значений рабочего параметра может быть обеспечена даже смазка полной пленкой.

Примеры:

Рабочий параметр G в воде для подпитки котла обычно составляет 10-8, в холодной питьевой воде – 10-7, а в сырой нефти – 10-5.

Описание системы смазки рабочим параметром основано не на физическом расчете, а скорее на эмпирических исследованиях/методах, базирующихся на имеющейся практике. В следующем разделе приводятся дополнительные описания гидродинамической смазки с точки зрения физических свойств.

Распределение гидродинамического давления

В системе смазки сплошной жидкой пленкой трение между поверхностями, движущихся относительно друг друга с относительной скоростью v_0 , определяется «внутренним трением» в смазочной пленке. Прочность жидкости на сдвиг называется динамической вязкостью и обозначается символом η .

В случае двух плоских поверхностей, движущихся относительно друг друга со скоростью v_0 и разделенных жидкостью с вязкостью η , молекулы жидкости, как правило, сцепляются с поверхностями. Соответственно, скорость жидкости рядом с поверхностью практически равна скорости поверхности. Если расстояние между поверхностями небольшое, поток жидкости является ламинарным (безвихревым). В этом случае скорость линейно увеличивается между двумя поверхностями; сила F , необходимая для поддержания движения поверхности, пропорциональна площади поверхности A и деформации сдвига v_0/h , где h соответствует расстоянию между поверхностями (см. рис. 4.3).

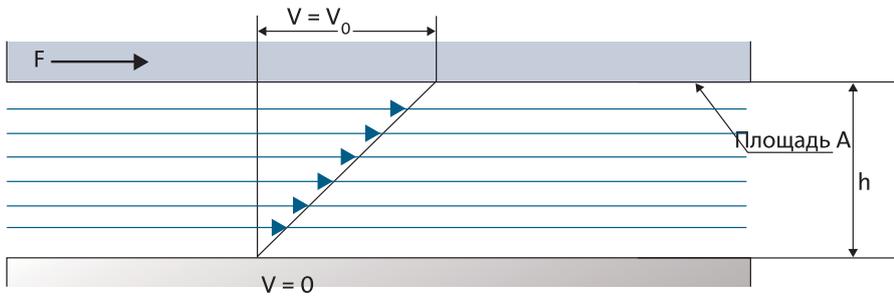


Рис. 4.3. Распределение скоростей и прочность на сдвиг F пленки жидкости между двумя параллельными поверхностями

Таким образом, касательное напряжение F/A пропорционально изменению деформации сдвига, v_0/h :

$$F/A = h v_0/h$$

Либо в более общем случае касательное напряжение определяется как:

$$t = h \partial v / \partial h \quad (\text{Ньютоновские жидкости})$$

В случае параллельных поверхностей, представленных на рис. 4.3, распределение скоростей не приведет к повышению давления. Если одна из поверхностей слегка наклонена, жидкость будет вытеснена на меньший по площади участок и, соответственно, сжата. Это приведет к повышению давления и создаст распределение давлений между поверхностями (см. рис. 4.4).

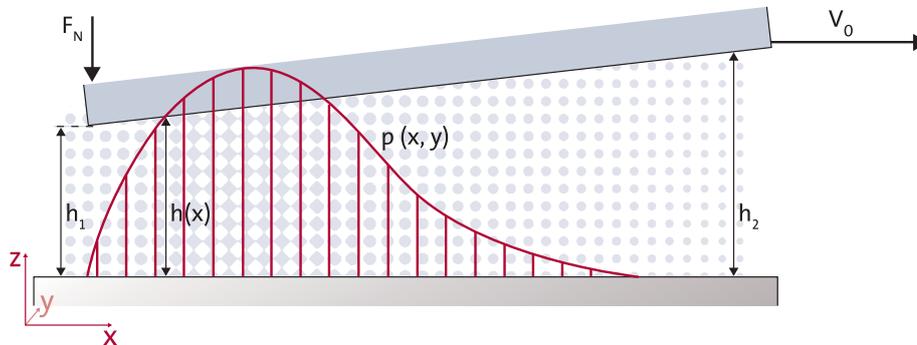


Рис. 4.4. Слегка наклоненная подвижная поверхность, создающая профиль давления

Для данной схемы профиль давления можно рассчитать, используя уравнение Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3(x) \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3(x) \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6v \cdot \eta \frac{\partial h(x)}{\partial x}$$

Рассчитанная смазочная пленка зависит от скорости v_0 и нагрузки F_N . При этом во всех случаях распределение давления, создаваемого между поверхностями, не сможет отделить поверхности на расстояние, сопоставимое с высотой клина ($h_2 - h_1$). Более подробную информацию о теории смазки можно найти в источнике [2].

Неровность поверхностей уплотнения

Чтобы свести утечку к минимуму, поверхности торцевого уплотнения должны быть плоскими. Соответственно, между поверхностями уплотнения, вращающимися относительно друг друга, не должно образовываться гидродинамическое давление.

Обычно плоские поверхности уплотнения обрабатывают путем шлифовки. Тем не менее, даже очень тщательно обработанные поверхности не являются совершенно плоскими. Некоторая неровность поверхности порядка 1/10 000 мм всегда сохраняется, т.е. при относительном вращении может создаваться гидродинамическое давление. Это давление увеличивает толщину смазочной пленки, что приводит к увеличению утечки (см. рис. 4.5).

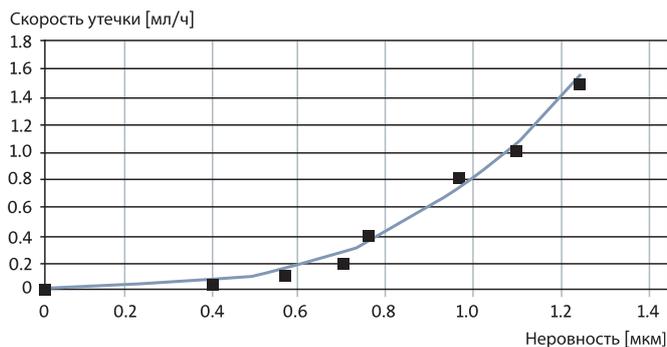


Рис.4.5. Пример измеренной утечки в виде функции волнистости

Неровность также является следствием механической и температурной деформации, но в большинстве случаев возникающее в результате гидродинамическое давление является недостаточным для того, чтобы полностью разделить поверхности. Влияние неровности на распределение гидродинамического давления дополнительно описывается в источнике [3].

Итак, оптимальное соотношение между смазкой и утечкой достигается при шлифовке поверхности, т.е. при обеспечении максимальной плоскостности.

Гидродинамические канавки

В уплотнениях вала для жидкостей с очень низкой вязкостью, например, горячей воды и газов, гидродинамическую смазку можно увеличить, сделав канавки на вращающемся кольце или "седле" (см. рис. 4.6 и 4.7).



Рис. 4.6. Гидродинамические канавки в кольцах уплотнения для горячей воды

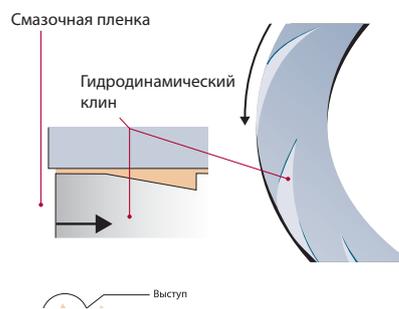


Рис. 4.7. Гидродинамические клинья на поверхности уплотнения

Под действием температурной деформации на поверхности уплотнения рядом с канавками образуется термический клин (см. рис. 4.6).

Канавки на поверхности уплотнения смещают зону испарения ближе к атмосферной стороне уплотнения [4].

За каждой последующей канавкой создается область повышенного давления. Такая конструкция позволяет перекачиваемой жидкости легко проникнуть в зазор уплотнения; область герметичности сохранится на атмосферной стороне уплотнения.

Более эффективный способ повышения гидродинамического давления состоит в механической нарезке небольших желобков на поверхности уплотнения с созданием клина в направлении зазора уплотнения. Это распространенная конструкция для газовой среды, где гидродинамическое давление необходимо даже при очень низкой вязкости (см. рис. 4.7).

Чистота поверхностей уплотнения

Трение и износ определяются площадью и рельефом контактных поверхностей. Такой параметр чистоты, как значение шероховатости R_a , характеризует среднее значение чистоты, но не форму рельефа. Для описания трения, износа и смазки (трибологических характеристик) поверхностей лучше использовать «кривую контактной поверхности» (ВАС). ВАС описывает контактную поверхность с помощью воображаемой плоскости как функции расстояния. Эта плоскость проецируется на поверхность (см. рис. 4.8). Необходимая область на определенных уровнях именуется значением «относительного коэффициента материала» (R_{mr}) на соответствующем уровне.

На рис. 4.8 показан R_{mr} опорной поверхности 5%, 40% и 80% для различной глубины (неровности) поверхности. Процент рассчитывается как отношение длины жирной линии к общей длине.

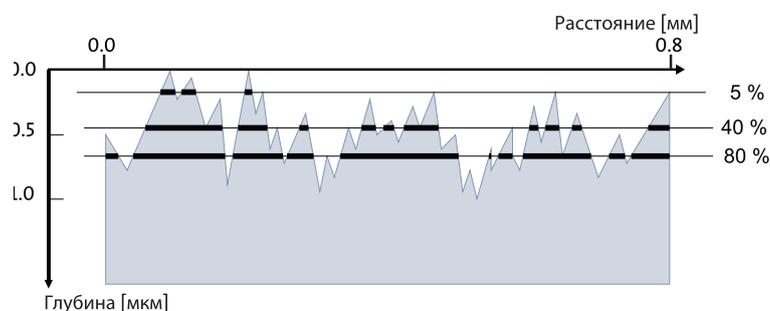


Рис. 4.8. Поперечное сечение поверхности и получение ВАС

Значение ВАС определяется способом механической обработки поверхности (см. рис. 4.9).

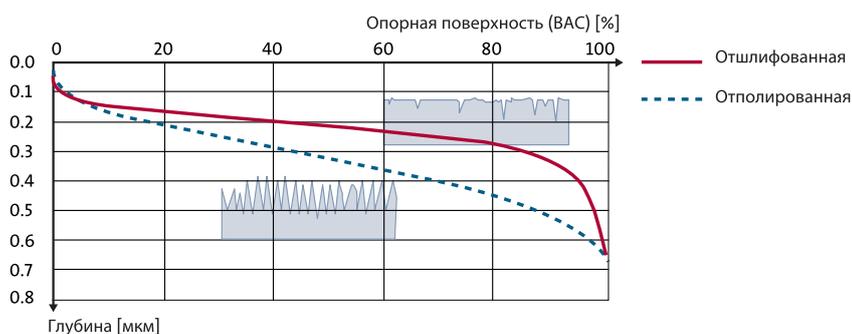


Рис. 4.9. Примеры значений ВАС для отполированной и отшлифованной поверхностей

Отшлифованная поверхность представляет собой плоский участок с несколькими впадинами. Соответственно, опорная поверхность быстро увеличивается вглубь до достижения большой области. Площадь отполированной поверхности, напротив, медленно увеличивается с глубиной, что указывает на более равномерное распределение впадин и вершин.

На рис. 4.10 показано как изменяется скорость утечки в зависимости от направления царапин на поверхности. Стрелки указывают направление вращения уплотнения. В соответствии с рис. 4.10 смазочная пленка может быть сдвинута на сторону перекачиваемой жидкости или атмосферы в зависимости от направления царапин на поверхности.

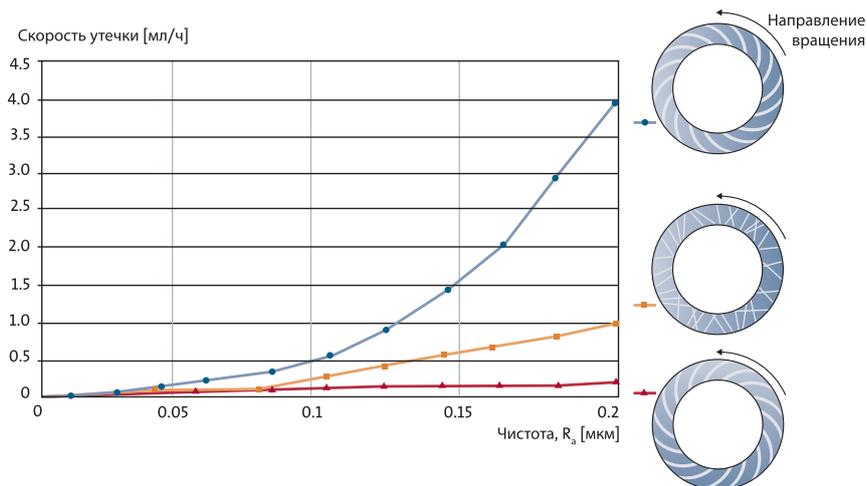


Рис. 4.10: Измеренная степень утечки как функция значения чистоты R_a , и направление царапин на поверхности

Типичным рельефом поверхности уплотнения является статистическое распределение царапин во всех направлениях, полученное после шлифовки. С помощью шлифовки может быть создана блестящая поверхность с небольшими шероховатостями. Тем не менее, если обе поверхности уплотнения изготовлены из твердых материалов, одна из поверхностей должна иметь матовую отделку, чтобы предупредить заклинивание колец уплотнения во время простоя.

Для матовой поверхности, отшлифованной до значения R_a 0,2, период притирки может составить несколько дней.

Текстура поверхности

Варьирование текстурой поверхности является одним из способов увеличения смазочной пленки в уплотнении, работающем при температуре выше точки кипения жидкости (например, в воде температурой выше 100°C). При эксплуатации уплотнения при температуре ниже точки кипения не происходит какого-либо значительного увеличения утечки (см. источник [7]). Карманы на поверхности уплотнения заполняются перекачиваемой средой и, следовательно, выступают в качестве дополнительных резервуаров, что предупреждает полное испарение смазочной пленки. Изменение текстуры поверхности можно обеспечить путем лазерной обработки или травления.

Если поверхности уплотнения изготавливаются из материала с закрытыми порами, поверхности уплотнения обладают достаточной текстурой (являются текстурированными). Преимущество пористых колец уплотнения состоит в том, что поверхность остается текстурированной, даже когда кольца изнашиваются.

Гидростатическая смазка

Как описано в главе 1 (см. рис. на стр.14), гидростатическое давление линейно понижается на протяжении зазора уплотнения с параллельными поверхностями, тогда как в случае расходящегося или сходящегося зазора уплотнения понижение является нелинейным (см. рис. 1.21 и 1.22, стр. 19).

Испарение жидкости в зазоре уплотнения также влияет на распределение давления. Пар обладает значительно меньшей вязкостью, чем жидкость, и, соответственно, испаряющаяся жидкость быстро покидает зазор уплотнения. С другой стороны, плотность испаряющейся жидкости значительно ниже, чем плотность жидкости, что означает, что ее объем увеличивается при испарении.

Таким образом, испарение может повысить гидростатическое давление выше уровня, соответствующего линейному снижению, и переместить зону испарения ближе к стороне атмосферы (см. рис. 4.11).

Примеры расчетов распределения гидростатического давления в зазорах уплотнения с испарением смотрите в источнике [5].

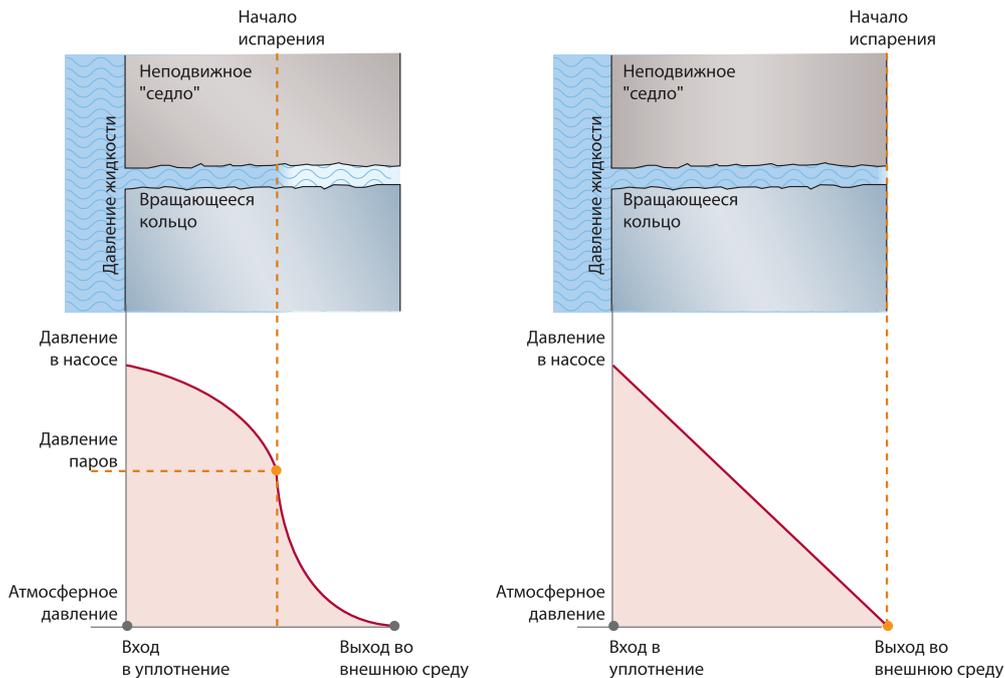


Рис. 4.11. Испарение в зазоре уплотнения может повысить давление в зазоре, так как перекачиваемая жидкость при испарении расширяется.

Работа без смазки (“сухой ход”)

Торцевые уплотнения должны смазываться и охлаждаться жидкостью. Уплотнение вала будет повреждено при работе без жидкости. В отсутствие смазочной пленки в зазоре уплотнения выделяющаяся при трении теплота рассеивается в кольца уплотнения и вызывает повышение температуры колец уплотнения до нескольких сот градусов Цельсия через несколько минут после начала работы без смазки.

Высокая температура вызывает повреждение вторичных уплотнений из эластомеров.

Достигнутая температура и время, затрачиваемое на достижение этой температуры, во многом зависят от материалов и конструкции уплотнения.

Уплотнения вала с одной поверхностью из графита могут работать без смазки в течение нескольких часов без серьезных повреждений деталей уплотнения.

2. Износ

Износ – это нежелательное удаление материала с поверхности. Износ поверхности возникает в результате целого ряда процессов. В зависимости от процесса, вызвавшего износ, выделяют четыре наиболее частых типа износа (см. источник [6]):

- адгезионный износ;
- абразивный износ;
- коррозионный износ;
- усталостный износ.

Адгезионный износ

Даже макроскопически гладкие поверхности являются шероховатыми на атомном уровне. Когда две такие поверхности соединяются, контакт возникает в местах расположения изолированных шероховатых выступов. При приложении обычной нагрузки локальное давление в местах расположения шероховатостей становится чрезвычайно высоким. В отсутствие смазочных пленок такие поверхности сцепляются друг с другом. Тем не менее, даже небольшое количество смазки предупреждает сцепление (см. рис. 4.12).

Касательное движение одной поверхности относительно другой может привести к тому, что в точке касания исчезнет смазывающая пленка и поверхности соединятся (произойдет слипание).

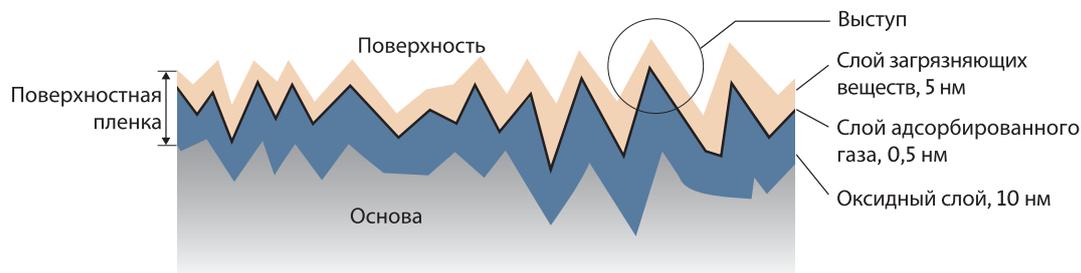


Рис. 4.12. Поверхность материала с загрязняющими веществами

Непрерывное скольжение приводит к тому, что места соединения сдвигаются, и появляются новые соединения. Это и есть процесс адгезионного износа.

Рельеф поверхности очень важен для предотвращения адгезионного износа, так как он определяет контактное напряжение в местах расположения выступов.

Выбранные для поверхностей уплотнения материалы не должны легко слипаться для предупреждения адгезионного износа.

Абразивный износ

Абразивный износ или истирание представляет собой процесс образования борозд в поверхности путем механического воздействия твердыми частицами.

Когда такими частицами являются выступы на другой поверхности, речь идет об истирании закрепленным абразивом. В результате на подверженной такому воздействию поверхности образуются равномерные желобки.

Процесс истирания называют эрозией, если частица натывается на поверхность, и кинетическая энергия частицы способствует удалению материала с поверхности. В этом случае можно наблюдать более хаотичный износ, напоминающий пескоструйную очистку.

Твердые частицы, задержавшиеся между двумя поверхностями скольжения, могут вызвать серьезные повреждения. Это называется истиранием незакрепленным абразивом (см. рис. 4.13).

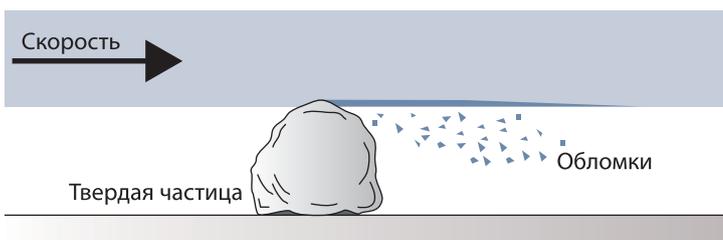


Рис. 4.13. Истирание незакрепленным абразивом

Истирание незакрепленным абразивом также проявляется в виде равномерных желобков на поверхности (см. рис. 5.12, стр. 84).

Устойчивость к истиранию зависит от пластичности поверхности, а также ее твердости относительно материала, вызывающего истирание. Чем пластичнее поверхность, тем больше тенденция к пластичной деформации вместо точечного удаления частиц, т.е. тем меньший износ.

Коррозионный износ

На поверхностях, которые трутся друг о друга в агрессивных средах, могут образовываться продукты реакции. Эти продукты часто обладают низким сцеплением с поверхностью. Они могут удаляться при трении и, в конечном итоге, вызывать абразивный износ.

Коррозионный износ может наблюдаться на уплотнениях вала с твердыми поверхностями в агрессивной среде. Это может быть вызвано коррозией связующего вещества материала поверхности, при которой от материала будут отделяться твердые частицы.

Усталостный износ

Поверхности, многократно подвергаемые большим нагрузкам, могут изнашиваться из-за усталости.

Например, для подшипников, это механические нагрузки.

На поверхности уплотнения самую большую нагрузку оказывают перепады температур, вызываемые теплотой трения и испарением. Поверхности из карбида кремния (SiC) могут изнашиваться в горячей воде. Это может быть абразивный износ, так как зерна SiC отделяются из-за термической усталости. Отделившиеся зерна вызывают истирание поверхностей, создавая впечатление, что причиной износа является абразивный износ. Но этот тип износа наблюдается только при превышении предельных значений давлений и температур при стабильном трении. Термическая усталость SiC может являться комплексным процессом, включающим испарение, кавитацию и коррозию.

Выводы:

В разделе описаны процессы изменения давления в смазочной пленке и различные механизмы износа поверхностей уплотнения. Давление в смазочной пленке повышается, если на поверхности уплотнения есть клин, направленный в сторону движущихся поверхностей, или если между поверхностями уплотнения происходит испарение. Клин появляется при неровности поверхности уплотнения, в случае наличия гидродинамических канавок или поверхностной текстурности.

Самыми распространенными типами износа являются: адгезионный износ, при котором поверхности уплотнения слипаются, абразивный износ, характеризующийся образованием борозд, коррозионный или усталостный износ либо сочетание этих типов износа.

- [1] B.S. Nau: "Hydrodynamic Lubrication in Face Seals", 3th Int. Conf. on Fluid Sealing (1967).
- [2] Bernard J. Hamrock: "Fundamentals of Fluid Film Lubrication".
- [3] A.O. Lebeck: "Face Seal waviness, prediction, measurement, causes and effects", 10th Int. Conf. on Fluid Sealing (1984).
- [4] L.E. Hershey: "Extending Mechanical Seal Service Life when operating in hot Water", 7th Int. Conf. on Fluid Sealing (1975) .
- [5] P. Waidner: "Evaporation in the gap of face seals – Theoretical calculations and results for hot water applications", 12th Int. Conf. on Fluid Sealing (1989).
- [6] J.T. Burwell: "Survey of possible wear mechanisms", Wear 1 (1957), p 119 – 141.
- [7] I. Etsion: " A Model for Mechanical Seal with Regular Microsurface Structure", Tribology Transactions, vol. 39 (1996), p 677-683.

Глава 5



Повреждения торцевых уплотнений вала

1. Введение
2. Повреждения вследствие отсутствия смазки
3. Повреждения вследствие загрязнения
4. Повреждения вследствие химического и физического воздействия
5. Повреждения вследствие неправильной установки
6. Повреждения системы уплотнения
7. Анализ повреждений уплотнения вала

1. Введение

Повреждение торцевого уплотнения является самой распространенной причиной простоя насоса. Состояние уплотнение вала зависит от различных факторов условий эксплуатации. Иногда при работе насоса условия эксплуатации изменяются и становятся отличными от тех, на которые был рассчитан насос, и, соответственно, уплотнение вала.

На графиках (рис. 5.1 и 5.2) показано, что повреждение уплотнения вала, несомненно, является самой распространенной причиной поломки насоса.

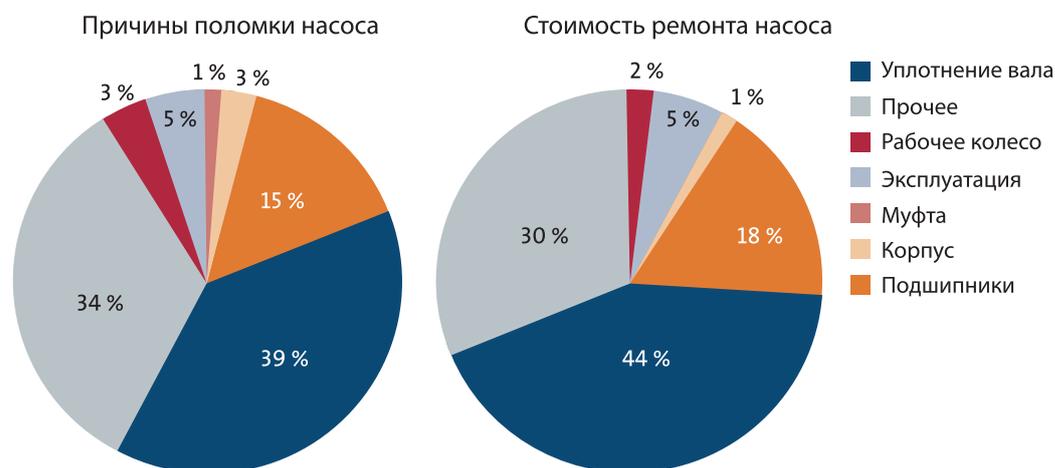


Рис. 5.1 Распределение причин поломки насоса. В 39 % случаев поломки причиной является уплотнение вала (см. источник [1])

Рис. 5.2. Распределение расходов на ремонт насоса. Замена уплотнений вала составляет 44 % расходов на ремонт насоса (см. источник [1])

Характер повреждения уплотнения вала значительно зависит от конструкции (типа) уплотнения и пары материалов поверхностей. Для кольцевых уплотнений вала с динамическим уплотнительным кольцом и одной поверхностью уплотнения из угольного графита характерными повреждениями являются износ поверхностей уплотнения и заедание уплотнения, препятствующие осевому движению динамического уплотнительного кольца и кольца уплотнения. Для торцевых уплотнений с поверхностями из твердых материалов характерными повреждениями являются повреждения, вызванные работой без смазки.

Для проведения анализа причин повреждения уплотнения вала и последующего предупреждения новых повреждений требуется подробная информация о работе уплотнения. На поврежденном уплотнении вала можно увидеть, что именно было повреждено, но причину повреждения часто нужно искать, руководствуясь информацией о насосе и условиях его работы. Эта информация должна заноситься в отчет о повреждении (см. анализ повреждений уплотнения вала, стр. 89-91).

Далее приведены примеры самых распространенных причин нарушений торцевых уплотнений вала.

2. Повреждения вследствие отсутствия смазки

Работа торцевых уплотнений с поверхностями из твердых материалов зависит от смазки перекачиваемой жидкостью. Работа без смазки и недостаточная смазка могут привести к повреждениям, описанным ниже.

Работа без смазки

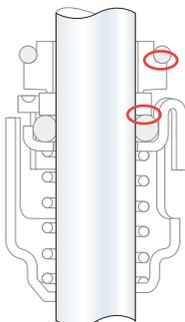


Рис. 5.3. Повреждение поверхности, вызванное воздействием высокой температуры на вторичные уплотнения из EPDM и FKM

Работа без смазки наблюдается, когда в районе уплотнения либо в насосе в целом нет жидкости, либо из-за недостаточной вентиляции, приводящей к скоплению воздуха вокруг уплотнения. Отсутствие смазывающей пленки приводит к усилению трения поверхностей уплотнения и, соответственно, резкому повышению температуры. При отсутствии жидкости отвод тепла происходит через уплотнение, - при этом температура многих твердых поверхностей уплотнения достигает нескольких сот градусов Цельсия за несколько минут. Поэтому типичным повреждением, вызываемым работой без смазки, является обжиг деталей из эластомеров. Повреждение происходит в месте соприкосновения эластомера с горячей поверхностью уплотнения (см. рис. 5.3).

Недостаточная смазка

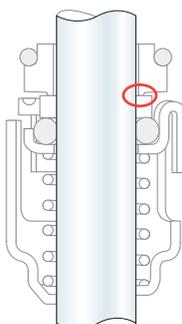


Рис. 5.4. Сильное термическое растрескивание поверхности уплотнения из WC, вызванное недостаточной смазкой

Так же как и в случае работы без смазки, выделяющаяся при трении в результате недостаточной смазки теплота также может стать причиной повреждений. Недостаточность смазки возникает, если перекачиваемая жидкость имеет очень низкую вязкость или если температура жидкости значительно выше ее точки кипения при атмосферном давлении. При таких условиях выделяющаяся при трении теплота, которая рассеивается на небольших участках поверхности уплотнения, может создавать очень высокую температуру. Сменяющие друг друга местное нагревание и охлаждение поверхностей уплотнения может привести к образованию небольших радиальных термических трещин на поверхностях уплотнения (см. рис. 5.4).

Шум

В случае недостаточной смазки или при ее полном отсутствии уплотнение вала с поверхностями из твердых материалов может создавать громкий шум при работе. В зависимости от конструкции уплотнения, используемых твердых материалов и режима работы насоса, шум может быть постоянным или периодическим.

Когда торцевое уплотнение шумит, некоторые его части вибрируют. Это может сократить срок службы уплотнения. В частности, металлические сильфонные уплотнения имеют тенденцию к усталости, вызываемой вибрациями.

3. Повреждения вследствие загрязнения

Перекачиваемая среда часто представляет собой смесь жидкостей и растворов твердых веществ, а также небольших взвешенных нерастворимых частиц.

Смазочная пленка в зазоре уплотнения подвергается большим перепадам температур, давлений и скоростей. Это повышает риск выпадения осадка в зазоре уплотнения или рядом с ним.

Заклинивание

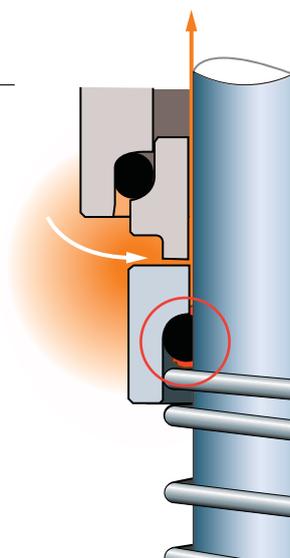


Рис. 5.5.
Схема блокировки осевого движения вращающейся поверхности уплотнения

Заклинивание торцевого уплотнения означает, что осевое движение вращающейся части уплотнения вала заблокировано. В основном, заклинивание происходит в кольцевых уплотнениях, но также наблюдается и в сильфонных уплотнениях, хотя в основе лежит другой механизм. В кольцевом уплотнении отложения могут накапливаться на валу рядом с уплотнительным кольцом, препятствуя его свободному скольжению. При изменении температуры или давления в системе, размеры деталей насоса меняются, поэтому для непрерывной работы уплотнительное должно свободно скользить по валу или муфте (см. рис. 5.5).

Если резиновое сильфонное уплотнение эксплуатируется при температурах, близких к допустимым максимальным значениям для резины и к допустимым максимальным значениям для уплотнения, внутренние поверхности компенсатора начинают прилипать к валу, что приводит к заклиниванию. Это относится и к уплотнениям из эластомеров, так как некоторые виды эластомеров, например FKM, имеют свойства прилипать к нержавеющей стали. Заклинивание не всегда можно выявить во время анализа повреждения, так как зачастую уплотнение уже было разобрано.

Расширение зазора уплотнения

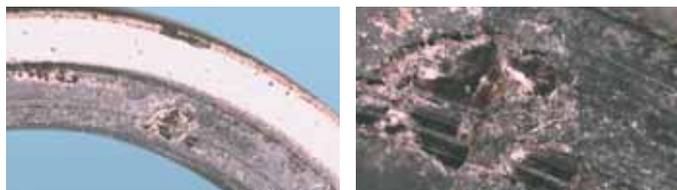
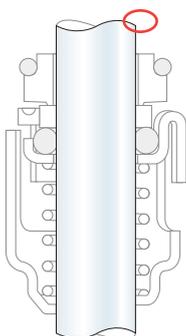


Рис. 5.6. Отложения на поверхности уплотнения из угольного графита

Некоторые суспензии и растворы могут вызывать образование наростов из отложений на поверхностях уплотнений. Так как эти отложения покрывают только часть поверхностей уплотнений, зазор уплотнения раскрывается, что приводит к утечке через уплотнение вала. Сначала утечка небольшая, но чем больше жидкости попадает в зазор уплотнения, тем интенсивнее становится утечка. При этом образование осадка будет ускоряться, так как температура на поверхности уже закрепившихся отложений будет расти (см. рис. 5.6).

Засорение

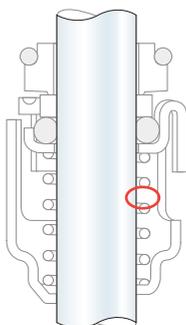
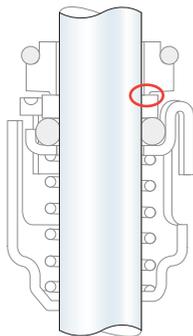


Рис. 5.7. Металлическое сильфонное уплотнение, засоренное скоплением известковой накипи

Если в перекачиваемой жидкости содержится большое количество взвешенных частиц и волокон, уплотнение может быть повреждено из-за отложений или скопления частиц и волокон на пружинах, компенсаторах, оправках уплотнения или уплотнительных кольцах. На скорость оседания влияют тип перекачиваемой жидкости и параметры потока вокруг уплотнения. В редких случаях оседание на металлических сильфонных уплотнениях вала может препятствовать работе компенсатора как осевой пружины (см. рис. 5.7). Впоследствии, когда условия эксплуатации изменятся, уплотнение может раскрыться. Это обусловлено тем, что при изменении условий эксплуатации вызывает необходимость в осевом сжатии компенсатора. Для засоренного осадками компенсатора замыкающее усилие уплотнения может быть очень большим, что может привести к избыточному механическому напряжению, действующему на детали уплотнения, или повреждению уплотнения из-за недостаточной смазки.

Частицы и отложения

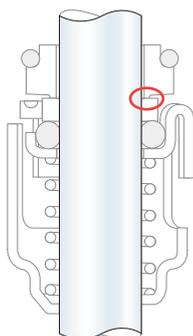


Небольшие количества твердых частиц на поверхностях уплотнений вызывают увеличение износа, особенно в случае использования в паре материалов поверхностей сочетания твердый/мягкий. В таких случаях небольшие твердые частицы могут проталкиваться в более мягкую поверхность уплотнения и затем действовать на твердую поверхность как шлифовальный инструмент.

Попадание посторонней частицы в зазор между поверхностями уплотнения вызывает увеличение степени утечки до тех пор, частица не будет перемолота и смыта. Рассмотрим такой пример:

Человеческий волос имеет толщину 50-100 мкм, в то время как зазор уплотнения, работающего при нормальных условиях эксплуатации, имеет толщину всего 0,3 мкм. Таким образом, человеческий волос толщиной 60 мкм в 200 раз толще, чем нормальный зазор уплотнения. Степень утечки пропорциональна толщине зазора уплотнения, возведенной в третью степень (см. формулу 2, стр. 18). Т.е. если человеческий волос застрянет между поверхностями уплотнения, степень утечки будет в $200^3 = 8\,000\,000$ раз больше степени утечки через уплотнение вала с чистыми поверхностями уплотнения (без волоса).

Заедание



Заедание возникает, когда две поверхности уплотнения зацепляются или частично прилипают друг к другу.

Зацепление приводит к повреждению уплотнения, если сила сцепления выше, чем пусковой крутящий момент двигателя. Оно также может привести к механическому повреждению деталей уплотнения.

Заедание может быть вызвано различными причинами. В основном, тенденцию к заеданию имеют уплотнения с сочетанием в поверхностях двух твердых материалов. Основными причинами заедания являются отложения на поверхностях уплотнения липких составляющих из перекачиваемой жидкости или коррозия поверхностей уплотнения.

Заедание возможно только в уплотнениях вала насосов с режимом работы пуск/остановка. Период, в течение которого происходит склеивание колец уплотнения, варьируется от нескольких часов и более, в зависимости от перекачиваемой жидкости. При повышенных температурах процесс ускоряется.

4. Повреждения вследствие химического и физического воздействия

Все детали торцевого уплотнения должны обладать достаточной устойчивостью к химическим и физическим факторам воздействующей среды для работы в течение всего срока службы. Повышенные температуры и чрезмерные химические или механические нагрузки сокращают срок службы уплотнения. Качественная работа уплотнения обеспечивается в определенных диапазонах температур и нагрузок; при превышении предельных значений происходит повреждение и быстрое разрушение.

При этом детали из эластомеров могут иметь множество различных повреждений, такие как газовые раковины, трещины, полости или обесцвечивание. В некоторых случаях разрушение может определяться только путем измерения физических свойств. Недопустимое химическое и/или температурное воздействие способствует полному разрушению уплотнения.

Набухание эластомеров

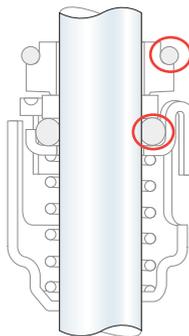


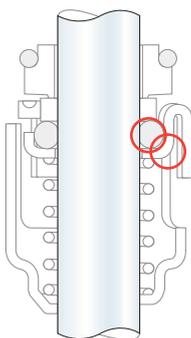
Рис. 5.8. Новое уплотнительное кольцо из EPDM (слева) и набухшее уплотнительное кольцо из EPDM (справа), подверженное воздействию воды, содержащей минеральное масло

Набухание представляет собой увеличение в объеме и уменьшение жесткости из-за поглощения растворителя. Увеличение объема зависит от типа эластомера, типа и концентрации растворителя, а также температуры и продолжительности воздействия. В редких случаях набухшая резиновая детали может увеличиться в объеме вдвое.

Работа многих типов уплотнений вала во многом зависит от геометрии резиновых деталей. Следовательно, даже незначительные изменения размеров могут иметь решающее значение. Уменьшение твердости связано с изменениями механических свойств резины. Самый распространенный материал EPDM демонстрирует высокую степень набухания при воздействии минерального масла, при этом набухание происходит независимо от концентрации масла в воде (см. рис. 5.8). Тем не менее, чем меньше концентрация, тем дольше проработает уплотнение.

Другие типы эластомеров также набухают под воздействием некоторых жидкостей. Как указано выше, набухание является только одним из признаков несовместимости с перекачиваемой жидкостью. Также воздействие перекачиваемой жидкости на эластомер может проявляться как изменения таких физических свойств, как прочность на разрыв, относительное удлинение и твердость. Повышенные температуры и продолжительность воздействий создают более агрессивные условия.

Старение резиновых деталей



Физические свойства торцевого уплотнения могут изменяться в результате старения. Как правило, старение влияет на такие характеристики, как прочность на разрыв и твердость. Разделяют две основных категории старения:

- старение при хранении;
- атмосферное старение.

Старение при хранении, по существу, представляет собой разложение материала в результате окисления. Источниками окисления, кроме самого очевидного – кислорода, являются тепло, свет, внутренняя и внешняя механическая нагрузка или напряжение и активно окисляющиеся металлы.

В противоположность старению при хранении, атмосферное старение возникает в результате воздействия озона. При этом сам механизм воздействия значительно отличается. Если резина подвергается воздействию какой-либо нагрузки, то в результате возникает атмосферное растрескивание, при котором на резине появляются трещины, расположенные перпендикулярно направлению удлинения. Это хорошо видно на поверхности старых велосипедных или автомобильных шин, - глубокие концентрические трещины образуются в местах, где шина сильнее всего деформировалась во время эксплуатации.

Взрывная декомпрессия

Взрывная декомпрессия проявляется на поверхности полимерных деталей в форме вздутия, поверхностных ям или выбоин. Когда перекачиваемая жидкость обладает высоким парциальным давлением газовой фазы, газ может проникать в резину. Если давление понижается, а поглощенный резиной газ не может высвободиться с той же скоростью, с которой понижается давление, внутреннее давление становится избыточным. Если это давление превышает прочность материала, происходит взрыв, обусловленный декомпрессией. Поэтому взрывной декомпрессии подвержены эластомеры с высокой растворимостью газа и низкой механической прочностью.

Коррозия

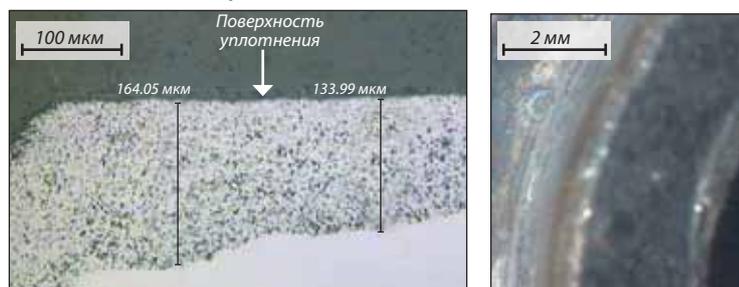
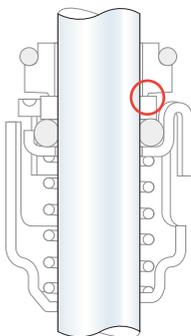
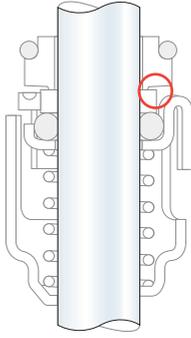


Рис. 5.9. Избирательная коррозия цементированного карбида вольфрама. Фаза металлического связующего вещества подвергнута коррозии, что привело к уменьшению устойчивости к износу

Как правило, поверхности торцевого уплотнения изготавливаются из композитных материалов. Чтобы предотвратить избирательную коррозию, все компоненты материала должны быть устойчивыми к перекачиваемой жидкости. Например, коррозия цементированного карбида вольфрама заключается в воздействии на металлическое связующее вещество. В результате такого воздействия



ухудшаются механические свойства, включая износостойкость. Когда металлическое связующее вещество исчезнет, поверхность станет матовой. Кроме того, избирательная коррозия связующего вещества может вызывать напряжения, приводящие к появлению трещин на кольцах уплотнения (см. рис. 5.9).

На поверхностях уплотнения из других материалов в местах, где фаза связующего вещества была подвержена коррозии, может наблюдаться сильная эрозия (см. рис. 5.10). Например, в насосах из нержавеющей стали карбид вольфрама с кобальтовым связующим веществом корродирует в проточной воде.



Рис. 5.10. Коррозия связующего вещества вызвала сильную эрозию карбида вольфрама с кобальтом в качестве связующего вещества

В керамических материалах, например, в оксиде алюминия, в процессе коррозионного воздействия часто растворяется или окисляется стеклофаза, что приводит к снижению износостойкости. После исчезновения стеклофазы увеличивается пористость поверхности уплотнения, что влияет на механическую прочность уплотнения. В зависимости от марки материала и перекачиваемой жидкости, результат может варьироваться от уменьшения прочности на несколько процентов до полного разрушения материала.

Коррозия редко возникает на металлических деталях уплотнения в насосах из нержавеющей стали, т.к. металлические детали уплотнения обычно изготавливают из более высокого сорта нержавеющей стали по сравнению с другими металлическими деталями насоса.

Износ

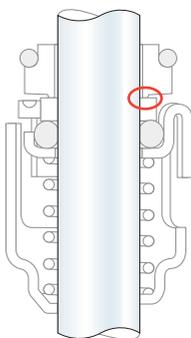


Рис. 5.11. Нормальный износ на поверхности уплотнения из карбида вольфрама

Так как толщина смазочной пленки сопоставима со значением шероховатости поверхности, поверхности уплотнения всегда будут немного изнашиваться. Нормальный износ настолько мал, что уплотнение может служить многие годы (м. рис. 5.11). В редких случаях износ может вызвать проблемы, но зачастую уплотнения отлично функционируют при износе до 0,5-1 мм, если сохраняется осевая гибкость кольца уплотнения.

Износ, продолжение



Рис. 5.12. Глубокие борозды на поверхности уплотнения со стороны перекачиваемой жидкости



Рис. 5.13. Борозды на поверхностях уплотнения в зоне испарения

Глубокие борозды на поверхности уплотнения со стороны перекачиваемой жидкости свидетельствуют о том, что твердые частицы из перекачиваемой жидкости попали в зазор уплотнения (см. рис. 5.12).

Глубокие борозды со стороны атмосферы свидетельствуют о том, что в местах испарения смазочной пленки образовались твердые отложения (см. рис. 5.13).

5. Повреждения вследствие неправильной установки

Иногда повреждения торцевых уплотнений возникают из-за неправильной установки и эксплуатации. Примерами могут служить нарушение соосности вала, установка “седла” не перпендикулярно валу, неверная монтажная длина и т.п.

Несоосность

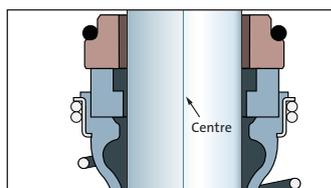
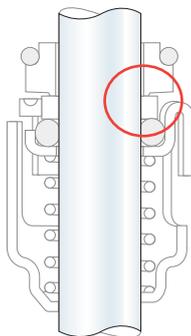


Рис. 5.14. Правильно отцентрированное уплотнение вала

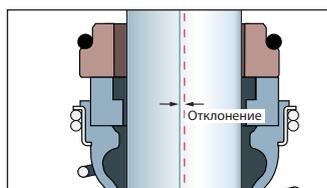


Рис. 5.15. Уплотнение вала с радиальным отклонением

Положение и ширина следов износа на “седле” уплотнения могут говорить о несоосности вала и торцевого уплотнения.

Если ширина следа износа соответствует следу на поверхности скольжения противоположного кольца уплотнения, то уплотнение вала хорошо отцентрировано и не имеет отклонений (см. рис. 5.14).

Если след от скольжения на “седле” шире, чем вращающаяся поверхность скольжения, это указывает на сильное отклонение от оси вала (см. рис. 5.15). Другая возможная причина - несбалансированность тела вращения.

Неодинаковая глубина следов износа “седла” свидетельствует о том, что “седло” установлено под наклоном (криво) (см. рис. 5.16).

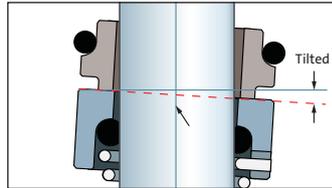
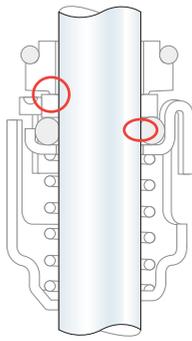


Рис. 5.16. Неодинаковая глубина следов износа на "седле" вследствие наклонной установки



Рис. 5.17. Износ вращающейся поверхности в точке соприкосновения с валом

Если "седло" уплотнения наклонено, наблюдается чрезмерный износ вращающейся поверхности.

Износ вращающейся поверхности сопровождается осевыми царапинами на внутренней поверхности (см. рис. 5.17), если причиной является движение вала или муфты относительно уплотнения. Это может быть осевое движение вала вследствие вибрации или несоосности неподвижного "седла" ("седло" не перпендикулярно валу).

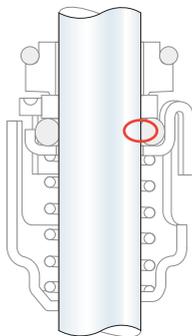


Рис. 5.18. Коррозия вала под вращающейся частью уплотнения в результате осевого движения вала

Осевое движение, вызванное вибрацией или наклоном "седла", может стать причиной износа вала или муфты под вращающейся поверхностью уплотнения. Трение уплотнения о вал постоянно удаляет защитный оксидный слой с вала, что приводит к коррозии (см. рис. 5.18).

Сборка

Когда торцевое уплотнение установлено на вращающийся вал, осевое движение вала не должно превышать гибкость уплотнения вала. Осевое движение вала, превышающее допустимую гибкость вращающейся части торцевого уплотнения, может стать причиной увеличения износа уплотнения или необратимого повреждения отдельных деталей уплотнения вала.

Монтаж

Многие уплотнения вала имеют стандартную монтажную длину. Это позволяет заменять один тип уплотнения на другой с улучшенными рабочими характеристиками для данных условий. Но даже если два уплотнения имеют одинаковую монтажную длину, поверхности скольжения могут размещаться на разных уровнях. Если использовать компоненты двух разных уплотнений, то в результате сжатие уплотнения может быть недостаточным или чрезмерным.

6. Повреждения вследствие изменения условий работы

При эксплуатации насоса условия эксплуатации могут незначительно отличаться от тех, для которых насос был спроектирован. Изменение условий эксплуатации может повлиять на рабочие характеристики уплотнения. На рабочие характеристики торцевого уплотнения влияют следующие параметры:

- давление в камере уплотнения;
- температура в камере уплотнения;
- перекачиваемая жидкость;
- скорость вращения;
- размеры уплотнения вала.

Если указанные параметры не соответствуют условиям эксплуатации, это может привести к отказу или повреждению уплотнения вала.

Давление

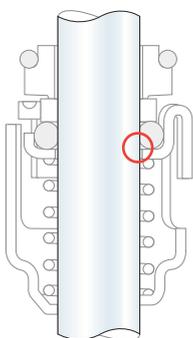


Рис. 5.19. Выдавленные высоким давлением уплотнительные кольца

Давление на стороне перекачиваемой жидкости должно находиться в пределах, соответствующих конструкции уплотнения, материалам уплотнения и перекачиваемой жидкости.

Когда давление жидкости на уплотнение вала превышает предельное для уплотнения значение, это может привести к увеличению трения поверхностей уплотнения и соответствующим повреждениям либо к разрушению вторичных уплотнений. Самым известным проявлением повреждения в таких условиях является выдавливание уплотнительных колец (см. рис. 5.19.).

Температура

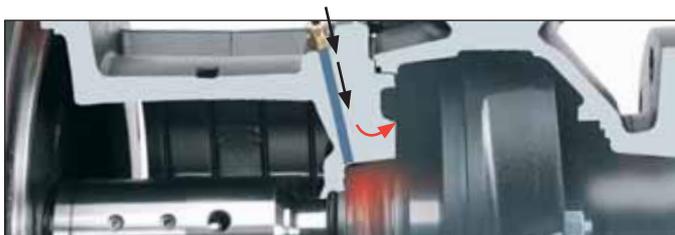


Рис. 5.20. Отвод выделяемого при трении тепла с помощью циркуляции перекачиваемой жидкости через уплотнение вала в камеру уплотнения

Если температура перекачиваемой жидкости приближается к максимальному эксплуатационному ограничению для резины, она размягчается и, соответственно, подвергается экструзии.

При нормальных условиях эксплуатации трение между поверхностями уплотнения вызывает образование тепла. Соответственно, температура в уплотнении и рядом с ним всегда выше, чем температура перекачиваемой жидкости.

При нормальных условиях это повышение температуры составляет 10-20 К. В характеристике уплотнения вала всегда указана фактическая температура эксплуатации, - это должны учитывать разработчики системы.

Превышение максимальной температуры эксплуатации уплотнения может привести к повреждению эластомеров, а также к недостаточной смазке уплотнения (см. стр. 77).

Отсутствие или недостаточность потока жидкости

Повреждение уплотнения может произойти, когда в насосе есть жидкость, но он работает с закрытым клапаном.

Теплота, вырабатываемая под действием трения в уплотнении вала, а также теплота, возникающая за счет вихревого движения вокруг рабочих колес, ведет к повышению температуры во всем насосе. Повышенная температура, в свою очередь, может повредить детали уплотнения вала из эластомеров.

Кроме повышения температуры в этом случае также повышается риск работы без смазки, т.к. отсутствует поток через насос и камеру уплотнения, либо он недостаточен.

Недостаточная вентиляция

При определенных условиях, определяемых конструкцией уплотнения вала, условиями эксплуатации и характеристиками перекачиваемой жидкости, возможно скопление воздуха вокруг уплотнения вала. Недостаточная вентиляция, приводящая к непрерывной или периодической работе без смазки, имеет губительные последствия для срока службы большинства торцевых уплотнений вала.

Вибрация

Механические вибрации приводят к увеличению нагрузки, действующей на каждую деталь торцевого уплотнения вала. В результате увеличивается износ всех деталей, на кольцах уплотнения образуются сколы, возможно образование отверстий в зазоре уплотнения. Вибрации могут возникать из-за трения поверхностей уплотнения при нарушении условий эксплуатации.

Часто вибрации связаны с износом подшипников или особенностями распределения потока жидкости.

Ширина следов износа на седле увеличивается в случае появления радиальных вибраций вала (см. рис. 5.15).

Выводы:

В данной главе рассмотрены основные причины повреждений торцевых уплотнений вала, используемых в насосах.

Точно определить причины повреждений уплотнений вала зачастую достаточно сложно. Необходимо проведение подробного анализа повреждения с учетом всех воздействующих факторов.

[1] OMV AG, Pumps in Process Engineering 2002

7. Анализ повреждений уплотнения вала

Для проведения анализа возможные повреждения уплотнения вала, описанные выше, объединены в таблицу (см. стр. 89-90). Данная таблица представляет собой алгоритм обнаружения и выявления причин повреждений, и позволяет сформировать перечень мер для исправления ситуации.

В первой колонке таблицы указаны основные компоненты уплотнения вала, повреждения которых позволяют выявить причину:

- уплотнение вала в сборе;
- поверхности уплотнения отдельно;
- детали из эластомеров;
- металлические детали;
- вал/муфта.

Во второй колонке таблицы указаны результаты визуального осмотра.

Цифры указывают на возможные причины повреждения - см. «Ключ к таблице анализа повреждений» на стр. 89.

Ключ к таблице анализа повреждений

	Возможные причины повреждений
1	Поверхности уплотнения разошлись из-за блокировки осевого движения вращающейся поверхности уплотнения. Осевое движение необходимо для компенсации температурного осевого расширения и расширения под действием давления.
2	Неправильная монтажная длина уплотнения, вследствие чего вращающаяся и стационарная поверхности не контактируют друг с другом.
3	Поверхности уплотнения работают без смазки, что приводит к перегреву. Высокий крутящий момент на поверхностях уплотнения из твердых материалов вызывает выделение теплоты, которая передается на эластомеры, что приводит к отверждению и обжигу.
4	Закрывает выпускной клапан насоса, что привело к перегреву или перегрев в соответствии с п. 3.
5	Химическая реакция с окисляющим веществом, например, азотной кислотой.
6	Вал или муфта не закреплены.
7	Избыточное давление из-за неверной монтажной длины уплотнения.
8	Твердые частицы, например кристаллы гидроксида натрия, выделяются из жидкости в районе поверхностей скольжения.
9	Летучие компоненты жидкости испаряются в зазоре уплотнения, оставляя на поверхностях высоковязкие липкие слои.
10	Повреждение из-за несоблюдения правил эксплуатации или избыточного давления.
11	Материал уплотнения не обладает химической стойкостью к жидкости или примесям.
12	Эластомер разложился в результате воздействия температуры, превышающей предельные значения.
13	Воздействие на уплотнение давления/температур, превышающих предельные значения.
14	Непрерывное удаление смазывающей пленки из-за относительного перемещения.
15	Давление в системе ниже давления паров или близко к нему.
16	Возможно изношены подшипники.
17	Осадок в жидкости.
18	Твердые частицы в перекачиваемой жидкости.
19	Неправильная сборка уплотнения вала.
20	Слишком низкая вязкость для данного уплотнения.
21	Из-за коррозии карбид вольфрама приобрел матово-серый или зеленый цвет.
22	Вследствие электрохимического осаждения такие металлы, как медь, могут выделяться на поверхностях скольжения из-за недостаточного электрического заземления насоса.
23	В воде с проводимостью ниже 5 мкС/см некоторые марки карбида кремния (SiC) могут подвергаться коррозии.
24	Выделение избыточного тепла может вызывать образование вclusions на поверхности графита, пропитанного смолой.
25	Эластомер установлен на неочищенные поверхности.
26	"Седло" не выровнено по центру.
27	Взрывная декомпрессия из-за быстрого сброса давления.
28	Нагрев из-за неотцентрованности.
29	Пуск/останов при избыточном давлении в системе с твердыми поверхностями уплотнения.
30	Выдавливание эластомеров при высоком давлении и/или температуре.
31	Набухание наполнителя может вызвать образование газовых раковин в пропитанном углероде/графите.
32	Нежелательное осевое движение вала и уплотнения вала.
33	Кавитация в камере уплотнения.
34	Залипание поверхностей уплотнения из твердых материалов (SiC/SiC или WC/WC).
35	Работа при недостаточной смазке из-за того, что атмосферное давление превышает давление жидкости вокруг уплотнения.
36	Работа при недостаточной смазке из-за воздушных пузырьков вокруг поверхностей уплотнения.
37	Неосторожное обращение - возможное падение насоса.
38	Кольцо или камера уплотнения несимметричны, деформированы под действием давления или другого воздействия.
39	Коррозия под кольцом уплотнения из эластомера, которое опирается на жесткий материал, подверженный коррозии.
40	Нарушение соосности колец уплотнения.
41	Попадание волос или грязи.

Таблица анализа повреждений уплотнения вала

Компонент уплотнения вала	Результат визуального осмотра	Возможные причины повреждений					
		Влияние технического обслуживания/технологического процесса				Недостаточный контроль температур	
		Недостаточность смазки	Очистка	Загрязнение	Коррозия (химическое воздействие)	Охлаждение	Нагревание
Уплотнение вала целиком	Засор			15/17/41			
	Исправное состояние			1		1	1
	Застревание			1		1	1
	Шум	13				20	15
	Залипание				11		
Поверхности уплотнения (1)-(2)	Сколотые края				11		
	Трещины/разломы поверхности	3			11		
	Отложения с наружной стороны			1/17/38			
	Вытравливание/разложение		5		11		
	Ямки/выбоины		5		11		
	Задиры/царапины/потертости	13				20	15
	Следы износа:						
	Отсутствуют						
	Волдыри/чешуйки	13/24		23/18	31		
	Отложения			8/9/17			
	Эксцентричные						
	Борозды	20		8			
	Частичные следы				39		
	Матовость поверхности				11/21		
	Узкий или широкий						
Нормальный							
Термические трещины	13/20					20	15
Износ на стороне атмосферы	13		8				
Износ на стороне жидкости							
Эластомеры	Обожженная поверхность	3			11		
	Зарубки/насечки						
	Разложение		11		11		
	Выдавливание						
	Сломанные (компенсаторы)						
	Потеря гибкости	3					12
	Разрывы						
	Набухание		11		11		
	Износ вращающихся колец						
Износ неподвижных колец	3		34	34			
Металлические детали	Трещины/разломы поверхности			34	34		
	Деформации			34	34		
	Обесцвечивание	3	11		11		
	Вытравливание/разложение		5/11		11		
	Ямки/выбоины		11		11		
Износ	13						
Вал/муфта	Трещины/разломы поверхности	13	11				
	Ямки/выбоины		11		11		
	Износ			8	11		

повреждений уплотнения вала

Категория	Неправильный монтаж			Несоответствие характеристик уплотнения параметрам работы системы					Прочее
	Сборка	Монтаж	Несоосность	Поток	Давление	Температура	Недостаточная вентиляция	Вибрация	
	2/19	2			1		1	1	
		7			15/35	13	36	16	
		10		4			3	16	37
		10						16	
		5		11					
		7			35	13	36		
	1	2							
		22				15			
			26						16
	19	7					4		
	38		40						
			19/40						16
				4	15		36		
	10/19	25		4		13	3		
	19	10				12	3		
		7	26		13	13			
			28						
			28		27/30	12	3		
	19/26		19/26/40					16/32	
							3		
	19		26		13/29	13		16	
	7/37	7			13	13			
	19	32					3		
			26			33			
	10	10			29			14	
								16	
		6			29			16	
		6	26		29			32	

Глава 6

Стандарты и сертификаты



1. Европейский стандарт EN 12756
2. Сертификаты

В этой главе описываются стандарты и сертификаты, регулирующие использование торцевых уплотнений в промышленности.

1. Европейский стандарт EN 12756

Европейский стандарт EN 12756 определяет основные размеры для установки одного или нескольких торцевых уплотнений вала в корпусе насоса.

Стандарт также включает в себя обозначение уплотнений вала и коды используемых материалов. Это упрощает обмен информацией между производителями и пользователями уплотнений вала.

Обозначение торцевого уплотнения в соответствии с EN 12756

Обозначение в соответствии с EN 12756 основано на приведенной ниже системе кодирования:

Пример

N U 012 S O

Поз. 1: Монтажная длина:

N = Стандартная
K = Короткая

Поз. 2: Балансировка:

U = Несбалансированное
B = Сбалансированное

Поз. 3: Номинальный диаметр вала:

Диаметр в мм указывается тремя цифрами

Поз. 4: Направление вращения уплотнения:

R = Правостороннее вращение (по часовой стрелке относительно "седла")
L = Левостороннее вращение (против часовой стрелки относительно "седла")
S = Возможность вращения в обоих направлениях

Поз. 5: Предотвращение вращения "седла"

0 = без фиксации
1 = с фиксацией

Рассмотрим примеры обозначения торцевого уплотнения в соответствии со стандартом EN 12756:

- NU04350.

В соответствии с приведенной выше кодировкой, это уплотнение со стандартной монтажной длиной, несбалансированное, для вала диаметром 43 мм, способное вращаться в любом направлении, без фиксации, предотвращающей вращение седла.

- KU04350.

В соответствии с приведенной выше кодировкой, это уплотнение отличается от предыдущего короткой монтажной длиной.

Кроме обозначения типа уплотнения, стандарт EN 12756 также определяет кодировку материалов для компонентов уплотнения вала.

Обозначение материалов торцевого уплотнения в соответствии с EN 12756

Код материала одинарного уплотнения состоит из пяти букв:

<u>Номер позиции кода материала</u>	1	2	3	4	5
Материал вращающейся поверхности					
Материал неподвижного "седла"					
Материал вторичных уплотнений					
Материал пружины					
Материал прочих деталей в уплотнении					

Пример полного обозначения торцевого уплотнения по EN12756:

EN12756-NU04350-QQEGG

В соответствии с приведенной выше расшифровкой обозначения, это уплотнение вала со стандартной монтажной длиной, несбалансированное, для вала диаметром 43 мм, способное вращаться в любом направлении, без фиксации, предотвращающей вращение седла. Материалы уплотнения*:

1. Вращающаяся поверхность уплотнения из карбида кремния (SiC)
2. Неподвижное "седло" из карбида кремния (SiC)
3. Вторичные уплотнения из EPDM
4. Пружина из хром-никель-молибденовой стали
5. Прочие детали уплотнения также из хром-никель-молибденовой стали.

* Шифр материалов уплотнения в соответствии со стандартом EN12756 приведен на стр.92.

Многие поставщики уплотнений используют этот стандарт с некоторыми дополнениями, но некоторые также используют собственные коды.

**Шифр материалов в соответствии с EN 12756 (редакция 2000 г.)
(номера позиций соответствуют кодировке на стр.91)**

Позиции 1 и 2	Позиция 3	Позиции 4 и 5
Материал вращающейся поверхности (1) и неподвижного "седла" (2)	Материал вторичных уплотнений	Материал прочих деталей в уплотнении
<p>Искусственный графит А Графит, пропитанный металлом В Графит, пропитанный смолой С Прочие графиты</p> <p>Металлы D Углеродистая сталь E Хромистая сталь F Хром-никелевая сталь G Хром-никель-молибденовая сталь H Металлы с покрытиями из твердых сплавов K Твердые металлические покрытия M Сплав с высоким содержанием никеля N Бронза P Серый чугун R Легированный серый чугун S Хромистая литая сталь T Прочие материалы</p> <p>Карбиды U Карбид вольфрама Q Карбид кремния J Прочие карбиды</p> <p>Оксиды металлов V Оксид алюминия W Оксид хрома X Прочие оксиды металлов</p> <p>Пластмассы Y Стекловолокнистый армированный PTFE (тефлон) Z Прочие пластмассы</p>	<p>Эластомеры B Бутилкаучук (IIR) E Этиленпропиленовый каучук (EPDM) K Перфторированный каучук (FFKM) N Хлоропреновый каучук (CR) P Нитрильный каучук (NBR) S Силиконовый каучук (MVQ) V Фторуглеродный каучук (FKM) X Прочие эластомеры</p> <p>Эластомеры в оболочке M Эластомеры в оболочке из PTFE (тефлона)</p> <p>Не эластомеры G Графит T PTFE (тефлон) Y Прочие не эластомеры</p> <p>Другие материалы U Другие материалы для гибких уплотнений</p>	<p>D Углеродистая сталь E Хромистая сталь F Хром-никелевая сталь G Хром-никель-молибденовая сталь M Сплав с высоким содержанием никеля N Бронза T Прочие материалы</p>

Различные комбинации приведенных выше материалов можно увидеть в у различных производителей уплотнений вала – те же буквы будут использоваться в различных положениях.

2. Сертификаты

Иногда требуются определенные сертификаты на уплотнения вала. Ниже приведено несколько примеров.

Разрешения на использование в питьевой воде

Материалы, которые контактируют с питьевой водой во время подачи, очистки и распределения по трубопроводам, могут выделять в воду какие-либо вещества. Это может отрицательно повлиять на общее качество питьевой воды или даже создать угрозу для здоровья потребителей.

Поэтому в основе выдачи разрешения на использование определенного уплотнения в питьевой воде лежит оценка пригодности материалов уплотнения. Цель оценки - предупреждение недопустимого ухудшения качества питьевой воды. Основным методом оценки пригодности материалов для использования в питьевой воде является проведение испытаний на скорость миграции/выщелачивание частиц. Материалы испытываются отдельно или в составе собранного изделия.

В таблице ниже представлены национальные сертифицирующие органы международного уровня, выдающие разрешения на использование различных материалов в питьевой воде.

Страна	Название процедуры	Законодательная база	Сертифицирующий орган/учреждение	Что оценивается на выщелачивание/ скорость миграции частиц?	Механическое испытание готового изделия.
Франция	ACS (Attestation de conformité sanitaire - свидетельство санитарного соответствия). Адрес сайта: http://www.sante.gouv.fr	Постановление Министерства здравоохранения от 29 мая 1997 г.	Любая из четырех лабораторий во Франции, уполномоченная Министерством здравоохранения Франции для проведения сертификации и выдачи сертификатов ACS.	Сертификат ACS может выдаваться как для отдельных материалов, так и для готового изделия из нескольких материалов	Не проводится
Великобритания	WRAS / DWI BS 6920. Адрес сайта: http://www.wras.co.uk	Правила использования водопроводно-канализационной арматуры от 1999 г.	Служба надзора за водными ресурсами/ Инспекция по питьевой воде	Все неметаллические материалы, контактирующие с водой в изделии. Испытываются поотдельности	Проводится
США	NSF 61. Адрес сайта: http://www.nsf.org			Сертификат может выдаваться как на отдельные материалы, так и на готовые изделия	Не проводится
Германия	DVGW UBA / KTW. Адрес сайта: http://www.dvgw.de/104.html			Отдельные материалы/ компоненты	Нет – на сегодняшний день не проводится для насосов в сборе

Санитарные сертификаты

Использование насосов в санитарно-гигиенических целях, например, в качестве установок для фармацевтической, пищевой и биотехнологических отраслей промышленности, а также в стерильных процессах, регулируется более высокими стандартами относительно возможности очистки и стерилизации, чем для других областей применения.

Конструкция, используемые материалы и качество обработки поверхности определяются целым рядом национальных и международных правил и норм, директив и законов, к которым относятся:

- Нормы FDA (Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов)
- Рекомендации и сертификаты EHEDG (Европейской группы по проектированию оборудования гигиенического назначения)
- Санитарные стандарты 3А
- Критерии QHD (проектирование с соблюдением правил гигиены).

FDA



FDA (Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов) — это отдел, занимающийся научными изысканиями и разработкой стандартов в области здравоохранения в составе Министерства здравоохранения и социального обеспечения США.

FDA регламентирует нормы по безопасности пищевых продуктов, косметических средств, медикаментов, биопрепаратов, медицинских приборов и рентгенологических изделий в США. Это одна из старейших американских организаций по защите интересов потребителей.

Дополнительную информацию см. на домашней странице FDA
<http://www.fda.gov>

EHEDG



EHEDG (Европейская группа по проектированию оборудования гигиенического назначения) была создана в 1989 г.. Члены организации являются представителями пищевой промышленности, производителей оборудования, исследовательских институтов и органов здравоохранения. EHEDG является некоммерческой организацией и не обладает законодательными полномочиями.

EHEDG разрабатывает руководства и методы испытаний для безопасной и гигиеничной переработки продуктов питания.

Основными нормативными документами EHEDG для оценки гигиеничности конструкции и методов очистки технологического оборудования являются:

(1) The Hygienic Equipment Design Criteria, Document Guideline No. 8 (2004)

Нормативы оценки гигиеничности конструкции оборудования № 8 от 2004 года.

(2) A method for the assessment of in-place cleanability of food processing equipment, Document No. 2 (2000).

Методы оценки возможности очистки оборудования, используемого в пищевой промышленности № 2 от 2000 года

Полный текст документов приведен на сайте <http://www.ehedg.org>.

В руководстве (1) описываются нормы, которым должно удовлетворять технологическое оборудование гигиенического назначения и систем обеззараживания. Приводятся принципы конструирования оборудования и узлов для пищевых продуктов, которые должны быть соблюдены во избежание размножения бактерий и сохранения качества пищевых продуктов.

Руководство (2) описывает процедуру испытаний для выявления “застойных зон” в конструкции оборудования гигиенического назначения, где могут накапливаться пищевые продукты и, соответственно, микробы. Степень чистоты оборудования определяется качеством удаления загрязнений. Очистка осуществляется с помощью мягкого средства, так, чтобы в промывочной трубке осталось некоторое количество осадка. Вывод о степени очистки оборудования основан на сравнении оставшейся жидкости из промывочной трубки с эталоном. Если чистота жидкости из промывочной трубки равна или превосходит эталонное значение, может выдаваться сертификат EHEDG.

Так как в безопасности пищевых продуктов заинтересована не только Европа, EHEDG активно участвует в разработке международных руководств и стандартов.

Символ EHEDG используется производителями как знак того, что их продукция отвечает критериям EHEDG.

Дополнительную информацию см. на домашней странице EHEDG
<http://www.ehedg.org>.

3-A Sanitary Standards



3-A Sanitary Standards, Inc. — это американский аналог европейской организации EHEDG. Санитарные стандарты 3-A не содержат технологии испытаний.

Базирующиеся в США организации NSF и 3-A сотрудничают в разработке руководств EHEDG, а EHEDG, в свою очередь, оказывает содействие при разработке стандартов 3-A и NSF.

Символ 3-A используется производителями как знак соответствия их продукции санитарным стандартам 3-A

Дополнительную информацию см. на домашней странице 3-A Sanitary Standards
<http://www.3-a.org>.

QHD



QHD (проектирование с соблюдением правил гигиены) — это система испытаний узлов, механизмов и агрегатов обеззараживающего или стерильного назначения с соблюдением правил гигиены и очищаемости. Данная система используется немецкой отраслевой ассоциацией, VDMA (Verband Deutscher Maschinen-und Anlagenbau e.V.).

Соответствие QHD гарантирует, что все поверхности агрегата могут очищаться без разборки (CIP).

Испытания на определение степени очищаемости проводятся в испытательной лаборатории самим производителем либо независимыми сертифицирующими органами.

Символ QHD используется производителями как знак того, что их продукция отвечает критериям QHD.

Дополнительную информацию см. на домашней странице VDMA www.vdma.org.

К другим нормативным документам, регулирующим использование торцевых уплотнений в промышленности, относятся:

ATEX



ATEX – сокращение от французского «АТmosphère EXplosible» (взрывоопасная среда). АТЕХ – это название свода европейских директив для оборудования, используемого в потенциально взрывоопасных средах.

Сертификация АТЕХ основывается на выполнении требований двух следующих директив ЕС:

1. Директива 94/9/ЕС, также известная как АТЕХ 95. Директива применяется к оборудованию и системам, предназначенным для использования в потенциально взрывоопасных средах. Ответственность за соответствие изделий директиве возлагается на производителя этих изделий. Соблюдение норм данной директивы состоит в предупреждении образования и возгорания взрывоопасных сред.
2. Директива 99/92/ЕС, также известная как АТЕХ 137. В директиве устанавливаются требования к защите здоровья и обеспечению безопасности рабочих, подвергаемых потенциальному риску воздействия взрывоопасных сред. Ответственность за соответствие условий труда директиве возлагается на работодателя.

Как уже было указано, при работе торцевых уплотнений в зазоре выделяется теплота. В соответствии с директивами АТЕХ можно сделать вывод о том, требуется ли специальная защита при эксплуатации насоса. Взрывоопасные среды могут быть образованы огнеопасными газами или испарениями, или горючей пылью, рассеянной в воздухе. Области с взрывоопасными средами относятся к опасным зонам. Класс, присвоенный определенной зоне, и ее размер и расположение зависят от вероятности возникновения взрывоопасной среды и ее сохраняемости, если она возникает.

В зависимости от уровня защиты оборудование распределяется по категориям в соответствии с АТЕХ.

Дополнительную информацию см. в www.ce-mark.com/atexdir.html.

API 682 and ISO 21049



API (Американская ассоциация нефтяной промышленности) является единственной национальной торговой ассоциацией, которая регламентирует все аспекты нефтегазовой промышленности США. Стандарты API 682 и ISO 21049 касаются торцевых уплотнений вала и систем уплотнения, используемых в нефтегазовой промышленности.

Выводы:

Различные области использования оборудования требуют разных стандартов и сертификатов.

Для торцевых уплотнений основным стандартом является EN 12756.

Также могут требоваться специальные сертификаты и соответствия для использования в питьевой воде, в пищевой промышленности, в системах обеззараживания или взрывоопасных средах.

Представительства ООО «Грундфос»

Москва

109544, г. Москва, ул. Школьная, 39-41. стр.1
Тел.: (495) 564-88-00, (495) 737-30-00
Факс: (495) 564-88-11
e-mail: grundfos.moscow@grundfos.com

Архангельск

163000, Архангельская область,
г. Архангельск, ул. Попова, д. 17, офис 321
Тел./факс: (8182) 65-06-41
e-mail: arkhangel'sk@grundfos.com

Владивосток

690003, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 46, офис 510
Тел.: (4232) 61-36-72
e-mail: vladivostok@grundfos.com

Волгоград

400131, г. Волгоград, ул. Донецкая, 16, оф. 321
Тел.: (8442) 25-11-52, 25-11-53
e-mail: volgograd@grundfos.com

Екатеринбург

620014, г. Екатеринбург,
ул. Вайнера, 23, офис 201
Тел./факс: (343) 365-91-94, 365-87-53
e-mail: ekaterinburg@grundfos.com

Иркутск

664025, г. Иркутск, ул. Степана Разина, 27, оф. 3
Тел./факс: (3952) 21-17-42
e-mail: irkutsk@grundfos.com

Казань

420044, г. Казань, а/я 39 (для почты)
г. Казань, ул. Спартаковская, д. 2В, офис 215
Тел. (843) 291-75-26
Тел./факс: (843) 291-75-27
e-mail: kazan@grundfos.com

Кемерово

650099, г. Кемерово,
ул. Н. Островского, 32, офис 326
Тел./факс: (3842) 36-90-37
e-mail: kemerovo@grundfos.com

Краснодар

350058, г. Краснодар,
ул. Старокубанская, д. 118, корпус Б, офис 412
Тел.: (861) 279-24-93
Тел./факс: (861) 279-24-57
e-mail: krasnodar@grundfos.com

Красноярск

660017, г. Красноярск,
ул. Кирова, 19 офис 3-22
Тел./факс: (391) 212-05-78
e-mail: krasnoyarsk@grundfos.com

Курск

305004, г. Курск,
ул. Ленина, 77 Б, офис 4096
Тел./факс: (4712) 39-32-53
e-mail: kursk@grundfos.com

Нижний Новгород

603000, г. Нижний Новгород,
пер. Холодный, 10а, офис 1-4
Тел./факс: (831) 278-97-05, 278-97-06, 278-97-15
e-mail: novgorod@grundfos.com

Новосибирск

630099, г. Новосибирск,
пр-т Димитрова, 2, офис 902
Тел./факс: (383) 249-22-22, 249-22-23
e-mail: novosibirsk@grundfos.com

Омск

644099, г. Омск,
ул. Интернациональная, 14, офис 17
Тел./факс: (3812) 948-372
e-mail: omsk@grundfos.com

Пермь

614000, г. Пермь,
ул. Орджоникидзе, 61 офис 312
Тел./факс: (342) 217-95-95, 217-95-96
e-mail: perm@grundfos.com

Петрозаводск

185011, г. Петрозаводск,
ул. Ровио, д.3, офис 6
Тел./факс: (8142) 53-52-14
e-mail: petrozavodsk@grundfos.com

Ростов-на-Дону

344006, г. Ростов-на-Дону,
пр-т Соколова, 29, офис 7
Тел. (863) 248-60-99
Тел./факс: (863) 299-41-84
e-mail: rostov@grundfos.com

Самара

443099, г. Самара, пер. Репина 4-6 а
Тел./факс: (846) 977-00-01, 977-00-02, 332-94-65
e-mail: samara@grundfos.com

Санкт-Петербург

195027, г. Санкт-Петербург,
Свердловская наб. 44, б/ц "Бенуа", офис 826
Тел.: (812) 633-35-45
Факс: (812) 633-35-46
e-mail: peterburg@grundfos.com

Саратов

410005, г. Саратов,
ул. Большая Садовая, 239, офис 418
Тел./факс: (8452) 45-96-87, 45-96-58
e-mail: saratov@grundfos.com

Тюмень

625000, г. Тюмень,
ул. Хохрякова, д. 47, офис 607
Тел./факс: (3452) 45-25-28
e-mail: tyumen@grundfos.com

Уфа

Для почты: 450064, г. Уфа, а/я 69
Бизнес-центр, ул. Мира, 14, офис 801-802
Тел.: (3472) 79-97-70
Тел./факс: (3472) 79-97-71
e-mail: grundfos.ufa@grundfos.com

Хабаровск

680000, г. Хабаровск, ул. Фрунзе, д. 22, оф. 407
Тел.: (4212) 41-50-30
Тел./факс: (4212) 41-50-33
e-mail: khabarovsk@grundfos.com

Челябинск

454080 г. Челябинск, пр-т Ленина 83, офис 313
Тел.: (351) 265-55-19
e-mail: chelyabinsk@grundfos.com

Ярославль

150003, г. Ярославль,
ул. Республиканская, д.3, корп.1, офис 403
Тел./факс: (4852) 58-58-09
e-mail: yaroslavl@grundfos.com

Минск

220123, г. Минск,
ул. В. Хоружей, 22, офис 1105
Тел./факс: 8 10(375 17) 233-97-65, 233-97-69
e-mail: minsk@grundfos.com