

На правах рукописи

Хованов Георгий Петрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОФОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА
И ОТДЕЛЬНЫЕ ВИДЫ ПОТЕРЬ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ**

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре Гидромеханики и гидравлических машин
Национального исследовательского университета «МЭИ»

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный
сотрудник Волков Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Караханьян Владимир Карпович, доктор технических наук, профессор;
Российская ассоциация производителей насосов, президент

Катенев Григорий Михайлович, кандидат технических наук;
Национальный исследовательский университет «МЭИ» / кафедра
Промышленных теплоэнергетических систем, доцент

Ведущая организация: ЗАО «Помпа» (г. Щелково)

Защита диссертации состоится «18» мая 2012 г. в 13.30
в аудитории Б-407 на заседании диссертационного совета Д 212.157.09 при
Национальном исследовательском университете «МЭИ» по адресу: 111250,
Москва, Красноказарменная ул., д. 17, корп. «Б».

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные
печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 111250, Москва,
Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «17» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доц.

Лебедева А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное состояние энергетики в РФ характеризуется направлением к повышению надежности, энергоэффективности и экологической безопасности, что соответствует основным положениям «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» и ФЗ - 261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

По данным Министерства по науке и образованию РФ до 60 % резервов возможной экономии электроэнергии находится в сфере потребления. Обширной областью для использования различных энергосберегающих технологий является теплоэнергетика. Так, на работу насосных агрегатов затрачивается до 10 % вырабатываемой на ТЭЦ электроэнергии. В стоимости эксплуатационных затрат на обслуживание насосов оплата электроэнергии на привод составляет до 85%. Более того, с течением времени, энергопотребление рассматриваемых агрегатов растет в виду нарастающего износа элементов насосного агрегата связанного с характером перекачиваемой среды, работой в не расчетном режиме, а так же условиями ремонта и последующей эксплуатации. Кроме того проявляются дополнительные, отрицательные эффекты – увеличение шума и вибраций с течением времени. Наряду с разработкой и созданием новых, более совершенных центробежных насосов, актуальным является направление, связанное с их модернизацией. Причем модернизация может реализовываться как заменой элементов (узлов) насоса, так и на основе придания новых свойств элементам насосных агрегатов.

Основой повышения эффективности центробежных насосов является совершенствование гидродинамических качеств проточной части, направленное на снижение потерь при передаче механической энергии рабочему потоку. Значительный интерес для эксплуатирующих организаций представляют модификации, изменяющие гидродинамическое взаимодействие поверхностей элементов проточной части и рабочего потока без изменения конструкции насоса. Реализация такого подхода возможна на основе изменения свойств

функциональных поверхностей центробежных насосов структурированными покрытиями, которые обеспечивают снижение потерь.

В качестве структурированного покрытия перспективным является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) и фторполимеров, создающих эффекты гидрофобности, которые снижают потери и обеспечивают защиту поверхности от коррозионных процессов, повышая одновременно надежность при эксплуатации.

Цель работы заключается в экспериментальном и расчетно-теоретическом исследовании влияния изменения гидродинамического взаимодействия элементов проточной части центробежных насосов и рабочей среды на эксплуатационные характеристики и отдельные виды потерь в центробежных насосах, посредством модификации гидрофобным рельефом функциональных поверхностей.

Основными задачами работы являются:

- определение влияния гидрофобности при создании покрытий на основе ПАВ и на основе фторопласта на энергетические, кавитационные, акустические и вибрационные характеристики центробежных насосов;
- экспериментальные и расчетно-теоретические исследования влияния гидрофобизации на гидродинамику обтекания канонической области типа «пластина»;
- экспериментальные и расчетно-теоретические исследования влияния гидрофобности на характеристики центробежного насоса КМ 65-50-160 при дискретной модификации функциональных поверхностей;
- экспериментальные исследования влияния гидрофобности на потери в центробежных насосах в зависимости от быстроходности и конструктивного исполнения;
- оценка эффективности гидрофобизации поверхностей РК и стойкости покрытия на основе ПАВ в условиях длительной эксплуатации на теплоэнергетическом объекте.

Методами исследования установлены: литературный поиск; патентный анализ; энергетические и кавитационные, акустические, вибрационные и

термографические исследования характеристик центробежного насоса при создании на поверхностях элементов проточной части дискретного гидрофобного покрытия; исследования изменения сопротивления канонической области течения типа «пластина» при изменении микроструктуры и гидрофобизации ее поверхности; численное моделирование обтекания пластины с использованием комплекса «FlowVision»; численное моделирование изменения гидродинамики течения в проточной части центробежного насоса с использованием комплекса «FlowVision»; оценка снижения энергопотребления и увеличение межремонтного периода при создании гидрофобного покрытия на поверхностях РК центробежного насоса в условиях эксплуатации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны технологические основы повышения эксплуатационных качеств центробежных насосов на основе гидрофобизации поверхностей элементов проточной части;
- разработана методика дискретного формирования гидрофобных покрытий на основе ПАВ и фторполимера на поверхностях РК центробежных насосов;
- разработаны методики и проведены виброакустические и термографические исследования центробежных насосов, по определению влияния гидрофобизации поверхностей РК на величину тепловых потерь;
- установлена зависимость прироста КПД за счет гидрофобизации элементов проточной части центробежных насосов типа «КМ» и «СМ» для различных значений коэффициента быстроходности;
- исследовано изменение гидравлического сопротивления, на примере обтекания пластины, со структурированной модификацией обтекаемых поверхностей;
- выполнено сравнение результатов численного моделирования обтекания пластины с использованием «FlowVision» и экспериментальных данных;

- осуществлены ресурсные испытания гидрофобного покрытия поверхностей РК центробежных насосов в условиях эксплуатации, на одном из центральных тепловых пунктов г. Москвы;
- подтверждено отсутствие деформации формы канала РК, обусловленное накоплением отложений, в течение длительного периода эксплуатации центробежного насоса.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- подтверждено повышение КПД, снижение вибрации, акустического шума и тепловых потерь при дискретной гидрофобизации поверхностей РК на основе ПАВ и на основе фторопласта, при сохранении кавитационных качеств;
- осуществлены исследования влияния гидрофобизации и изменения микроструктуры обтекаемых поверхностей на гидродинамику потока в канонической области течения на примере обтекания пластины, позволяющие переносить полученные результаты на другие области течения;
- осуществлены расчетно-теоретические исследования обтекания пластины для различных вариантов граничных условий и моделей течения с использованием комплекса «FlowVision», проведено сопоставление с результатами физического эксперимента;
- осуществлены расчетно-теоретические исследования характера течения в проточной части центробежного насоса с гидрофобизированной поверхностью, позволяющее прогнозировать его энергетические характеристики и проводить оценку изменения потерь дискретной модификации поверхностей элементов проточной части;
- для центробежных насосов типа КМ и СМ в диапазоне коэффициента быстроходности от 40 до 130, проведены исследования влияния гидрофобных покрытий на основе ПАВ и на основе фторопласта на рабочие

характеристики, подтверждено повышение КПД при сохранении работоспособности;

- проведены промышленные испытания в условиях длительной эксплуатации (более двух с половиной лет) на теплоэнергетическом объекте гидрофобного покрытия функциональных поверхностей РК, показавшее повышение эффективности и надежности при отсутствии деформации рабочих каналов РК в течении длительной эксплуатации.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов определяется:

- использованием апробированных методик планирования и проведения исследований, методик анализа экспериментальных результатов, применением средств измерений необходимой точности;
- удовлетворительной сходимостью результатов исследований при многократных повторениях;
- использованием апробированных пакетов расчетно-теоретических исследований гидродинамических процессов.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы использованы:

- при модернизации центробежного насоса КМ 100-80-160, используемого для системы холодного водоснабжения, эксплуатирующегося на центральном тепловом пункте № 0812/110 (г. Москва, ул. Нагорная, д. 40) филиала №7 «Юго-Западный» ОАО «МОЭК»;
- при модернизации центробежного насоса СМ 100-65-200/1, функционирующего в системе перекачки сточных вод на канализационной насосной станции населенного пункта Жигалово Московской области (МП «Щелковский Водоканал»);
- при модернизации центробежного насоса СД 50/10, функционирующего в дренажной системе ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» (г. Москва ул. Монтажная д.1/4).

Материалы диссертационной работы применены в учебном процессе кафедр ГГМ имени В.С. Квятковского и ПТС НИУ «МЭИ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- заседаниях кафедры Гидромеханики и гидравлических машин имени В.С. Квятковского НИУ «МЭИ», 2009 – 2012 гг.;
- Международной студенческой научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» в 2009 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- XIV, XV, XVI, XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 2008, 2009, 2010 и 2011 гг., Москва, НИУ «МЭИ»;
- Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» 2008 и 2010 гг., Москва, НИУ «МЭИ»;
- Международной научно-технической конференции «ЕСОPUMP.RU'» 2009, 2010 и 2011 гг., Москва, МВЦ «Крокус Экспо»;
- Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» - ЭНЕРГО – 2010 (Москва, 1-3 июня 2010г.), НИУ «МЭИ»;
- Научно-практической конференции «Итоги реализации проектов в рамках приоритетного направления «Энергетика и Энергосбережение» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2001 – 2012 годы» за 2009 год», Москва, НИУ «МЭИ».

На защиту выносятся:

- Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований влияния структуры и гидрофобных свойств поверхности на гидродинамику

потока и гидравлические потери трения при обтекании в канонической области типа «пластина»;

- Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований влияния дискретной модификации гидрофобными покрытиями на основе ПАВ и фторопласта функциональных поверхностей элементов проточной части на энергетические, кавитационные, виброакустические и термографические характеристики центробежного насоса;
- Технологические основы повышения энергоэффективности и надежности центробежных насосов путем дискретной модификации функциональных поверхностей РК, а так же оборудование для их реализации;
- Результаты экспериментального исследования влияния гидрофобных покрытий на энергетические качества для центробежных насосов типов «КМ» и «СМ» в диапазонах коэффициента быстроходности от 40 до 130 и от 50 до 100 соответственно;
- Результаты ресурсных испытаний гидрофобного покрытия на основе ПАВ в условиях длительной эксплуатации на теплоэнергетическом объекте;

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 9 печатных трудов, из них в изданиях по перечню ВАК – 5 статей, 1 доклад, 2 патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 350 стр., имеет 150 рисунков и 40 таблиц, включает титульный лист, содержание, список основных условных обозначений, введение, 4 главы, заключение и список использованных источников (200 наименований).

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры ГГМ имени В.С. Квятковского НИУ «МЭИ»: профессору Г.М. Моргунову, доцентам А.И. Давыдову и С.Н. Панкратову за помощь в работе. Так же автор выражает глубокую благодарность сотрудникам Научного центра «Повышение износостойкости энергетического оборудования электростанций» НИУ «МЭИ» за предоставление оборудования и измерительных устройств, помощь в работе и ценные замечания по ее выполнению.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе рассматриваются вопросы совершенствования насосного оборудования, соответствующие Федеральным и региональным законодательным актам по энергосбережению, а также политике Российской ассоциации производителей насосов.

Анализ литературных источников показал, что несмотря на многообразие предлагаемых способов совершенствования центробежных насосов, не уделяется должного внимания модернизации, обеспечивающей изменение гидродинамического взаимодействия рабочего потока и поверхностей элементов проточной части на основе их гидрофобизации. Таким образом, перспективность предложенной модернизации определяет актуальность исследований, изложенных в диссертации.

Во второй главе осуществлены экспериментальные исследования комбинированного влияния структуры поверхности и гидрофобизации на смачиваемость, а так же гидродинамику в канонической области течения типа «пластина», при обтекании последней в продольном направлении без градиента давления. Проанализированы результаты экспериментальных исследований гипотез взаимодействия структурированных гидрофобных поверхностей с потоком жидкости на примере нано-размерного канала, а так же течения между 2-мя пластинами. Отмечено, что полученные закономерности распределения скоростей могут являться основой расчета течения для других областей без ярко выраженного отрыва потока, например для динамических насосов. Для получения достоверных, доступных для анализа и сравнения сведений экспериментальные исследования проводились для двух видов структурированной модификации поверхности: гидрофобного покрытия на основе ПАВ и комплекса «гидрофобное покрытие на основе ПАВ с измененной микроструктурой поверхности». При этом, для определения величины сопротивления F , для плоской пластины

шириной $b_{пл}$, по распределению скоростей u в спутном течении применялась теорема импульсов:

$$F = 2 \cdot b_{пл} \rho \int_0^{\infty} u(U_{\infty} - u) dy,$$

где ρ – плотность жидкости, U_{∞} – скорость невозмущенного потока, y – координата, нормальная к поверхности пластины.

Для исследований использовался гидродинамический лоток НИУ «МЭИ» открытого типа. Определение скорости потока в спутном течении (следе) за пластиной осуществлялось при помощи трубки Пито-Прандтля. Размеры пластины: 250 x 250 x 1 мм. Скорость невозмущенного потока в лотке составляла 0,735 м/с. Числа Рейнольдса, определенные по длине пластины и для основного потока в гидродинамическом лотке составляют $1,8 \cdot 10^5$ и $2,1 \cdot 10^5$ соответственно. Обеспечивался турбулентный режим течения в пограничном слое. Сопротивление гидравлического трения определялось путем вычитания величины лобового сопротивления из величины полного сопротивления.

Экспериментальные исследования проводились для пластины в исходном состоянии и после модификации. Пластина после испытаний с исходным состоянием поверхности подвергалась полировке с уменьшением шероховатости в 2 раза (с Rz 16.2 до 8.0 мкм). После проведения серии исследований на пластине формировалось гидрофобное покрытие на основе ПАВ. Величина краевого угла для поверхности в исходном состоянии составила $50^{\circ} - 55^{\circ}$, для полированной поверхности – $100^{\circ} - 105^{\circ}$, а для полированной поверхности гидрофобизированной ПАВ – $120^{\circ} - 135^{\circ}$. Исходная шероховатость пластины составила Rz 16.2 мкм, после полировки – 8.0 мкм, а после формирования покрытия на основе ПАВ осталась неизменной. Результаты экспериментальных исследований измерения скоростей потока проводились на расстоянии 20, 30 и 40 мм за пластиной, на рисунке 1 приведено сравнение для исходной и полированной поверхностей. Среднее снижение сопротивления трения после полировки составило 15%, а после гидрофобизации поверхностей на основе ПАВ полированной пластины составило 18%.

Осуществлено расчетно-теоретическое исследование внешнего обтекания «пластины» в продольном направлении без градиента давления с использованием программного комплекса «FlowVision». Геометрия расчетной области, а так же режим течения соответствовали данным физического эксперимента. На рисунке 2 представлены результаты полученных расчетно-теоретических профилей скорости для исходной и полированной. Расчетное снижение сопротивления трения после моделирования полировки поверхности составило 18 %.

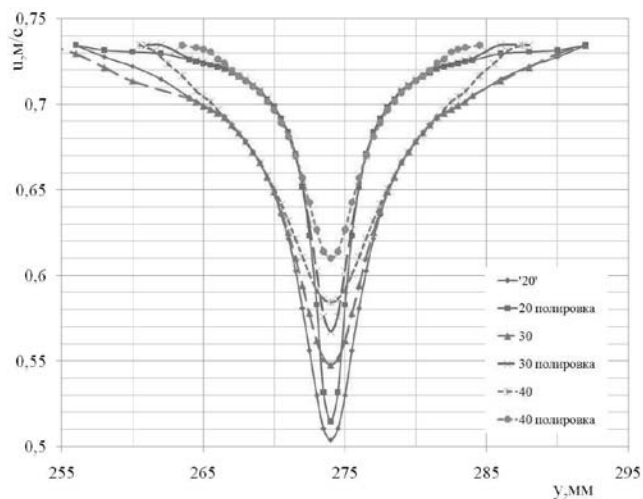
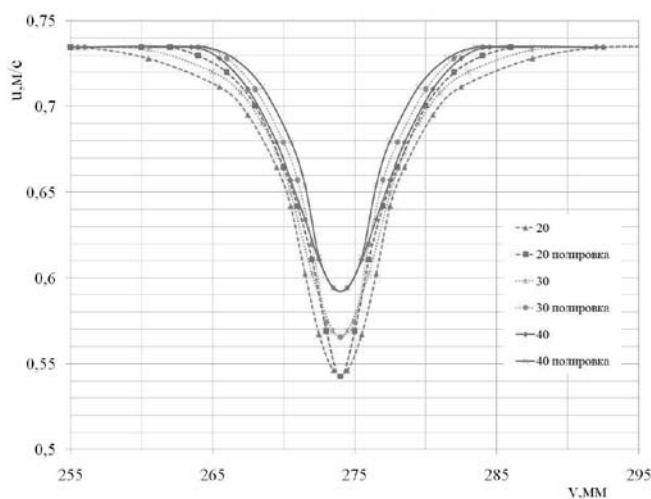


Рис. 1. Экспериментальные профили скорости до и после полировки и после полировки поверхности

В третьей главе проведен анализ влияния гидрофобности функциональных поверхностей проточной части центробежных насосов на эксплуатационные качества и отдельные виды потерь. Указанный анализ производился по пяти направлениям с определением соответствующих характеристик: энергетических, кавитационных, акустических, вибрационных, термографических. В качестве объекта для детального анализа выбран центробежный насос КМ 65-50-160, как наиболее распространенный в системах тепло- и водоснабжения.

Рассмотрено влияние гидрофобности функциональных поверхностей на отдельные виды потерь. Выявлено различное влияние эффекта гидрофобности на изменение энергетических характеристик в зависимости от коэффициента быстроходности и конструктивных особенностей центробежного насоса.

Для реализации предложенной модификации на основе ПАВ, были разработаны технологические основы повышения энергоэффективности

центробежных насосов и спроектирована экспериментальная установка с оптимизированной гидродинамикой. Соответствующие технические решения апробированы и запатентованы. Для модификации на основе фторопласта, разработаны технологические основы повышения энергоэффективности центробежных насосов и сформирован технологический комплекс для их реализации.

На первом этапе проводились энергетические и кавитационные испытания насоса в исходном состоянии. Далее проводились исследования влияния гидрофобного покрытия созданного на всех поверхностях РК. Их целью была оценка возможности влияния гидрофобного покрытия на изменение КПД насоса. Для обеспечения независимости и достоверности получаемых результатов использовалось несколько РК. Для модификации на основе ПАВ использовались 3 РК, а для фторопласта – 2. При этом каждое РК проходило предварительную «обкатку» с получением исходных данных по энергетике и кавитации.

Исходная степень гидрофобности, при оценке по краевому углу смачиваемости поверхности, для всех рабочих колес изменяется в пределах от 50° до 55° . Степень гидрофобности модифицированных поверхностей на основе ПАВ колеблется в пределах от 130° до 150° , а для технологии на основе фторопласта составляет порядка 130° . Кроме того, оценивалась шероховатость исходных и модифицированных поверхностей. Для необработанных поверхностей дисков каждого РК в исходном состоянии шероховатость составила 60 – 75 мкм шероховатость после модификации на основе ПАВ осталась на прежнем уровне, а после модификация на основе фторопласта 30 – 40 мкм.

Энергетические, кавитационные, акустические и вибрационные испытания насоса КМ 65-50-160 проводились в соответствии с ГОСТ 6134 – 2007 «Насосы динамические. Методы испытаний» на энерго-кавитационном стенде НИУ «МЭИ». Основным критерием оценки эффективности модификации функциональных поверхностей выбрана прибавка КПД.

На втором этапе проводились исследования при дискретном нанесении гидрофобного покрытия на функциональные поверхности проточной части

центробежного насоса КМ 65-50-160. С этой целью для всех РК, выбранных для последующей модификации, были получены исходные характеристики по энергетике и кавитации, а так же были проведены дополнительные виброакустические и термографические исследования. Акустические испытания проводились в соответствии с ГОСТ 31300-2005 «Шум машин. Насосы гидравлические. Испытания на шум». Вибрационные испытания отвечали требованиям ГОСТ 6134-2007, ГОСТ 22247-96 «Насосы центробежные консольные для воды. Основные параметры и размеры. Требования безопасности. Методы контроля», ГОСТ ИСО 10816-1-97 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на не вращающихся частях». Термографические исследования проводились на основе ISO 18434-1(2008-03-01) «Мониторинг технического состояния и диагностика машин и механизмов – Термография – Часть 1. Общие методы».

В ходе выполнения второго этапа, 3 РК подвергались дискретной модификации с покрытием на основе ПАВ, а еще 2 – на основе фторопласта, по выбранной на основе анализа полученных ранее результатов схеме. Изменение КПД для модификации на основе ПАВ представлено на рисунке 3. Для покрытий на основе фторопласта отмечается схожая картина изменения КПД (см. рисунок 4). Установлено, что величина прибавки КПД в зависимости от области и комбинации поверхностей, модифицированных структурированным покрытием варьируется в диапазоне от 1,5 до 6%. При достижении указанных величин прироста КПД сохраняются работоспособность гидроагрегата и кавитационные качества.

Результаты виброакустических испытаний для РК с поверхностью, модифицированной по ПАВ – технологии представлены на рисунках 7 и 8, результаты модификации на основе фторопласта имеют тот же характер.

Результаты термографических исследований показали некоторое снижение температуры поверхности корпуса насоса, при соблюдении неизменности температуры внешней среды, вследствие снижения гидравлических потерь трения.

Для определения влияния гидрофобности поверхностей проточной части центробежных насосов на прибавку к КПД в зависимости от n_s были проведены исследования двух типов насосов – «КМ» и «СМ» (рисунки 5 и 6), при этом диапазон изменения n_s составил для первого – от 40 до 130, а для второго от 50 до 100, соответственно. Испытания проводились на сертифицированном испытательном стенде ЗАО «ПОМПА».

Полученные зависимости (η от n_s) позволяют осуществлять целенаправленную модификацию проточной части гидроагрегата и прогнозировать значение прибавки КПД.

С целью промышленной апробации эффекта гидрофобности функциональных поверхностей проточной части центробежных насосов и определения ресурса покрытия проводились испытания центробежного насоса КМ 100-80-160 ($n_s = 136$) в условиях длительной эксплуатации. В ходе испытаний проводился систематический контроль рабочих параметров насоса и состояния модифицированной поверхности.

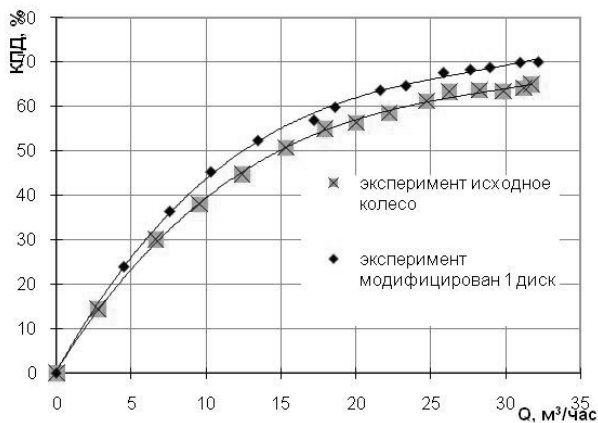


Рис. 3. Зависимость КПД от расхода насоса КМ 65-50-160 до и после создания гидрофобного покрытия на основе ПАВ

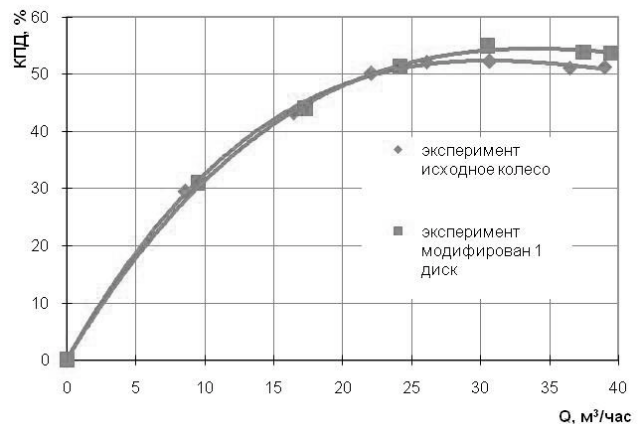


Рис. 4. Зависимость КПД от расхода насоса КМ 65-50-160 до и после создания гидрофобного покрытия на основе фторопласта

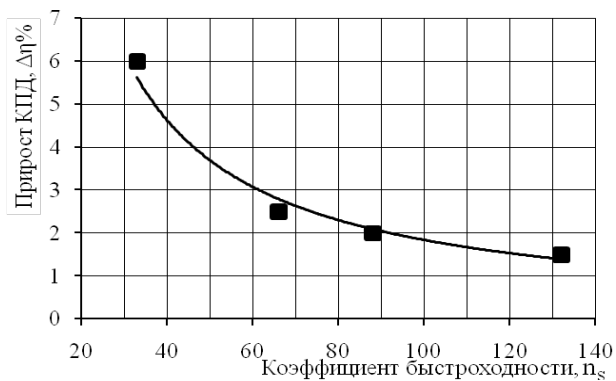


Рис. 5. Прирост КПД для насосов типа «КМ» в зависимости от n_s

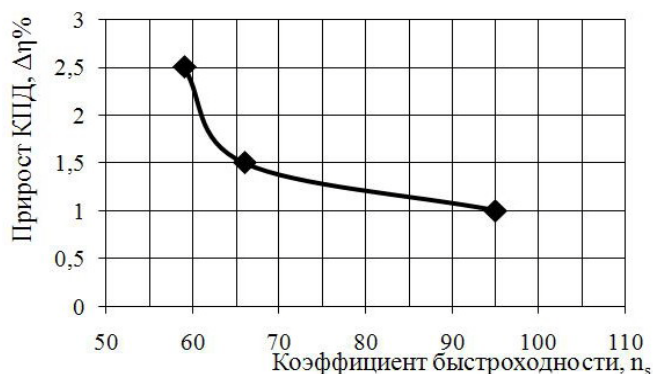


Рис. 6. Прирост КПД для насосов типа «СМ» в зависимости от n_s

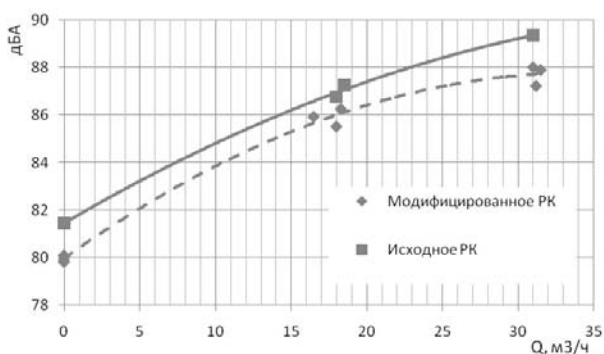


Рис. 7. Зависимость уровня звуковой мощности от расхода до и после модификации на основе ПАВ для насоса КМ 65-50-160

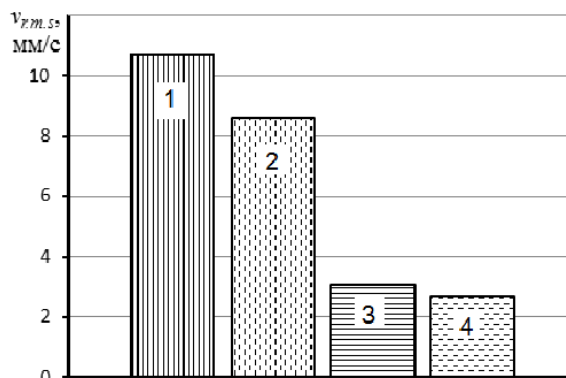


Рис. 8. Значение общего уровня вибрации в 2-х плоскостях (O_x - 3, 4; O_y - 1, 2) до (1, 3) и после модификации (2, 4) на основе ПАВ для насоса КМ 65-50-160

Было определено влияние гидрофобности поверхностей РК на образование отложений и изменение формы рабочего канала РК. Особенностью таких исследований явился переход к интегральным методам оценки параметров работы насоса, таким как удельное и суммарное потребление электроэнергии и применение комплексной оценки состояния поверхностей канала РК, в том числе визуальный осмотр РК. Насос эксплуатировался на объекте малой энергетики – центральном тепловом пункте (ЦТП) г. Москвы, обеспечивающем работу системы холодного водоснабжения.

Промышленный эксперимент проводился в несколько этапов:

- анализ исходного состояния гидроагрегата, его энергопотребление, состояние поверхности, определение степени гидрофобности поверхности;

- модификация РК, с последующими тестовыми испытаниями длительностью в 14 суток;
- систематический контроль энергопотребления, состояния поверхности, наличия отложений – каждые 2 месяца.

Краевой угол смачиваемости поверхности (степень гидрофобности) для исходного состояния поверхности составил 55° , а для модифицированной – 130° .

Оценка эффективности модификации проводилась на основе сравнения энергопотребления до и после модификации по данным об удельном среднесуточном потреблении электроэнергии на единицу перекачиваемого объема жидкости N_Q , равном отношению среднесуточному потреблению электроэнергии $N_{сут}$ и среднесуточному расходу $Q_{сут}$. Результаты тестовых испытаний показали снижение потребления электроэнергии в среднем на 7- 10 Вт/м³ (на каждый перекаченный 1 м³ рабочей среды), что за 14 суток непрерывной эксплуатации составило 108 кВт*ч (тестовые испытания проводились совместно с Чернышевым С.А. и так же отражены в его диссертационной работе).

На момент завершения промышленной апробации, центробежный насос проработал непрерывно 2,5 года без остановов на ремонт или переключение на резервные гидроагрегаты, что эквивалентно 7,5 годам штатной эксплуатации (при двойном резервировании).

В четвертой главе осуществлены расчетно-теоретические исследования гидродинамики центробежного насоса КМ 65-50-160 с использованием программного пакета «FlowVision». Проведен анализ влияния гидрофобизации функциональных поверхностей на гидродинамику в проточной части насоса, а так же на локальные и интегральные характеристики.

Расчетно-теоретические исследования проводились в 2 этапа: на первом этапе проводились работы по тестированию расчетного пакета на стандартных задачах в канонических областях, с дальнейшим переходом к постановке задачи исследования гидродинамики течения в центробежном насосе КМ 65-50-160. На втором этапе проводились исследования влияния гидрофобизации

функциональных поверхностей проточной части на гидродинамику течения в центробежном насосе. В ходе проведения работ по первому этапу рассматривались 2 варианта расчетной геометрии и решения поставленной задачи: применение геометрии с учетом утечек и движения жидкости в пазухах между РК и корпусом насоса и вариант без учета утечек и течений в пазухах корпуса насоса. Результаты расчетно-теоретических исследований оценивались по локальным и интегральным характеристикам.

На основе данных полученных на первом и втором этапах расчетно-теоретических исследований разработаны рекомендации, в частности определена оптимальная по временным и трудовым затратам расчетная схема – модель расчета без учета утечек и течений в пазухах; определен диапазон достоверной, корректной применимости расчетного пакета для анализа гидродинамики течения в проточной части центробежного насоса по расходу. Результаты расчетных исследований показали высокую степень соответствия экспериментальным данным.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Подтверждено повышение энергоэффективности при улучшении виброакустических показателей, снижении тепловых потерь центробежного насоса КМ 65-50-160 и сохранении кавитационных качеств, при дискретном создании гидрофобных покрытий на основе ПАВ и фторопласта на функциональных поверхностях проточной части.
2. Проведены экспериментальные исследования влияния структуры поверхности на смачиваемость и гидродинамику течения при обтекании в канонической области типа «пластина», показавшие влияние шероховатости гидрофобизированной поверхности на снижение гидравлического трения.
3. Осуществлены расчетно-теоретические исследования обтекания пластины с применением комплекса «FlowVision» для различных граничных условий на поверхности, результаты которых показали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

4. Осуществлены расчетно-теоретические исследования гидродинамических качеств проточной части центробежного насоса типа КМ 65-50-160 с использованием расчетного комплекса «FlowVision» и анализ его возможностей по учету гидрофобности поверхностей проточной части, обеспечивающих возможность исследования изменения потерь в лопастной системе и прогнозирование эффективности применения гидрофобных покрытий.
5. Проведен промышленный эксперимент на теплоэнергетическом объекте (ЦТП), результаты которого показали снижение энергопотребления центробежного насоса типа КМ 100-80-160 в условиях эксплуатации после создания гидрофобного покрытия на основе ПАВ на поверхностях РК.
6. Определен ресурс гидрофобного покрытия на основе ПАВ, созданного на поверхностях РК насоса КМ 100-80-160, в условиях непрерывной эксплуатации в течение длительного периода времени.
7. Определено влияние гидрофобности на энергетические характеристики центробежных насосов типа «КМ» и «СМ» в зависимости от коэффициента быстроходности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Волков А.В., Жарковский А.А., Парыгин А.Г., Пугачев П.В., Хованов Г.П. Расчетно-теоретические исследования характеристик насосов с малым коэффициентом быстроходности//Новое в российской электроэнергетике – 2010. – №2. С.36-44.

2. Волков А.В., Давыдов А.И., Хованов Г.П. Экспериментальные исследования эффекта гидрофобизации твердых поверхностей и элементов центробежных насосов // Промышленная энергетика – 2010. – №11. С.41-44.

3. Волков А.В., Парыгин А.Г., Давыдов А.И., Хованов Г.П. Повышение энергоэффективности центробежного насоса путем использования лопастной системы с переменным шагом//Надежность и безопасность энергетики – 2011. – №3. С.53-56.

4. **Волков А.В., Парыгин А.Г., Давыдов А.И., Хованов Г.П. Влияние гидрофобного покрытия на энергоэффективность центробежного насоса// Надежность и безопасность энергетики – 2011. – №4. С.67-70.**

5. **Волков А.В., Парыгин А.Г., Давыдов А.И., Хованов Г.П. Экспериментальные исследования влияния наноструктурированных покрытий на виброакустические характеристики центробежного насоса// Энергетик – 2012. – №1. С.44-46.**

6. Рыженков В.А., Волков А.В., Парыгин А.Г., Хованов Г.П. Рабочее колесо центробежного насоса// Патент №102713 RU от 03.08.2010

7. Рыженков В.А., Волков А.В., Парыгин А.Г., Хованов Г.П. Установка для нанесения гидрофобного покрытия на рабочие колеса центробежных насосов// Патент №106563RU от 15.03.2011

8. Волков А.В., Парыгин А.Г., Хованов Г.П., Наумов А.В. Повышение энергоэффективности эксплуатирующихся центробежных насосов на основе модификации поверхности проточных частей// Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» - ЭНЕРГО – 2010 (Москва, 1-3 июня 2010г.) – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

9. Волков А.В., Давыдов А.И., Хованов Г.П. К вопросу об использовании супергидрофобности для повышения эффективности центробежных насосов // Насосы и оборудование – 2009. – №6(59). С.48-51.