

На правах рукописи



Свобода Дмитрий Геннадьевич

МЕТОДИКА РАСЧЕТА
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОСЕВЫХ НАСОСОВ
РАБОТАЮЩИХ НА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Специальность 05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: Жарковский Александр Аркадьевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Тимушев Сергей Федорович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
г. Москва, заведующий кафедрой 202 «Ракетные
двигатели»
Захаров Александр Викторович
кандидат технических наук, доцент,
СКБ «Гидротурбомаш» АО «Силовые машины»
г. Санкт-Петербург, зам. гл. конструктора по РЭР

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
г. Москва

Защита состоится 20 декабря 2016 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенного по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главный учебный корпус, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (<http://www.spbstu.ru>).

Автореферат разослан « ____ » « _____ » 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д
доктор тех. наук, профессор



212.229.09
Хрусталеv Борис Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время разрабатываются реакторные установки (РУ) на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. Циркуляция теплоносителя через активную зону реактора должна осуществляться насосами осевого типа. В России созданы и эксплуатируются центробежные и диагональные насосы, работающие на жидкометаллическом натрии и эвтектике свинец-висмут для РУ на быстрых нейтронах. Опыт создания и эксплуатации осевых насосов, перекачивающих тяжелый жидкометаллический теплоноситель (ТЖМТ) свинец отсутствует. В связи с этим вопросы, связанные с проектированием осевых насосов, работающих на жидкометаллическом свинце, являются актуальными.

Цель и задачи работы. Целью работы является создание высокоэффективной проточной части осевого насоса низкой быстроходности, работающего на тяжелом жидкометаллическом теплоносителе – свинец.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие **основные задачи:**

1. Рассмотреть специфику течения свинцового ТЖМТ в проточной части осевого насоса. Проанализировать используемые методы расчета, проектирования и оптимизации проточной части осевых насосов. Сформулировать основные требования к лопастной системе, работающей на ТЖМТ.

2. Определить параметры математической модели для расчета вязкого трехмерного течения, локальных и интегральных характеристик проточной части осевого насоса низкой быстроходности с использованием пакета Ansys CFX. Установить возможности и точность математической модели.

3. Исследовать влияние геометрических параметров лопастной системы и конструктивных элементов проточного тракта на прогнозные интегральные параметры и форму напорной характеристики осевого насоса низкой быстроходности ($n_s=580$).

4. С использованием двумерных и трехмерных гидродинамических методов создать методику проектирования проточной части осевого насоса, обеспечивающую требуемые напор, КПД в расчетной точке и незападающую форму напорной характеристики в диапазоне рабочих режимов.

5. Выполнить численную оптимизацию геометрии проточной части насоса.

6. Предложить методику обеспечения антиэрозионных качеств осевого насоса, работающего на высокотемпературном ТЖМТ и создать проточную часть с требуемыми антиэрозионными качествами без ухудшения формы напорной характеристики.

7. Провести верификацию расчетных и экспериментальных энергетических и кавитационных характеристик спроектированных вариантов проточной части с результатами испытаний на воде и ТЖМТ.

Объект исследования. Проточная часть осевого насоса низкой быстроходности ($n_s \approx 580$), работающего на высокотемпературном тяжелом жидкометаллическом теплоносителе – свинец.

Методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решены на основе использования совокупности методов вычислительной гидродинамики, оптимизации, обработки и анализа данных.

Научная новизна.

На основе расчета трехмерного вязкого течения в проточной части осевого насоса создана методика расчета и проектирования осевых насосов низкой быстроходности, работающих на жидкометаллическом теплоносителе, в том числе:

- численно определено влияние геометрических параметров лопастной системы и конструктивных элементов проточного тракта на энергетические характеристики насоса.
- даны рекомендации по выбору параметров лопастной системы, которые позволяют обеспечить насосу, работающему на ТЖМТ, требуемые параметры в рабочей точке и незападающую форму напорной характеристики.
- показано, что при создании осевого насоса, работающего на ТЖМТ, можно применять методики проектирования на рабочей жидкости – вода.
- даны рекомендации по величине коэффициента кавитационного запаса насоса на воде, который должен обеспечить отсутствие эрозионных разрушений поверхностей проточной части, работающей на ТЖМТ.
- обоснована возможность получения энергетических характеристик моделей проточных частей осевых насосов, предназначенных для работы на ТЖМТ, при проведении их испытаний на воде.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

Определены параметры математической модели для анализа течения и прогнозирования характеристик проточной части осевого насоса низкой быстроходности. Определено влияние гидродинамических и конструктивных параметров проточной части на энергетические и кавитационные показатели осевого насоса. Даны рекомендации по проектированию проточных частей осевых насосов с высокими энергетическими и антиэрозионными показателями и незападающей формой напорной характеристики. Обоснована возможность получения энергетических характеристик насоса, предназначенного для работы на ТЖМТ, путем его численного и экспериментального исследования на воде.

Результаты расчетов и проектирования подтверждены при экспериментальных исследованиях на различных рабочих жидкостях.

Достоверность результатов. Достоверность результатов теоретических исследований и проектирования с использованием двух- и трехмерных методов подтверждена хорошей сходимостью с результатами экспериментов, проведенных с участием автора, на воде и ТЖМТ – свинец.

Личный вклад соискателя. В научных публикациях, которые раскрывают основные результаты работы, автору принадлежат:

- постановка задачи по расчету течения и проектированию проточных частей осевого насоса низкой быстроходности;
- апробация методики расчета характеристик осевых насосов низкой быстроходности с использованием двухмерных и трехмерных гидродинамических методов;
- создание методики проектирования осевого насоса низкой быстроходности с незападающей напорной характеристикой, высокими энергетическими и антиэрозионными качествами;
- уточнение программы-методики проведения экспериментальных испытаний, измерений и обработки результатов испытаний на водяном стенде и стенде с ТЖМТ;
- участие в модельных испытаниях спроектированных проточных частей;
- создание методики прогнозирования энергетических и кавитационных характеристик насоса.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: МНТК «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», СПб, СПбПУ, 2012, 2014, 2016; МНТК «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», г. Москва, АО «НИКИЭТ», 2014; МНТК «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика», г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014; XVIII МНТК студентов и аспирантов "Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика", Москва, НИУ «Московский энергетический институт», 2014; МНТК ESCOPUMP-RUS'2015 «Энергоэффективность и инновации в насосостроении. Импортзамещение и локализация производства в России», Москва, 2015.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 научных работ (в т.ч. 7 работ в журналах, рекомендованных ВАК).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка литературы из 77 наименований. Основное содержание работы изложено на 185 страниц (включает 154 рисунка и 22 таблицы).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования. Описывается современное состояние, проблемы и перспективы развития лопастных насосов, работающих в качестве циркуляционных на жидкометаллическом теплоносителе в РУ на быстрых нейтронах. Сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе проведен обзор литературы по проектированию проточной части осевых насосов (К. Пфлейдер, А.И. Степанов, А.А. Ломакин, С.С. Руднев, А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко, современные работы – Г.В. Бураков, М.Э. Кхин, О.А. Матвиенко и другие). Рассмотрены имеющиеся двумерные, квазитрехмерные и трехмерные (3D-методы) методы проектирования, основанные на гидродинамическом расчете течения жидкости в проточной части. Проанализированы особенности программных комплексов Ansys CFX, SolidWorks, Blade Modeler, ICEM CFD, TurboGrid, реализующих расчет трехмерного вязкого течения. Рассмотрен алгоритм оптимизационного проектирования проточной части насоса.

Проанализировано состояние вопроса по учету влияния состава и свойств перекачиваемой среды на энергетические характеристики насоса. Данная проблематика связана с особенностью работы осевых насосов в реакторных контурах с высокотемпературным теплоносителем, при которой происходит взаимодействие жидкого металла с газом из защитной подушки и при выделении растворенного газа в свободное состояние при падении давления на входе в насос ниже давления насыщения. Жидкометаллический свинец имеет температуру плавления 327°C , температуру кипения 1745°C , температуру на всасывании насоса 450°C . При рабочей температуре плотность свинцового теплоносителя $\rho_{\text{св}}=10560 \text{ кг/м}^3$ в 10 раз больше, а коэффициент кинематической вязкости $\nu_{\text{св}}=0,2 \text{ сСт}$ в 5 раз меньше чем у воды. Коэффициент поверхностного натяжения свинца $\sigma_{\text{св}}=442 \text{ мН/м}$ значительно больше, чем у воды. Величина давления насыщенных паров свинца для рабочих температур $400\div 600^{\circ}\text{C}$ оценивается в диапазоне $10^{-17}\div 10^{-9} \text{ Па}$. Некоторыми авторами предлагается физическая модель течения ТЖМТ – свинец, как неньютоновской жидкости, с особыми свойствами по сравнению с водой. Другие авторы, ТЖМТ – натрий и эвтектику свинец–висмут считают ньютоновскими жидкостями и обрабатывают требуемые характеристики насосов на воде. Поэтому в данной работе необходимо было ответить на вопрос о возможности применения традиционных методов расчета и проектирования проточной части на воде для отработки лопастной системы насосов, которые будут работать на ТЖМТ – свинец.

Для обеспечения маневренности мощности РУ предусмотрена возможность регулирования частоты вращения насосов при параллельной работе нескольких

циркуляционных насосов. Поэтому для устойчивой работы каждый насос должен иметь непрерывно падающую напорную характеристику.

Во второй главе были отработаны параметры математической модели расчета течения вязкой жидкости и интегральных характеристик проточной части на основе осевого насоса с близким к разрабатываемому насосу коэффициентом быстроходности, по которому имелись экспериментальные данные, полученные на водяном стенде СПбПУ под руководством Папира А.Н. Для проведения численных исследований в программе твердотельного 3D-проектирования SolidWorks была построена пространственная геометрическая модель проточной части, имитирующая объем, внутри которого происходит исследуемое течение жидкости (рис. 1).

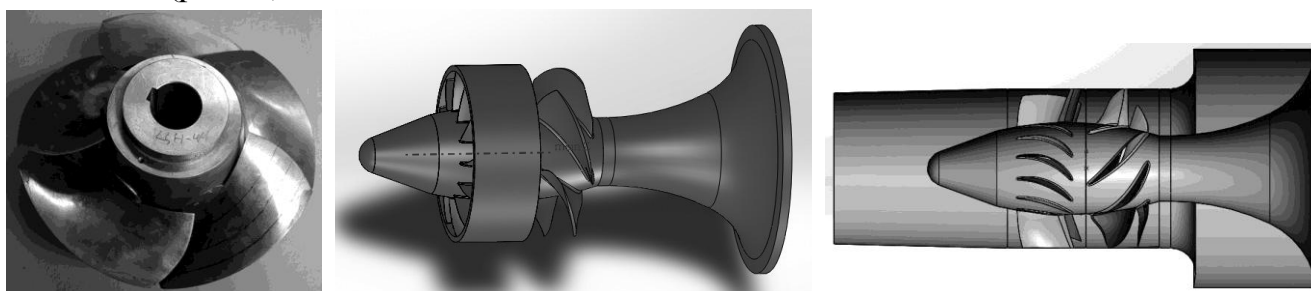


Рис. 1. Железная и твердотельная модели проточной части ЦН-44 ($n_s = 570$)

По результатам исследований были сделаны следующие выводы.

Программный комплекс Ansys CFX позволяет достаточно точно качественно и количественно (с точностью $2 \div 10\%$) прогнозировать интегральные характеристики осевых насосов низкой быстроходности, работающих на воде, во всем диапазоне его работы (рис. 2).

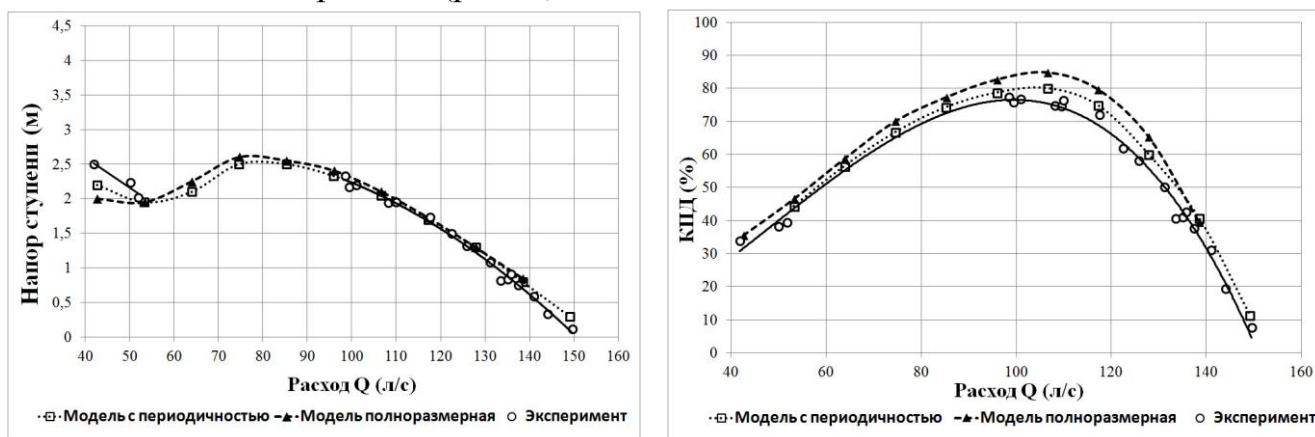


Рис. 2. Энергетические характеристики модельного насоса ЦН-44

Для случаев, когда статорные элементы проточной части обладают геометрической симметрией, для численных расчетов возможно применение модели с условием периодичности. Это позволяет обеспечить рациональный подход в использовании аппаратных вычислительных ресурсов и значительно экономит время расчета.

Использование неструктурированной расчетной сетки позволяет получить достоверные результаты расчетов при условии её достаточной густоты, особенно в местах быстрого изменения параметров течения.

На режимах близких к номинальному, тип сетки (неструктурированная или блочно-структурированная) не сказывается на расчетных интегральных параметрах насоса. На участке западания напорной характеристики $Q = (0,4 \div 0,6)Q_n$ разница по напору составляет до 10%, по гидравлическому КПД до 8%.

При исследовании на сеточную независимость решения предложены рекомендации по выбору оптимального значения максимального глобального элемента расчетной сетки в пределах $1 \div 1,5\%$ от диаметра рабочего колеса. Это позволяет сгенерировать сетку, содержащую около $1 \div 1,5$ млн. элементов для каждого домена рабочей области (для проточной части с условием периодичности). Такая густота сетки обеспечивает достаточную точность расчетов.

В диапазоне расходов $Q = (0,6 \div 1,3)Q_n$ выбор вида RANS-модели турбулентности не оказывает сильного влияния на энергетические характеристики осевого насоса. Для более экономичных расчетов можно рекомендовать использование высокорейнольдсовой $k - \varepsilon$ модели турбулентности с функциями стенки. Низкорейнольдсовая SST модель турбулентности обладает лучшей устойчивостью и точностью расчетов на недогрузочных режимах, но более требовательна к качеству расчетной сетки (допустимое значение параметра $Y^+ \leq 2$). Ее следует использовать при проблемах со сходимостью расчетов на режимах малых расходов и моделировании радиальных зазоров.

Для обеспечения точности расчета в области пограничного слоя, в котором наиболее сильно проявляются силы трения и присутствует большой градиент скорости, необходимо создание вблизи твердых стенок призматических слоев. Минимальное количество элементов по толщине призматических слоев должно составлять для $k - \varepsilon$ модели турбулентности не менее 10, а для SST модели не менее 15. При этом должна быть обеспечена плавность перехода толщин соседних элементов сетки – тетраэдров в ядре потока и последнего призматического слоя. Разница в размерах элементов не должна превышать 1,5 раза.

Для режимов $Q = (0,6 \div 1,3)Q_n$ оптимальной для расчета течения в проточной части осевого насоса низкой быстроходности является стационарная постановка со сглаживанием решений на поверхностях интерфейса Stage Averaging. Нестационарный анализ рекомендуется использовать в случаях, когда не удается достигнуть сходимости решения в стационарной постановке, для

увеличения точности расчетов на недогрузочных режимах $Q = (0,4 \div 0,5)Q_n$, на которых возможно появление вихреобразований и западание напорной характеристики, а также для более информативной визуализации картины течения жидкости в проточной части насоса.

Было проведено сравнение эюр скоростей в цилиндрической трубе, полученных при численном расчете течения воды с имеющимися в литературе экспериментальными эюрами скоростей высокотемпературной жидкометаллической эвтектики свинец – висмут Ярмонова М.В. и др. (рис. 3). Эюры сошлись достаточно хорошо. Отсюда был сделан вывод, что расчет течения жидкометаллической эвтектики свинец – висмут можно вести как для обычной ньютоновской жидкости с плотностью и вязкостью эвтектики. Ввиду схожести свойств теплоносителей, такой же вывод был сделан и для ТЖМТ – свинец. В дальнейшем все расчеты проводились для ТЖМТ свинец, как для ньютоновской жидкости с плотностью и вязкостью жидкометаллического свинца.

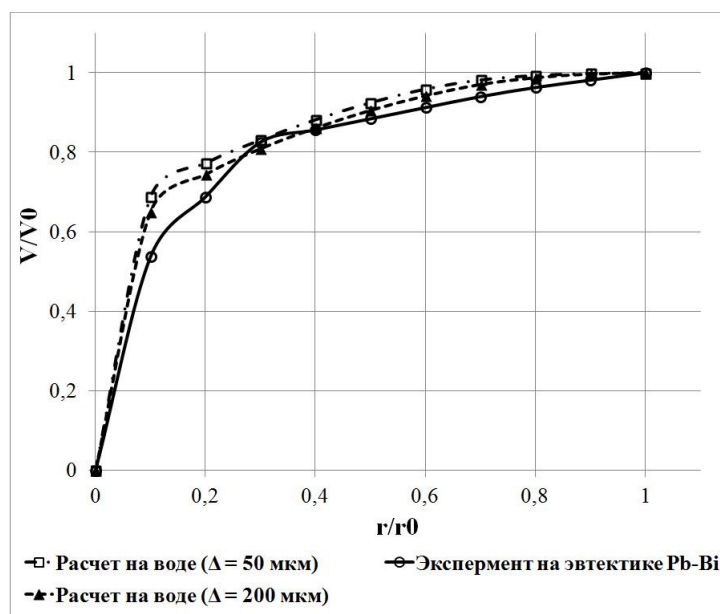


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные профили скоростей в трубе

Энергетические характеристики осевого насоса зависят от вязкости перекачиваемой жидкости. При увеличении кинематического коэффициента вязкости жидкости с $\nu = 0,1$ *сСт* до $\nu = 150$ *сСт* напор ступени на номинальном режиме уменьшается на 18,5%, КПД снижается на 20,5%, мощность насоса увеличивается на 7% (рис. 4).

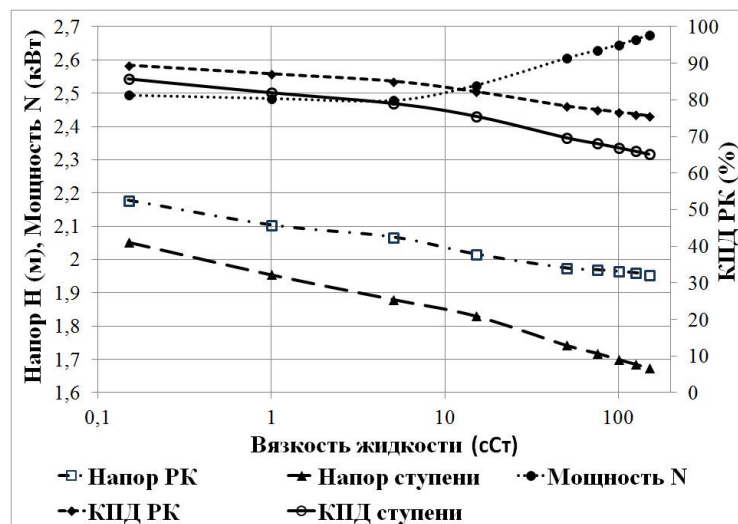


Рис. 4. Зависимость напора насоса от вязкости рабочей жидкости

При численном исследовании течения в проточной части осевого насоса на ньютоновской жидкости с плотностью и вязкостью жидкометаллического свинца, ухудшения энергетических параметров ступени, по сравнению с водой, для заданных условий работы насоса не происходит.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой, исследованием и оптимизацией конструкции осевого насоса, работающего в условиях высоких температур в среде тяжелого жидкометаллического теплоносителя – свинец. Апробированы две методики проектирования. В первой – геометрия проточной части создавалась в программе САПР ЛС на основе решения прямой гидродинамической задачи квазитрехмерного течения идеальной жидкости. Последующая доводка лопастной системы проводилась с использованием программного комплекса Ansys CFX, учитывающего особенности пространственного вязкого течения. Во второй методике выполнялось проектирование параметризованной проточной части в трехмерной постановке в программе Blade Modeler, входящей в комплекс Ansys Workbench, с последующим расчетом и оптимизацией геометрии. Первая методика позволяет спроектировать проточную часть с высокими энергокавитационными качествами на номинальном режиме работы, но из-за роста погрешности расчета осесимметричного потока на нерасчетных режимах, не дает возможности спрогнозировать геометрию ЛС с незападающей формой напорной характеристики на режимах малых подач. Поэтому для осевых насосов, работающих в широком диапазоне расходов, рекомендуется использовать второй подход.

Определен рекомендуемый диапазон углов атаки. По результатам исследований в программе САПР ЛС углы атаки должны быть $\alpha_1 \approx (0 \div +1,5^\circ)$. Уменьшение углов атаки ведет к уменьшению минимальной относительной скорости, которая при больших отрицательных углах может достигнуть

критического значения, увеличивая угрозу отрыва пограничного слоя. Такая опасность присутствует в первую очередь во втулочных сечениях на рабочей стороне лопасти. При углах атаки за рамками указанного диапазона значительно ухудшаются кавитационные качества РК. У входной кромки появляются пики разрежения, растет динамическое разрежение в периферийных сечениях на тыльной стороне лопасти. С уменьшением кавитационного запаса это приводит к более интенсивному развитию паровых каверн. При увеличении положительных углов атаки резко возрастают ударные потери, что снижает эффективность лопастной системы. Исследования в программном комплексе Ansys CFX подтвердили, что безударное обтекание лопастей РК ($\alpha_1 \approx 0^\circ$) позволяет устранить пики разрежения на входной кромке и значительно улучшить антикавитационные качества лопастной системы.

Геометрические параметры спроектированных вариантов проточной части имеют отклонения от рекомендаций, полученных на основании обобщения опыта создания осевых насосов с требованием обеспечения только наивысших энергетических показателей в рабочей точке. При проектировании лопастной системы с незападающей формой напорной характеристики и повышенными антикавитационными качествами требуется уменьшать значение коэффициента напора и втулочное отношение, увеличивать густоту решетки профилей по сравнению с каталожными насосами. Это приводит к снижению крутизны напорной характеристики и уменьшению гидравлического КПД вблизи оптимума на режимах $Q = (0,7 \div 1)Q_n$, но обеспечивает непрерывно падающую характеристику на режимах $Q = (0,3 \div 0,6)Q_n$.

Исследование влияния геометрических параметров проточной части на ее гидравлические качества показало:

- Для получения сходимости результатов численного расчета и эксперимента необходим учет особенностей проточного тракта стендов и натурной реакторной установки. В этом случае, программный комплекс Ansys CFX позволяет хорошо качественно и количественно прогнозировать интегральные характеристики осевого насоса.

- Наличие обода осевого рабочего колеса ухудшает энергетические качества ступени. Для разных вариантов проточной части КПД снижается на 2÷4%.

- Западание напорной характеристики осевого насоса низкой быстроходности на режимах $Q = (0,3 \div 0,6)Q_n$ происходит вследствие образования в периферийных сечениях застойных вихревых зон и интенсивных обратных течений, которые запирают течение основного потока, нарушают обтекание лопастей в этих сечениях и тем самым выключают их из работы по приращению энергии, что ведет к недосозданию напора и западанию напорной характеристики (рис. 5÷6). На недогрузочных режимах поток жидкости в основном проходит через втулочные и средние сечения.

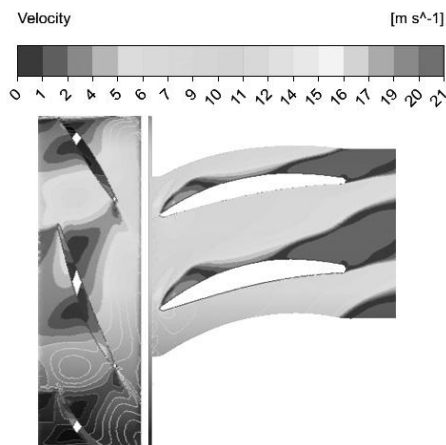


Рис. 5. Визуализация полей скорости в периферийном сечении РК

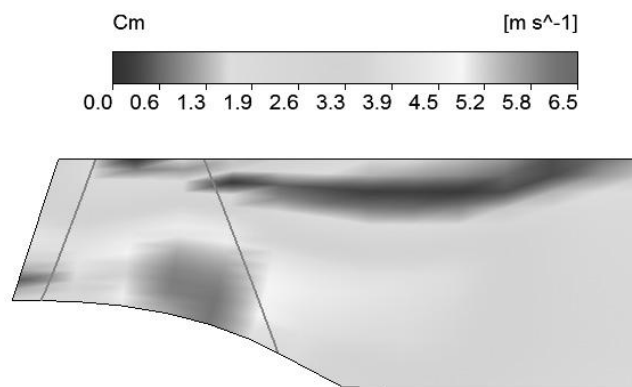


Рис. 6. Окружная скорость в меридианной проекции РК

- Увеличение радиального зазора в камере рабочего колеса приводит к изменению полей скоростей на входе в ЛС, способствует увеличению западания напорной характеристики и падению КПД насоса. Это связано с повышением расхода перетечки через зазор, который негативно воздействует на основной поток в периферийных сечениях РК.

- Величину осевого зазора между лопастными системами РК и ВА рекомендуется задавать в диапазоне $\Delta_{oc} = (0,05 \div 0,1)D_{рк}$. Увеличение осевого зазора приводит к росту гидравлических потерь в выправляющем аппарате на режимах малых подач.

- Форма напорной характеристики насоса зависит от геометрии подвода, который оказывает влияние на поля скоростей перед рабочим колесом. На режиме $Q = 0,6Q_n$ в подводящем устройстве насоса образуются обратные течения, интенсивность которых с уменьшением расхода усиливается. Обратные течения закручивают жидкость во всасывающей трубе, изменяют структуру основного потока, усиливая неравномерность скоростей и давлений (у стенок на периферии давление повышается, в центральной области создается разрежение), изменяют характер обтекания лопастей и тем самым влияют на приращение энергии потока в РК. Чем короче длина подводящего устройства, тем сильнее западает напорная характеристика. Наличие расширенного подвода (бак стенда или входная камера РУ) существенно уменьшает неравномерность полей скоростей и давлений на входе в РК, что приводит к улучшению формы напорной характеристики.

- Варьирование отдельными геометрическими параметрами не позволяет улучшить форму напорной характеристики осевого насоса. Для получения стабильной, незападающей формы характеристики, при проектировании необходимо применять комплекс мер – задание переменного закона распределения теоретического напора по размаху лопасти РК (рис. 7);

обеспечение безударного ($\alpha_1 \approx 0^\circ$) и плавного обтекания входной кромки лопасти (рис. 8), в том числе за счет удлинения лопасти во втулочном сечении в сторону всасывающего подвода; увеличение углов охвата лопасти; уменьшение кривизны лопасти; оптимизация геометрии ВА и уменьшение потерь в нем на недогрузочных режимах.

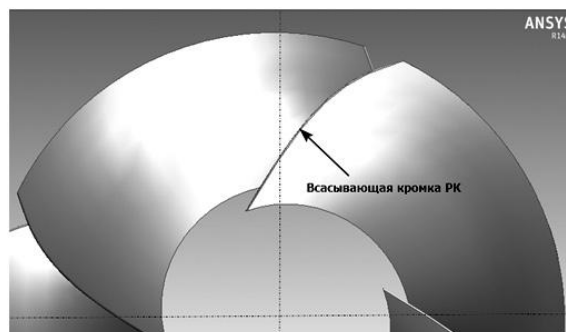
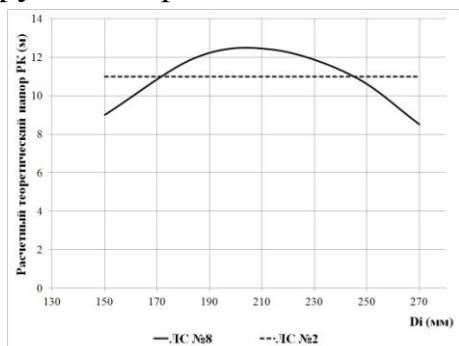


Рис. 7. Расчетный теоретический напор ПК Рис. 8. Профилирование входной кромки ПК

На разных этапах проектирования проводилась оптимизация геометрии лопастной системы с использованием встроенных в программный комплекс Ansys CFX оптимизационных методов – RSO (метод поверхности отклика) и Adaptive Single-Objective (комбинированный градиентный метод). Оптимизация осуществлялась на параметризованной модели, с гексаэдральной блочно-структурированной сеткой. В качестве целевых функций задавались гидравлические потери в выправляющем аппарате, в других случаях величина статического давления на поверхности лопасти рабочего колеса (для устранения пиков разрежения и улучшения условий обтекания лопасти). Входные параметры, описывающие геометрию лопастной системы, варьировались в ограниченном диапазоне значений по закону, в соответствии с оптимизационным алгоритмом. По результатам работы программы оптимизации искался такой набор входных параметров, который отвечал оптимальному значению целевой функции (рис. 9).

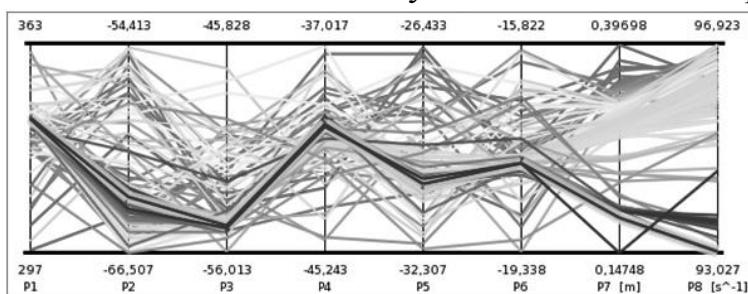


Рис. 9. Результаты работы программы оптимизации

Использование разработанных рекомендаций при проектировании осевого насоса с быстроходностью $n_s = 580$ позволило создать проточную часть (рис. 10) с незападающей формой напорной характеристики во всем диапазоне работы (рис. 11).

Расчетные энергетические характеристики осевого насоса $H = f(Q)$, $\eta = f(Q)$ на воде и рабочей жидкости с плотностью и вязкостью жидкометаллического свинца совпадают.

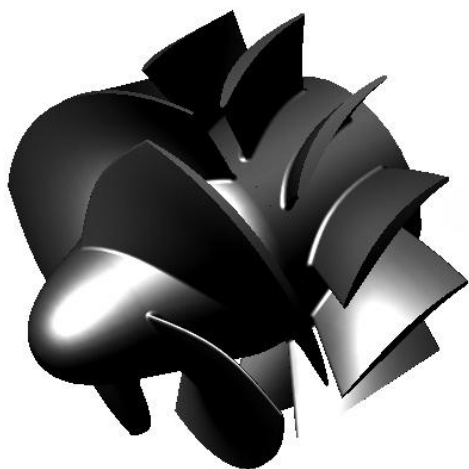


Рис. 10. Модель ЛС №11 с незападающей напорной характеристикой

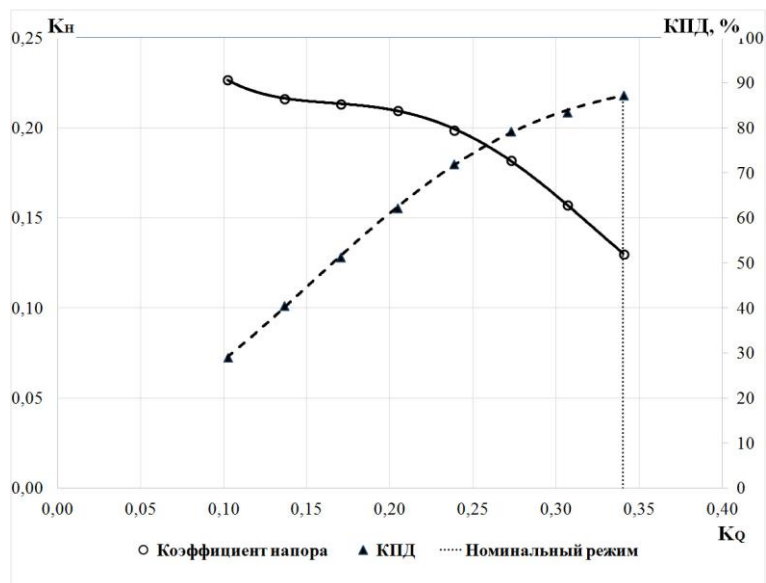


Рис.11. Энергетические характеристики ЛС №11

Отработка антиэрозионных качеств проточной части осевого насоса, работающего на ТЖМТ – свинец, проводилась по результатам численного расчета течения двухфазной водопаровой смеси и экспериментальных исследований насоса на воде. Такой подход был применен, так как в литературе имелись сведения, что при создании центробежных рабочих колес, работающих на других ТЖМТ, проточные части которые не имели эрозионных разрушений лакокрасочных покрытий, при ускоренных кавитационно-эрозионных исследованиях на воде, не имели их и при испытаниях на ТЖМТ.

Исследование эпюр распределения статического давления вокруг профиля лопасти рассматриваемого насоса (рис. 12) и визуализация областей образования паровых каверн (рис. 13), полученная по результатам численных расчетов на воде, показали, что кавитационные паровые каверны образуются на тыльной стороне лопасти при $\Delta h \approx 1,5 \cdot \Delta h_{кр}$, а для полного отсутствия паровых областей коэффициент кавитационного запаса должен быть $K_{доп} \geq 2,5$. Предполагается, что в этом случае будет обеспечено отсутствие эрозионных разрушений поверхностей лопасти.

Улучшить антикавитационные качества осевого насоса можно с помощью уменьшения частоты вращения насоса. Это позволяет за счет снижения скоростей обтекания лопастной системы существенно уменьшить или даже устранить зоны с паровыми кавитационными кавернами.

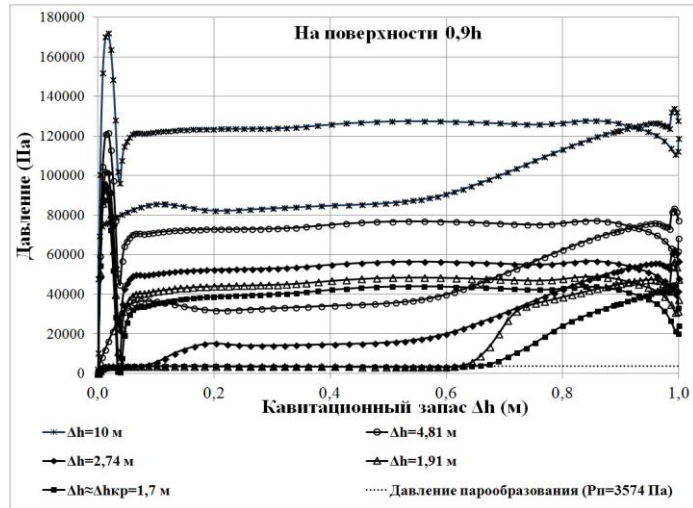


Рис. 12. Эпюры статического давления вокруг лопасти при разных значениях кавитационного запаса

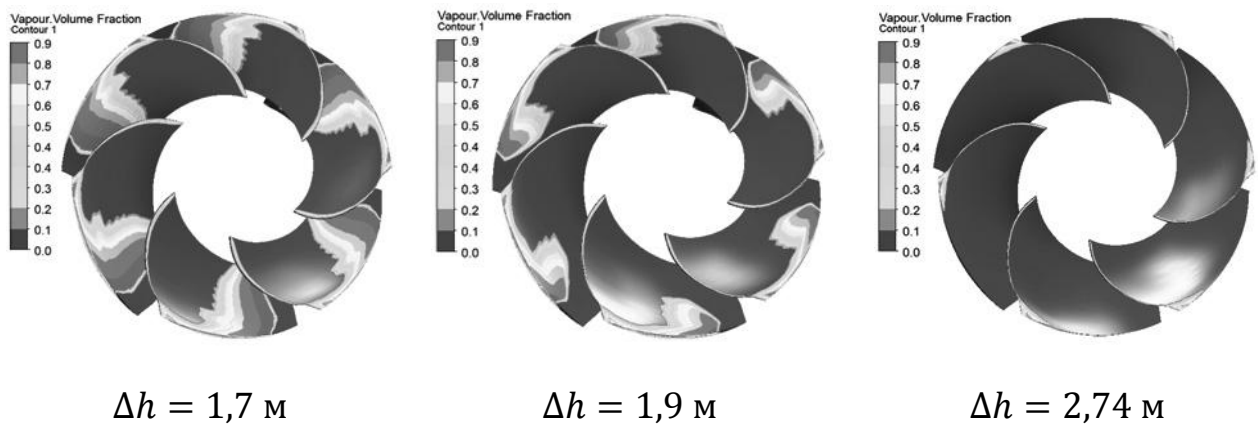


Рис.13. Исследование областей кавитационных каверн на воде

Однако для обеспечения требуемого напора насоса с пониженными оборотами, необходимо увеличивать угол установки лопасти, что приводит к ухудшению формы напорной характеристики насоса. Поэтому при проектировании проточной части с повышенными антикавитационными качествами и незападающей формой напорной характеристики необходимо применять комбинированный подход к выбору основных геометрических параметров (углу установки лопасти, кривизны, густоты, втулочного отношения, толщине лопастей и т.п.) с учетом разработанных рекомендаций.

По результатам проведенных исследований была разработана высокоэффективная проточная часть ($\eta_{Г,н} \approx 87\%$), которая имеет стабильную, незападающую форму напорной характеристики во всем диапазоне работы и обладает высокими антикавитационными и антиэрозионными качествами ($\Delta h_{кр} = 1$ м, отсутствие областей паровой кавитации при кавитационном запасе $\Delta h = 1,7$ м).

В четвертой главе проведено сопоставление расчетных и экспериментальных энергетических характеристик, спроектированных вариантов проточной части осевого насоса на водяном стенде и стенде с ТЖМТ. В процессе испытаний стенды были модернизированы в соответствии с разработанными рекомендациями, что позволило повысить точность определения экспериментальных параметров насоса.

Экспериментальные исследования подтвердили, что радиальный зазор между ободом и камерой рабочего колеса существенно влияет на энергетические характеристики осевого насоса низкой быстроходности. Для этих насосов величина радиального зазора не должна превышать $\delta \leq 0,001D_{pk}$.

Расчетные энергетические характеристики на воде и ньютоновской жидкости с плотностью и вязкостью жидкометаллического свинца при рабочей температуре $t = 500^\circ\text{C}$ совпадают с экспериментальными характеристиками на воде и жидкометаллическом свинце при учете всех особенностей гидравлического тракта стендов. Расхождение не превышает 5% во всем диапазоне работы насоса.

Результаты испытаний на воде подтверждают, что предлагаемая методика проектирования позволяет создать проточную часть осевого насоса низкой быстроходности с высоким КПД и незападающей формой напорной характеристики (рис. 14÷15).

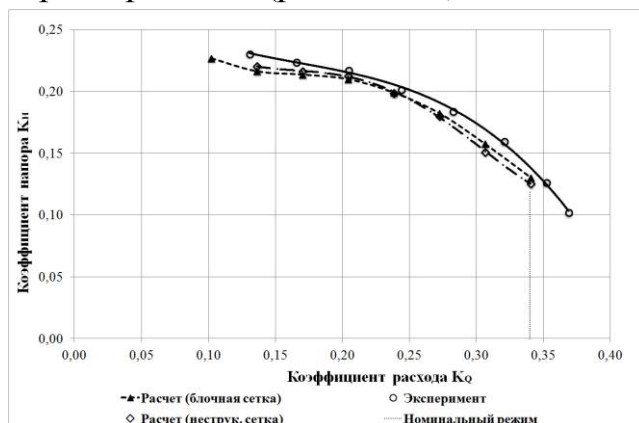


Рис.14. Напорные характеристики ЛС №11

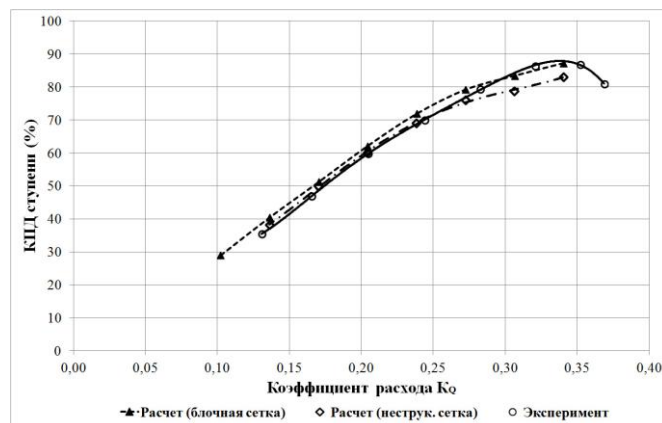


Рис. 15. Характеристики КПД ЛС №11

Полученные по результатам численного расчета течения двухфазной среды (вода – пар) частные кавитационные характеристики, хорошо согласуются с экспериментальными, снятыми при исследованиях на воде. Численный расчет методами CFD можно применять для нахождения величины критического кавитационного запаса $\Delta h_{кр}$.

Результаты проведенных исследований показывают, что экспериментальные энергетические характеристики осевого насоса, работающего на ТЖМТ, можно получать на водяном стенде. Стенд с ТЖМТ целесообразно использовать для проведения эрозионных и ресурсных испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены параметры математической модели для расчета трехмерного вязкого течения в проточной части осевого насоса низкой быстроходности с целью правильного качественного и количественного прогнозирования ее интегральных характеристик.

2. Численно определено влияние геометрических параметров лопастной системы (входные и выходные углы лопасти, углы охвата, кривизна лопасти, положение и форма кромок и т.д.) и конструктивных элементов проточного тракта (подвод, бандаж РК, зазоры) на энергетические характеристики осевого насоса низкой быстроходности.

3. Даны рекомендации по выбору параметров лопастной системы осевого насоса низкой быстроходности, которые позволяют обеспечить насосу, работающему на ТЖМТ в условиях гидравлического контура реакторной установки, требуемые параметры в номинальной точке и незападающую форму напорной характеристики в диапазоне рабочих режимов.

4. Показано, что при создании осевого насоса, работающего на ТЖМТ, можно применять методики проектирования на рабочей жидкости – вода, так как течение жидкометаллического теплоносителя подчиняется закономерностям течения ньютоновской жидкости.

5. Даны рекомендации по величине коэффициента кавитационного запаса насоса на воде, который должен обеспечить отсутствие эрозионных разрушений поверхностей проточной части, работающей на ТЖМТ.

6. Экспериментально обоснована возможность получения энергетических характеристик модельной проточной части осевых насосов, предназначенных для работы на ТЖМТ, при проведении испытаний на воде.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Публикации в изданиях перечня ВАК

1. Свобода, Д.Г. Влияние модели турбулентности на расчетные интегральные параметры осевого насоса с быстроходностью $n_s=570$ / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2013. – Том 15 №4(2). – с. 575–578.
2. Свобода, Д.Г. Влияние расчетных параметров на прогнозные интегральные характеристики осевого насоса с быстроходностью $n_s=570$ / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №4-1 (183). – с. 111–119.
3. Свобода, Д.Г. Влияние условий подвода на прогнозные интегральные характеристики осевого насоса с низкой быстроходностью / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский, А.Н. Скляревский // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2014. – Том 16 №1(2), – с. 527–530.
4. Свобода, Д.Г. Исследование влияния параметров расчетного трехмерного вязкого течения на прогнозные характеристики осевого насоса / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский, П.В. Пугачев и др. // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2012. – Том 14 №1(2). – с. 685–688.
5. Свобода, Д.Г. Расчет вязкого течения и прогнозные характеристики осевого насоса низкой быстроходности на условия испытаний на экспериментальном водяном стенде / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2015. – Том 17 №2(4), – с. 900–903.
6. Свобода, Д.Г. Экспериментальные и расчетные исследования осевого насоса с быстроходностью $n_s=570$ / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2013. – Том 15 №4(2). – с. 579–582.
7. Свобода, Д.Г. Возможность расчетного определения эрозионных зон осевого насоса, работающего на жидкометаллическом свинце / Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский, Е.А. Иванов и др. // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2016. – Том 18 №1(2). – с. 287-291.