

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко В. В., Павин А. М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 39–47.
2. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry [Tutorial] // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2011. Vol. 18. Issue 4. P. 80–92.
3. Kim A., Eustice R. Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection Using Visual Saliency // IEEE Transactions on Robotics 2013. Vol. 29. Issue 3. P. 719–733.
4. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Плясунов В. М., Сахарова Е. И. Анализ системы видеонавигации как элемента системы управления подводного аппарата // Техническое зрение в системах управления: материалы науч.-техн. конф. М., 2012. С. 57–61.
5. Tomasi C., Kanade T. Detection and tracking of point features // Technical Report CMU-CS-91132. Carnegie Mellon University, 1991. P. 20.
6. Bay H., Ess A., Tuytelaars T. et al. Speeded-Up Robust Features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110. Issue 3. P. 346–359.
7. Rublee E., Rabaud V., Konolige K. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // Proc. IEEE International conference on computer vision. 2011. P. 2564–2571.
8. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. Y. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints // Proc. IEEE International conference on computer vision. 2001. P. 2548–2555.
9. Артюхов М. Ю., Кропотов А. Н., Макашов А. А., Сахарова Е. И. Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010. М., 2011. С. 230–244.
10. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Плясунов В. М., Сахарова Е. И. Системы обработки телевизионной информации подводных аппаратов // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы 4-й Всерос. науч.-техн. конф. Владивосток, 2011. С. 316–322.
11. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Плясунов В. М., Сахарова Е. И. Современные методы видеопозиционирования подводного аппарата // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы 5-й Всерос. науч.-техн. конф. 2013. С. 41–45.
12. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Изд-во “Наука,” 1975. 768 с.

УДК: 62–236.58

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНОЙ ГИДРАВЛИКИ НА МОРСКОЙ ВОДЕ

В. В. Вельтищев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»¹

В промышленных гидравлических системах широкое применение находит пресная вода. Для гидравлических систем морской подводной техники логичным развитием этой тенденции является использование морской воды. По физическим и химическим свойствам, биологической активности морская вода кардинально отличается не только от традиционных минеральных жидкостей, но и от пресной воды. На основе анализа важнейших свойств морской воды формулируются проблемы создания подводных гидравлических исполнительных систем нового типа. Одна из ключевых задач состоит в рациональном выборе конструкционных материалов и покрытий. Путем экспериментальных исследований на макетных образцах базовых гидравлических элементов установлено, что наиболее перспективным является использование керамических материалов и полимеров типа полиэфирэфиркетон. Особое значение придается решению задачи подготовки морской воды для использования в качестве рабочей жидкости. Предлагается оригинальная концепция построения системы фильтрации и биологического обеззараживания.

ВВЕДЕНИЕ

Гидравлические исполнительные системы широко используются в обитаемой и необитаемой подводной технике. Хорошо известны такие достоинства гидравлических подводных исполнительных систем, как:

- высокое качество регулирования, широкий диапазон скоростей при безредукторной схеме исполнения, простота ограничения предельных нагрузок;
- легкость реализации гидростатической разгрузки гидравлических компонентов для их защиты от воздействия внешнего давления воды;
- малые габариты и массы гидравлических устройств, позволяющие создавать быстродействующие исполнительные устройства с высокой удельной энерговооруженностью.

Одной из проблем использования гидравлических систем в подводной технике является обеспечение необходимых уровней надежности. Многолетняя практика эксплуатации подводных аппаратов показала, что значительная часть отказов обусловлена проникновением морской воды в гидросистему. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты рабочего класса и обитаемая подводная техника характеризуются высокой степенью насыщенности гидравлическими исполнительными механизмами. При этом каж-

ущие исполнительные устройства с высокой удельной энерговооруженностью. Одной из проблем использования гидравлических систем в подводной технике является обеспечение необходимых уровней надежности. Многолетняя практика эксплуатации подводных аппаратов показала, что значительная часть отказов обусловлена проникновением морской воды в гидросистему. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты рабочего класса и обитаемая подводная техника характеризуются высокой степенью насыщенности гидравлическими исполнительными механизмами. При этом каж-

¹ 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1. Тел.: (499) 2636115. E-mail: sm42@sm.bmstu.ru

дый гидравлический компонент представляет собой потенциально опасный для разгерметизации всей объединенной гидросистемы узел конструкции. Последствиями обводнения морской водой гидравлических систем являются деструкция минеральной рабочей жидкости, необратимые коррозионные разрушения внутренних частей гидравлического оборудования и существенное снижение сопротивления изоляции в силовых и слаботочных электрических цепях.

Необходимо признать, что возможности конструктивного совершенствования гидромеханических и электрогидравлических компонентов подводной техники с целью обеспечения их гарантированной наружной герметичности на сегодняшний день практически исчерпаны.

Кардинальным способом повышения надежности гидравлических систем является переход на использование в качестве рабочей жидкости морской воды, что создает предпосылки для построения подводных гидравлических систем принципиально нового типа. Внедрение гидравлических исполнительных систем на морской воде позволит не только существенно повысить уровень надежности, но и снизить эксплуатационные затраты, устранить пожароопасность систем, улучшить экологические показатели, а также повысить уровень безопасности обслуживающего персонала.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана в настоящее время проводятся исследования, конечной целью которых является разработка инновационных технологий создания подводных гидравлических систем с использованием в качестве рабочей жидкости морской воды. В настоящей статье представлены промежуточные результаты этих исследований.

1. Современные области использования гидравлических систем с водосодержащими рабочими жидкостями

Промышленные разработки гидравлических систем, работающих на воде, были осуществлены в начале XIX века [1]. Опыт эксплуатации первых систем на воде был в основном отрицательным. Поэтому в дальнейшем практически во всех областях техники использовались только традиционные минеральные рабочие жидкости. Водосодержащие жидкости (водно-гликолевые и водно-глицериновые) с содержанием воды до 45% стали применяться в тех сферах, где важнейшим требованием является пожаро- и взрывобезопасность систем. В некоторых специфических случаях применяют дисперсные смеси минерального масла и воды: масловодная эмульсия (60% масла и 40% воды) и водно-масляные эмульсии, в которых процент со-

держания воды может достигать до 98%.

Интенсивное развитие гидравлических систем на водосодержащих жидкостях, включая и системы на технической воде, началось в 90-х годах прошлого века. За прошедший с этого времени период водяная гидравлика сформировалась в самостоятельное направление. Благодаря целому ряду преимуществ гидравлические системы такого типа активно используются в самых различных областях техники (рис. 1).

Наиболее динамично развиваются промышленные гидравлические системы на пресной воде. Можно констатировать, что в наземных областях техники уже накоплен большой опыт использования пресной воды в качестве рабочей жидкости как в гидросистемах низкого давления, так и в исполнительных гидравлических системах высокого давления (гидроприводах). На мировом рынке представлена серийная продук-



Рис. 1. Современные области использования водяной гидравлики

ция целого ряда производителей гидроэлементов, способных работать на пресной воде. В их число входят: Danfoss (Дания), Water Hydraulics (Великобритания), Cat Pumps (США), HL Hydraulic GmbH (Германия). Номенклатура выпускаемых гидравлических компонентов достаточна для создания разнообразных промышленных систем гидравлики наземного применения.

Основные направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области наземной водяной гидравлики направлены на:

- повышение коррозионной стойкости гидроэлементов за счет использования новых конструктивных материалов и покрытий;
- устранение поверхностной эрозии материалов, обусловленной воздействием турбулентного потока воды;
- снижение трения во внутренних подвижных частях гидроэлементов в условиях низких смазывающих свойств воды;
- снижение объемных потерь (внутренних перетечек и внешних утечек) воды для обеспечения высоких энергетических характеристик гидроэлементов.

В подводной технике развитие гидравлических систем на морской воде пока осуществляется чрезвычайно медленными темпами. Несмотря на очевидную перспективность и естественность применения такой рабочей жидкости, известны только единичные примеры создания реальных образцов. Хотя первые попытки решения такой задачи были предприняты в США еще в 80-х годах прошлого века в рамках программы создания водолазного инструмента нового поколения в Инженерной лаборатории ВМС (Navy Civil Engineering Laboratory) [2], полноценного развития подво-

дные исполнительные системы такого типа так и не получили.

В подводной робототехнике пока известен один случай использования гидравлических систем на морской воде. В работе [3] приводятся сведения о разработке прототипа телеуправляемого обитаемого подводного аппарата, движительный комплекс которого реализован с использованием водяной гидравлики. В состав движительного комплекса входят насосная станция и три однотипных гидропривода. Гидросистема реализована на серийных компонентах производства компании «Danfoss». Более детальная информация о конструктивных особенностях этой гидросистемы в научно-технической литературе отсутствует.

Для выработки общих принципов построения подводных гидравлических исполнительных систем на морской воде может быть полезен и опыт разработки уравнивательных систем глубоководных обитаемых подводных аппаратов [4]. Несмотря на то что формально уравнивательные системы не могут быть отнесены к классу исполнительных, отдельные технические решения, используемые при создании уравнивательных систем, применимы при создании и гидроприводов.

2. Обоснование концепции построения подводных гидравлических исполнительных систем с рабочим телом «морская вода»

В любой гидросистеме рабочей жидкостью, являясь ее главным элементом, обеспечивает объемные связи в гидросистеме и служит непосредственным переносчиком энергии. Основными показателями для оценки качества рабочей жидкости в традицион-

ных гидросистемах служат: вязкостные свойства, химическая и физическая стабильность, антикоррозионные свойства, агрессивность по отношению эластомерным уплотнительным материалам, смазываемая способность, теплофизические свойства, а также огнестойкость и температура замерзания. Кроме того, необходимым условием успешной эксплуатации гидросистемы является чистота рабочей жидкости, т.е. отсутствие в ней инородных частиц, размеры которых влияют на работоспособность гидроэлементов.

Пресная вода как рабочая жидкость уже достаточно изучена. Несмотря на низкие смазывающие свойства и способность вызывать коррозию конструктивных материалов, она по сравнению с минеральными жидкостями обладает рядом положительных свойств [5]:

- доступность и экологическая безопасность;
- негорючесть и взрывобезопасность;
- низкая вязкость, обеспечивающая экономичность процессов дистанционной передачи энергии (график зависимости кинематической вязкости воды от температуры и давления представлен на рис. 2);
- высокая теплоемкость и теплопроводность;
- пониженная сжимаемость.

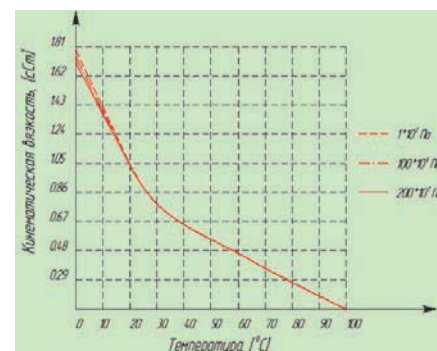


Рис. 2. Зависимость кинематической вязкости воды от температуры и давления

Морская вода по сравнению с пресной имеет ряд существенных отличий, без учета которых проектирование гидравлической системы нового типа невозможно. Наибольшее влияние на ожидаемые технические и эксплуатационные параметры гидросистемы будут оказывать солёность и биологическая активность морской воды.

Высокое содержание растворенных солей в морской воде определяет ряд исходных требований к конструкции гидравлического привода, использующего данную жидкость в качестве рабочего тела. При испарении морской воды в замкнутом объеме возникают отложения растворенных веществ на внутренних поверхностях гидравлических компонентов, что может стать причиной заклинивания его подвижных частей. Главная проблема использования морской воды в качестве рабочей жидкости обусловлена ее относительно высокой электропроводностью. В морской среде интенсивно проходят процессы электрохимической коррозии в гальванических парах из разнородных конструкционных материалов. Кроме того, в таких условиях активно развивается и местная коррозия конструк-

ционных материалов. Обычно в гидроэлементах для достижения требуемых характеристик используются различные материалы: конструкционные и легированные стали, бронзы, алюминиевые сплавы. Очевидно, что такой подход при создании компонентов гидросистемы на морской воде неприемлем. Электропроводность морской воды необходимо учитывать при проектировании элементов гидросистемы, которые содержат электрические управляющие или информационные цепи. Конструкция таких компонентов должна содержать средства защиты (изоляции) всех взаимодействующих с морской водой электрических цепей.

Морская вода является сферой обитания различных биологических объектов. Поэтому этот тип рабочей жидкости будет всегда содержать некоторое количество микроорганизмов, а также продуктов жизнедеятельности морских растений и животных.

С эксплуатационной точки зрения эти микроорганизмы могут трактоваться как нерастворенные частицы и будут влиять на общую чистоту рабочей жидкости. Количество микроорганизмов зависит

от географических особенностей акватории, глубины и сезонных факторов. Размер микроорганизмов в диапазоне глубин от 0 до 6000 метров колеблется от 0,1 мкм (бактериопланктон) до 200 мкм (крупный фитопланктон, микрзоопланктон). Так как для нормальной работы типовых гидроэлементов должна быть обеспечена чистота фильтрации рабочей жидкости на уровне 10 ... 20 мкм, то биологические объекты должны учитываться при разработке методов и средств фильтрации морской воды.

Сложные динамические процессы происходят при развитии микроорганизмов в замкнутом объеме гидросистемы, которые приводят к увеличению их концентрации и постепенному биологическому обрастанию внутренних поверхностей гидроэлементов. Это вызывает повышение трения в подвижных соединениях, вплоть до полного их заклинивания. Кроме того, уменьшается площадь проходных сечений гидроэлементов, что приводит к снижению скоростных и силовых характеристик гидропривода. Обрастание ухудшает процессы теплопередачи и является одним из важнейших факторов, ускоряющих морскую коррозию [6].

В табл. 1 приведены средние значения важнейших характеристик минеральной рабочей жидкости МГЕ-10А, технической пресной воды и морской воды.

Проведенный анализ свойств морской воды позволяет сформулировать ряд концептуальных положений, которые должны стать основой для последующих исследований.

Одним из важнейших этапов является определение схемы построения общего контура подводной гидросистемы. Существует принципиальная возможность

Таблица 1. Сравнение характеристик минеральной рабочей жидкости МГЕ-10А, технической пресной воды и морской воды

Характеристика	Минеральное масло МГЕ-10А	Пресная (техническая) вода	Морская вода
Плотность, кг/м ³	855	997	1000–1055
Кинематическая вязкость, мм ² /с	10–140	0,55–1,79	1,046–1,826
Температура застывания, °С	минус 70	минус 1,91	0,0
Массовая доля механических примесей, %	не более 0,005	не более 0,005	0,001–1
Содержание хлор-иона, мг/л	не более 0,1	не более 0,1	19000
Удельное электрическое сопротивление, Ом/см	50 · 10 ⁶	5 · 10 ⁶	20–30
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	2,135 · 10 ³	4,18 · 10 ³	3,9 · 10 ³
Теплопроводность, Вт/м·К	0,12	0,6	0,6
Коэффициент температурного расширения, °К ⁻¹	10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴
Коэффициент объемного сжатия, Па ⁻¹	7 · 10 ⁻¹⁰	5 · 10 ⁻¹⁰	5 · 10 ⁻¹⁰

построения гидросистемы по открытой схеме (со сливом рабочей жидкости из гидроприводов в окружающую среду). Альтернативный вариант основан на использовании замкнутого контура гидросистемы, в котором рабочая жидкость циркулирует изолированно или с минимальным обменом с окружающей водной средой.

К важнейшим достоинствам первого варианта можно отнести:

- отсутствие опасности перегрева гидросистемы за счет постоянного отвода тепла;

- сокращение числа соединительных магистралей между насосной станцией и гидроприводами и снижение гидравлических потерь из-за отсутствия сливных трубопроводов;

- низкую вероятность размораживания элементов гидросистемы при хранении подводного аппарата в зимнем периоде на воздухе;

- автоматическое достижение эффекта гидростатической разгрузки (равенства сливного давления в гидросистеме и давления окружающей среды).

Основные проблемы эксплуатации гидросистем с открытым контуром будут связаны с опасностью заклинивания подвижных деталей продуктами испарения морской воды в период хранения подводного аппарата и необходимостью промывки всей гидросистемы пресной водой.

Построение гидросистемы по замкнутой схеме больше соответствует традиционным для подводной техники техническим решениям, особенно при использовании смеси морской воды с минеральной жидкостью. В этом случае вероятность заклинивания резко снижается.

К недостаткам этого варианта можно отнести возможность развития микроорганизмов в замкнутом объеме гидросистемы при

хранении подводного аппарата в летний период, а также опасность ее размораживания зимой.

Принцип построения гидросистемы по закрытому или условно закрытому контуру представляется более перспективным, так как в этом случае есть возможность использовать специальные добавки к морской воде (антифризы и биотоксичные вещества). Открытые схемы в гидросистемах подводных объектов могут быть использованы только фрагментарно в тех случаях, когда это технически и экономически оправдано.

Таким образом, поставленная цель разработки принципов создания подводных гидросистем с рабочим телом «морская вода» может быть достигнута только при условии решения ряда задач, обусловленных следующими факторами:

- так как все компоненты водяной гидросистемы будут контактировать с морской водой, то их конструкция должна быть выполнена только из коррозионно совместимых материалов;

- низкая вязкость воды определяет повышенные требования к величине зазоров в конструкции гидроэлементов и точности изготовления деталей, в противном случае возрастают объемные потери в гидроприводе;

- из-за электропроводности морской воды необходимо обеспечить изоляцию электрических цепей в электрогидравлических компонентах (релейных и пропорциональных распределителях, электроуправляемых клапанах, датчиках давления, расхода и температуры);

- слабые смазывающие свойства морской воды не позволяют использовать традиционные решения в процессе проектирования нагруженных пар трения;

- в морской воде всегда присутствуют микроорганизмы или

органические вещества, поэтому гидросистема должна содержать устройства фильтрации нового типа;

- морская вода замерзает при температуре ниже -2°C , увеличиваясь в объеме примерно на 9%, что определяет необходимость разработки средств, снижающих опасность повреждения гидросистемы.

3. Экспериментальная обработка гидроэлементов, работающих на морской воде

Решение проблемы выбора конструкционных материалов и покрытий, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость, минимальный износ и трение в подвижных соединениях, достигается только в процессе экспериментальных исследований. Поэтому для проверки возможных вариантов были изготовлены макетные образцы следующих базовых функциональных компонентов гидросистемы:

- приводной безуплотнительный электродвигатель;

- аксиально-поршневой насос;

- предохранительный клапан;

- дискретный (релейный) распределитель;

- пропорциональный распределитель с цилиндрическим золотником;

- пропорциональный распределитель с плоским золотником;

- гидроцилиндр;

- поворотный гидродвигатель с механической передачей «рейка–шестерня»;

- запорочный и магистральный фильтры.

Для каждого компонента были изготовлены несколько модификаций важнейших узлов. В качестве базовых конструкционных материалов для изготовления корпусных деталей использовались

только титановые сплавы. Такой выбор обусловлен тем, что они широко используются как в обитаемой, так и в необитаемой подводной технике.

На первом этапе испытания созданных образцов проводились на технической (водопроводной) воде. Приведем некоторые результаты проведенных экспериментальных работ.

Электроуправляемые релейные и пропорциональные распределители являются неотъемлемой частью практически любой гидросистемы. В состав гидросистем подводных аппаратов всегда входят гидроприводы дроссельного регулирования, в которых изменения направления и величины потока жидкости осуществляются с помощью перемещения плоского или цилиндрического золотника. Этот принцип реализован и в широкой номенклатуре клапанов давления. Поэтому проблемы создания таких устройств имеют универсальный характер.

Важнейшим узлом распределителя является золотниковая пара. Золотниковая пара – это совокупность гильзы и золотника, перемещающегося относительно окон в поверхности гильзы. К золотниковой паре пропорциональных распределителей предъявля-

ются высокие требования по точности изготовления и качеству поверхности. В большинстве случаев при изготовлении золотниковой пары обеспечивается радиальный зазор между золотником и гильзой не более 2 мкм. Допуски аналогичного порядка задаются и на осевые размеры, которые технологически обеспечить сложнее, чем допуск на радиальный зазор. Наибольшую трудность представляет выдерживание допусков на размеры дросселирующих окон в гильзе.

Традиционно золотниковые пары изготавливаются из высококачественных сталей с использованием термообработки, специальных износостойких покрытий и финишной доводки поверхностей. При этом достигается ресурс работы распределителя, превышающий миллион циклов срабатывания.

Очевидно, что для распределителя, способного работать на морской воде, необходимо воспроизвести все эти функциональные характеристики. Более того, пониженная вязкость воды определяет необходимость уменьшить стандартные радиальные зазоры в золотниковой паре.

В качестве прототипа для разработки макетного образца про-

порционального распределителя была выбрана разработка МГТУ им. Н.Э. Баумана – электрогидравлический усилитель СГ4.20. Его конструктивная схема представлена на рис. 3.

Конструкция макетного образца распределителя по сравнению с базовой схемой была упрощена. В частности, был исключен индукционный датчик положения золотника. Одновременно с этим в конструкции реализован ряд решений по герметизации моментного мотора. Стальные подшипники качения, используемые в базовой конструкции, были заменены на керамические. Кроме того, в конструкцию введены подшипники скольжения, изготовленные из антифрикционного материала Zedex ZX-530.

Для макетного образца изготовлены унифицированные по габаритно-присоединительным размерам золотниковые пары из следующих материалов:

- из титанового сплава ВТ 3–1 без покрытия;
- из керамики (стабилизированный оксид циркония ZY TU 1976–003–27956034–2012);
- комбинированная пара: золотник из искусственного сапфира (оксид алюминия), гильза из оксида циркония ZY;
- комбинированная пара: гильза из титанового сплава ВТ 3–1 без покрытия, золотник из титанового сплава ВТ 3–1 с углеродной алмазоподобной пленкой.

Технология изготовления титановой золотниковой пары, несмотря на сложность обработки, является наиболее приближенной к типовым процессам производства золотниковых пар, выполненных из стандартных сплавов (например, стали 95X18). Триботехнические характеристики титановой пары, функционирующей в мор-

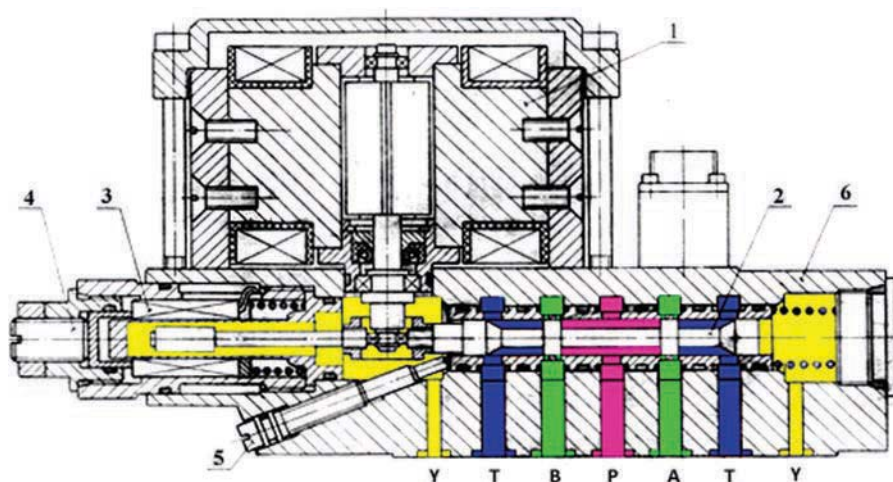


Рис. 3. Схема базовой конструкции пропорционального распределителя

ской воде, еще детально не изучены. И хотя ожидать положительных результатов от золотниковой пары, изготовленной из титановых сплавов без антифрикционного покрытия, не было особых оснований, этот вариант был необходим для проведения сопоставительного анализа.

Внешний вид золотниковых пар, изготовленных из различных материалов, представлен на рис. 4, а внешний вид макетного образца распределителя – на рис. 5.

В процессе создания золотниковых пар отрабатывалась технология изготовления высокоточных деталей из нетрадиционных материалов. Контроль качества осуществлялся на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе Carl Zeiss LSM700, позволяющем не только проводить высокоточные измерения топологии поверхностей деталей, но и осуществлять пространственную реконструкцию выявленных дефектов. Результаты проведенных измерений позволили сделать следующие выводы:

- у золотников, изготовленных из титановых сплавов (с покрытием и без него), кромка не имеет радиусов скругления, но из-за вязкости титана геометрия кромки содержит небольшие неровности, размерами не более 20 мкм;

- при обработке керамического золотника за счет биения инструмента образуются зоны микротрещин и сколов.

Такие дефекты на дросселирующих кромках золотника будут оказывать крайне негативное влияние на качество регулирования распределителя. Типичные размеры и пространственная геометрия выявленных технологических дефектов представлены на рис. 6.

Оценка эффективности каждого варианта конструктивного

исполнения золотниковой пары проводилась по результатам испытаний распределителя на стенде. Ожидаемые наихудшие результаты получены при испытании золотниковой пары, изготовленной из сплава ВТ 3–1 без покрытия. Уже после 250 циклов срабатывания золотник заклинил (см. диаграмму на рис. 7). Нанесение на золотник антифрикционного покрытия в виде углеродной алмазоподобной пленки позволило существенно увеличить ресурс работы распределителя. Тем не менее после 5000 циклов срабатывания на поверхности золотника выявлены

зоны повреждения покрытия. Поэтому испытания этого варианта были прекращены. Золотниковые пары, изготовленные из керамики, отработали 10000 циклов без видимых следов износа.

Наиболее нагруженным и конструктивно сложным компонентом гидросистемы является насос. Основная трудность при разработке насоса, работающего на морской воде, – это обеспечение работоспособности высоконагруженных узлов трения в условиях недостаточной смазки. В процессе разработки макетного образца насоса после ряда промежуточных экспе-



Рис. 4. Внешний вид золотниковых пар различного конструктивного исполнения



Рис. 5. Внешний вид пропорциональных распределителей для морской воды

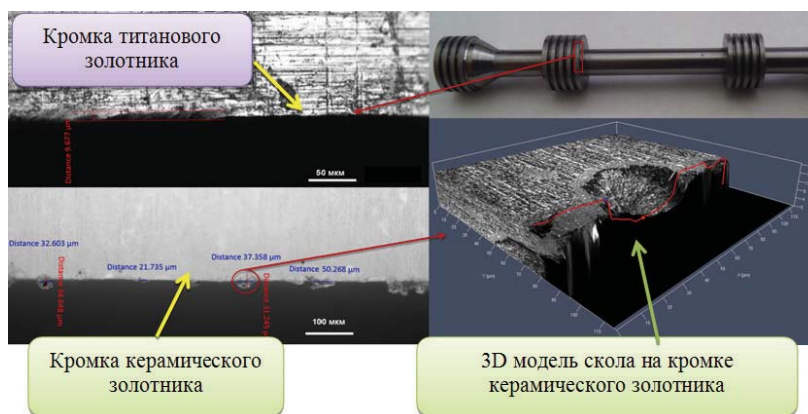


Рис. 6. Геометрия дросселирующих кромок золотников, изготовленных из титанового сплава и керамики

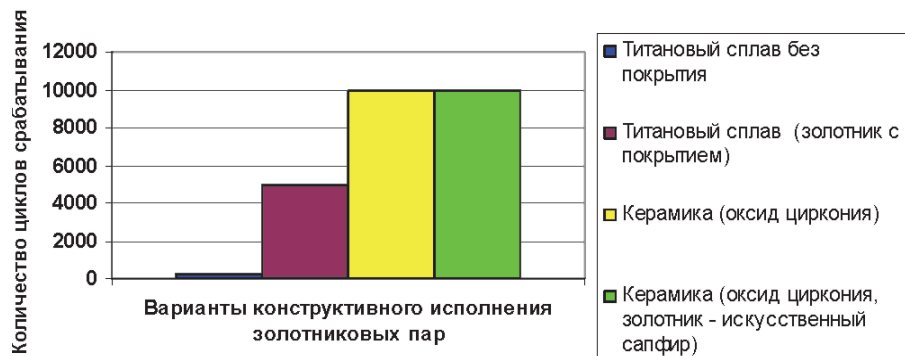


Рис. 7. Ресурс работы распределителя с различными вариантами исполнения золотниковых пар

риментов был выбран следующий вариант материалов для изготовления пар трения: титановый сплав с азотированной поверхностью и полиэфирэфиркетон (ПЭЭК). Полимер ПЭЭК является инновационным материалом, который имеет уникальный набор свойств. В настоящее время он начинает интенсивно использоваться в различных областях, вытесняя традиционные конструкционные материалы. На рис. 8 изображена принятая для реализации конструктивная схема аксиально-поршневого насоса. На рис. 9 представлен внешний вид насоса.

Макетный образец насоса без замечаний отработал на стенде 100 часов. После контрольной разборки и внешнего осмотра всех его деталей видимых следов износа не обнаружено.

Выше уже отмечалась необходимость разработки принципиально новых методов фильтрации в гидросистемах, использующих

в качестве рабочей жидкости морскую воду. Эти методы должны обеспечивать не только очистку морской воды от взвешенных механических и биологических примесей, но и стерилизацию гидросистемы с целью её защиты от биологического обрастания. Специалистами ЗАО «ЦНИИ СМ» была предложена оригинальная концепция построения системы фильтрации морской воды для подводной гидросистемы. Предполагается обеспечить подготовку морской воды двумя фильтрами: заправочным и магистральным. Заправочный фильтр используется для заполнения гидросистемы. Кроме того, через этот фильтр осуществляется водообмен между полостью гидросистемы и окружающей средой. Магистральный фильтр предназначен для текущей очистки циркулирующей в гидросистеме морской воды.

Заправочный фильтр обеспечивает трехступенчатую очистку

воды. В корпусе фильтра установлены два элемента: снаружи – щелевой фильтр с размерами щели 50 мкм, а внутри – тонкопористый фильтр из полипропиленовых волокон с тонкостью фильтрации 10 мкм. В пространство между фильтрами засыпана смешанная шихта из равных количеств титана, меди и алюминия.

В процессе работы заправочный фильтр будет постоянно заполнен морской водой. При этом в объеме смешанной шихты при контакте металлов (титан – медь – алюминий) медленно идут следующие электрохимические процессы:

- анодное растворение меди при контакте с частицами титана с образованием ионов меди Cu^{2+} ;
- анодное растворение алюминия при контакте с частицами титана и меди с образованием ионов алюминия Al^{3+} ;
- электролиз морской воды с выделением активного хлора.

Образующиеся продукты электролиза (ионы меди, гелеобразная медь и активный хлор) воздействуют на примеси биологической природы (бактерии, вирусы, простейшие, планктон и др.) и на клеточном уровне тормозят процессы их жизнедеятельности. Если период воздействия продуктов электролиза достаточно длителен (не менее часа), то достигается так называемый «бактериоста-

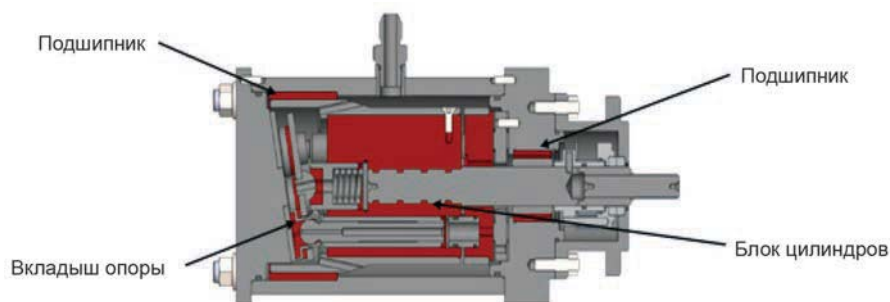


Рис. 8. Конструктивная схема аксиально-поршневого насоса для морской воды. Красным цветом показаны детали, выполненные из материала ПЭЭК Victrex WG-102



Рис. 9. Внешний вид аксиально-поршневого насоса для морской воды

тический эффект», т.е. развитие биомассы будет заблокировано. Одновременно останавливаются и процессы биообращения, непосредственно связанные с жизнедеятельностью морской органики. В периоды «отстоя», когда поток воды через фильтр не идет, он работает как своеобразный генератор и накопитель продуктов электролиза. При этом продукты электролиза уже на ионном уровне медленно диффундируют во все элементы гидросистемы и создают внутри «бактериостатический эффект».

Магистральный фильтр обеспечивает одну ступень очистки с помощью тонкопористого фильтрующего элемента, изготовленного путем спекания в вакууме титанового порошка мелких фракций. Тонкость фильтрации такого элемента 7...10 мкм. Внешний вид макетных образцов фильтров и фильтрующих элементов представлен на рис. 10.

Для дополнительного биологического обеззараживания морской воды в гидросистеме предполагается использовать ультрафиолетовое (УФ) облучение. Установлено, что наибольшим бактерицидным действием обладают лучи с длиной волны 200–300 нм. Именно УФ лучи данного спектра разрушают молекулы ДНК и РНК, являющиеся носителями наследственной информации, что приводит к гибели микроорганизмов, а также к невозможности их дальнейшего

размножения. Максимум бактерицидного действия приходится на область 260 ± 10 нм. Критерием УФ обработки служит доза облучения, представляющая собой произведение освещенности, создаваемой источником, на время экспозиции. Требуемая доза обработки зависит от многих факторов: вида микроорганизмов и их концентрации, солености воды, температуры и проч. Нормативами на ультрафиолетовую обработку питьевой воды установлено, что доза должна быть не менее $16 \text{ мВт} \cdot \text{с}/\text{см}^2$. Нормы на УФ обработку морской воды не определены. Однако по опытным данным известно, что для морской воды доза должна быть по крайней мере в 3–4 раза выше, т.е. не менее $50 \text{ мВт} \cdot \text{с}/\text{см}^2$. Реализовать УФ облучение можно различными средствами. В подводных условиях наиболее целесообразно использовать светодиодную технику. Сейчас на рынке представлена продукция фирмы SETI («Sensor Electronic Technology, Inc.») – светодиоды серии UVCLEAN-255FW-50 с мощностью светового потока от 30 мВт до 50 мВт на длину волны 255 нм. Проведенные предварительные расчеты показывают, что четыре таких светодиода, установленные во внутренней полости гидросистемы, должны обеспечить требуемую для стерилизации дозу облучения при расходах морской воды до 20 л/мин.

4. Комплексная экспериментальная отработка прототипа гидросистемы на морской воде

Для проведения комплексных натуральных испытаний в морских условиях был создан стенд, в состав которого вошли не только гидроэлементы, образующие полный прототип подводной гидросистемы, но и дополнительные измерители, устройства управления и сбора данных. Конструктивно все составные части стенда выполнены в подводном исполнении. Внешний вид стенда представлен на рис. 11.

На первом этапе с помощью этого стенда был проведен весь комплекс экспериментальных исследований созданных образцов, включая их ресурсные испыта-



Рис. 10. Макетные образцы заправочно-го и магистрального фильтров



Рис. 11. Внешний вид стенда для испытания прототипа подводной гидросистемы

ния. Так как в качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода, то часть важнейших характеристик прототипа подводной гидросистемы на этом этапе не была оценена. Поэтому на лето 2015 года запланированы морские испытания, в ходе которых прототип гидросистемы, включая системы фильтрации и биологической очистки морской воды, будет функционировать в штатных для подводной техники условиях. Только результаты натуральных экспериментов позволят сформировать обоснованные предложения по дальнейшему

развитию подводной гидравлики на морской воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты дают основание утверждать, что создание гидроэлементов для морской воды в значительной степени может базироваться на типовых, апробированных временем конструктивных решениях. Ключевой задачей разработки компонентов нового класса является рациональный подбор новых для подводной техники материалов, специальных покрытий и технологий гермети-

зации. Особую перспективность в этой области будут иметь керамические и другие неметаллические материалы, технология обработки которых является отдельной задачей.

Хотя предлагаемые методы и средства водоподготовки нуждаются в длительном тестировании, можно предположить, что задача доведения морской воды до требуемых кондиций будет решена. Это утверждение базируется на успешном отечественном опыте создания судовых систем опреснения морской воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Conrad F. Trends in design of water hydraulics – motion control and open-ended solution // Proc. of 6th JFPS International Symposium on Fluid Power. Tsukuba (Japan), 2005. P. 420–431.
2. Stanley A. Seawater hydraulic systems for underwater equipment // Proc. of 13th Annual offshore technology conference. Houston (USA), 1981. P. 155–163.
3. Haugen G., Conrad F., Grahl-Madsen M. Innovative new ROV technology utilizing water hydraulics // Proc. of 6th JFPS International Symposium on Fluid Power. Tsukuba (Japan), 2005. P. 473–478.
4. QIU Zhong-liang Design and research on a variable ballast system for deep-sea manned submersibles // Journal of Marine Science and Application. 2008. Vol. 7. Issue 4. P. 255–260.
5. Никитин О. Ф. Рабочие жидкости и уплотнительные устройства гидроприводов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 284 с.
6. Чендлер К. А. Коррозия судов и морских сооружений: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1988. 320 с.

