

*Иванов*

**Иванов Евгений Александрович**

**Разработка методики проектирования и оптимизации проточных частей осевых насосов на основе метамоделей**

2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт энергетики, Высшая школа энергетического машиностроения.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор Жарковский Александр Аркадьевич.

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, доцент Ломакин Владимир Олегович, заведующий кафедрой «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Кандидат технических наук Акимов Станислав Викторович, начальник КБ насосов для нефтяной и газовой промышленности, Филиал акционерного общества «ГМС Ливгидромаш» в г. Москва, Головной научно-технический центр (ГНТЦ), Акционерное общество «ГМС Ливгидромаш».

**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 27 февраля 2024 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.10.27 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru> Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета У.2.5.10.27,  
кандидат технических наук



Соловьева Ольга Александровна

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** Коэффициент полезного действия современных лопастных гидромашин, в том числе осевых насосов, в настоящее время достаточно высок, однако, в условиях конкурентной борьбы постоянно требуется иметь возможность быстро откликаться на требования промышленности по проектированию проточной части насоса на новые параметры с КПД выше ранее достигнутых значений, с выполнением дополнительных требований, таких как высокие кавитационные и антиэрозионные качества, форма напорной характеристики. В связи с этим требуется разработка и совершенствование математических моделей для проектирования проточной части, математических моделей расчета течения и потерь в проточной части, разработка алгоритмов оптимизации с применением современных численных методов. Эти вопросы, в частности, для осевых насосов разработаны недостаточно, поэтому тема работы является актуальной. В частности, недостаточно разработан подход с использованием метамоделей, который должен позволить существенно сократить время многокритериальной оптимизации.

**Степень разработанности темы исследования.** Методика проектирования и оптимизации проточных частей осевых насосов на основе метамоделей недостаточно разработана. Различные прикладные исследования в основном посвящены: оптимизации проточных частей центробежных насосов различных типов (А.В. Федоров, А.А. Жарковский, В. О. Ломакин, В.С. Чабурко, С. А. Шумилин, Jing, T., Sun, H., Cheng, J.); оптимизации проточных частей гидротурбин (Г.М. Моргунов, А.В. Волков, В.И. Климович, Л.Я. Казачков, А.А. Сотников, И.М. Пылев, В.Н. Степанов, А.В. Семенова, В.Е. Ригин, Г.И. Топаж, А.В. Захаров, С.Г. Черный, Д. В. Чирков, А. К. Гарагулова); совершенствованию методик расчета напорной характеристики осевого насоса и методы улучшения ее формы (Д. Г. Свобода, А.А. Жарковский, С.Ю. Щуцкий, П.Ю. Дягилев). Основные подходы к созданию метамоделей проточных частей лопастных гидромашин сосредоточены в области центробежных насосов (Yu Zhang, Sanbao Hu, Safikhani H., Nourbakhsh A., Matteo Checcucci, Federica Sazzini, Kim J.H., Oh K.T.). Оптимизация проточных частей осевых насосов с использованием прямых методов на основе CFD расчета (Yu H, Janiga G, Thévenin D.).

**Целью** диссертационной работы является разработка методики проектирования и оптимизации проточных частей осевых насосов на основе метамоделей.

**Основными задачами** диссертации являлись:

1. Создать параметрическую модель проточной части осевого насоса.
2. Разработать и апробировать модель расчета течения и потерь в проточной части осевого насоса для использования ее в процессе оптимизации.
3. Разработать методики создания и применения метамоделей прогнозирования энергетических и кавитационных характеристик ОН для оптимизации проточной части.
4. Разработать методику создания проточных частей осевых насосов с незападающей формой напорной характеристики.
5. Провести критический анализ методов многокритериальной оптимизации на основе метамоделей.
6. Применить разработанные методы оптимизации для создания высокоэффективных проточных частей осевых насосов.

**Научная новизна.**

1. Параметрическая математическая модель проточной части осевого насоса.
2. Методика создания и применения метамоделей расчета энергетических параметров проточной части.
3. Методика создания и применения метамоделей расчета кавитационных параметров проточной части.
4. Количественные требования к размеру матрицы планирования эксперимента для создания метамоделей проточных частей осевых насосов.
5. Результаты критического анализа методов оптимизации для создания проточных частей осевых насосов.

6. Методика обеспечения незападающей формы напорной характеристики осевых насосов.

7. Методика многокритериальной оптимизации для создания проточных частей осевых насосов.

#### **Теоретическая значимость работы**

1. Математическая модель лопастной системы проточной части осевого насоса.

2. Результаты корреляционного анализа влияния геометрических параметров на форму напорной характеристики осевых насосов низкой быстроходности.

3. Оптимальный размер матрицы планирования эксперимента для создания метамоделей прогнозирования энергетических параметров осевого насоса.

4. Оптимальный размер матрицы планирования эксперимента для создания метамоделей прогнозирования кавитационных качеств осевого насоса.

#### **Практическая значимость работы**

1. Комплекс программ на языке Python, реализующий параметрическую модель проточной части осевого насоса.

2. Методика обеспечения не западающей формы напорной характеристики осевых насосов.

3. Методика проектирования и оптимизации проточной части осевого насоса с использованием метамоделей.

4. Разработанные методы и программы использованы в «Научном центре мирового уровня» СПбПУ в рамках выполнения проекта «Интеллектуальные технологии цифрового моделирования элементов конструкций гидромашин и процессов течения вязкой жидкости в сложных гидравлических сетях и прогнозирование жизненного цикла работы насосов на сеть с использованием методов машинного обучения», в АО «ЦКБМ» при выполнении работ по разработке проточных частей осевых насосов, в АО «Силовые машины» при проектировании осевого насоса общепромышленного назначения, в ООО «СУЛАК» при оптимизации проточных частей насосов типа ВПЭН, в учебном процессе Высшей школы Энергетического машиностроения СПбПУ.

#### **Методология и методы исследования.**

**Основными методами исследования** являются численные расчеты гидродинамических характеристик проточных частей осевых насосов на базе решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, методом контрольных объемов. Разработка метамоделей и решение задачи оптимизации проточной части осевого насоса с использованием языка программирования Python. Полученные результаты численного моделирования валидированы на основе экспериментальных данных осевых насосов низкой быстроходности ОП-2, ОП-5 и ОД-11.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель проточной части осевого насоса.

2. Метамоделей расчета энергетических и кавитационных характеристик осевого насоса.

3. Модель расчета течения и потерь в проточной части осевого насоса для использования ее в оптимизационном процессе.

4. Критерии обеспечения не западающей формы напорной характеристики осевого насоса.

5. Методика создания метамоделей и применения ее для многокритериальной оптимизации проточной части осевых насосов.

6. Результаты критического анализа различных методов оптимизации для создания проточных частей осевых насосов.

7. Результаты многокритериальной, многопараметрической оптимизации с ограничениями проточной части осевых насосов с высокими энергетическими и кавитационными качествами, с незападающей формной напорной характеристики.

#### **Степень достоверности результатов.**

Достоверность результатов обеспечивается сравнением с экспериментальными данными, имеющимися в литературе, и результатами исследований на стенде осевых насосов

Лаборатории гидромашиностроения Высшей школы энергетического машиностроения с использованием измерительной аппаратуры, достаточным объемом экспериментальных данных и их корректной статистической обработкой.

#### **Апробация результатов.**

Основные научные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на конференциях и семинарах: Международная научно-техническая конференция «Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (МЭИ, 2015), Неделя науки СПбПУ. Институт энергетики и транспортных систем (Санкт-Петербург, 2016), Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития (Санкт-Петербург, 2016), XX Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. (МЭИ, 2016), AIP Conference Proceedings (Омск, 2019), E3S Web of Conferences (Москва, 2019), Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития (Санкт-Петербург, 2022), ECOPUMP-RUS'2022. Инновации и энергоэффективность в насосостроении (Москва, 2022).

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 4 статьях, из них 2 в журналах, входящих в список научных изданий ВАК, 2 в журналах, индексируемых в Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав основного текста, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 122 страниц. Работа содержит 77 иллюстраций, 15 таблиц. Список литературы содержит 73 наименования.

#### **Основное содержание работы**

Во **введении** показывается, что использование метамоделей при проектировании осевых насосов является актуальным и недостаточно исследованным научным вопросом. Совершенствование методик проектирования осевых насосов является актуальной практической задачей, востребованной в промышленности. Формулируется цель работы, научная новизна, теоретическая ценность работы, методы верификации и валидации разработанных подходов.

**В первой главе** проводится анализ ранее выполненных работ, рассматриваются особенности работы и конструкции осевых насосов, современное состояние методик их проектирования, вопросы обеспечения требуемой формы напорной характеристики, обзор современного состояния методов оптимизации и методов создания метамоделей в лопастных гидромашинах.

Рассмотрены области применения осевых насосов в промышленности. Осевой насос характеризуется высоким коэффициентом быстроходности и используется там, где необходимо обеспечить подачу больших объемов жидкости при сравнительно невысоких напорах (насосные станции систем водоснабжения и орошения, системы охлаждения конденсаторов ТЭС и АЭС, перемешивающие устройства химических аппаратов, водометные движители и т.п.) При больших диаметрах трубопроводов этот тип насосов обеспечивает минимальные габариты насосной установки. Типичная проточная часть осевого насоса состоит из входного патрубка, рабочего колеса, выправляющего аппарата и отводящего патрубка.

Форма напорной характеристики осевых насосов отличается от формы напорной характеристики центробежных насосов и имеет свои особенности. Напорная характеристика осевого насоса зачастую имеет точку перегиба и западающую зону.

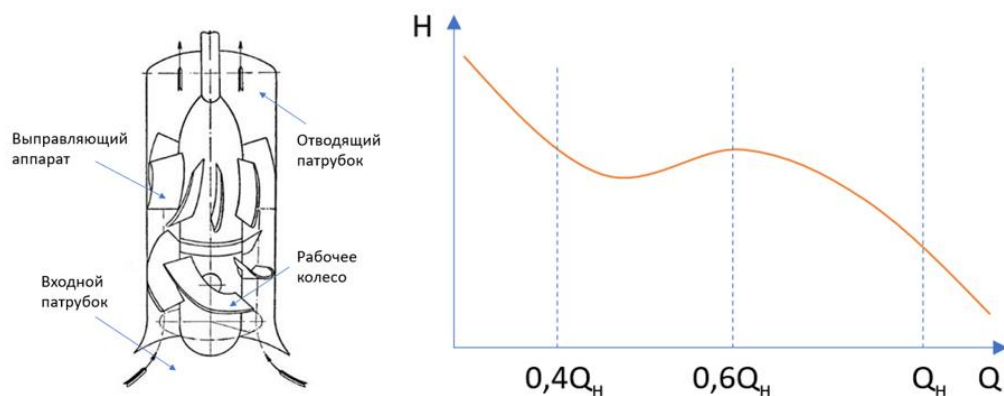


Рисунок 1 – Форма напорной характеристики осевого насоса

Для устойчивой параллельной работы насосов на общую сеть каждый из насосов должен иметь стабильную, не западающую напорную характеристику. В диссертации выполнен более полный анализ влияния геометрических параметров осевого насоса на форму напорной характеристики с учетом обеспечения высоких энерго-кавитационных характеристик.

Проведен обзор современных методик проектирования проточной части осевого насоса. Их можно разделить на два класса, это решение прямой задачи и решение обратной гидродинамической задачи. В настоящее время часто при проектировании проточной части осевого насоса выполняется решение обратной задачи, где выполняются расчет геометрических параметров проточной части насоса в первом приближении. После этого выполняются проверочные численные расчеты насоса с использованием пакетов программ CFD (решение прямой гидродинамической задачи) и на основе результатов расчета, выполняется корректировка геометрических параметров насоса с использованием алгоритмов оптимизации. При расчёте лопастной системы насоса путём решения обратной гидродинамической задачи наиболее известным является метод Вознесенского - Пекина, разработанный на кафедре гидромашиностроения ЛПИ. Метод достаточно прост для расчетов и позволяет создавать насосы с высокими энергетическими качествами. Для проектирования проточных частей осевых насосов путем решения обратной гидродинамической задачи существует коммерческий программный комплекс CfTurbo. В качестве исходных данных для расчета задаются энергетические параметры проектируемого насоса. Проектирование лопастной системы в случае использования данного программного обеспечения заключается в выборе крылового профиля из семейства NASA.

Проведен анализ научных работ по теме оптимизации лопастных насосов на основе метамоделей. Данный подход довольно успешно применяется при проектировании проточных частей центробежных насосов разной быстроходности. Наблюдается недостаток исследований на тему выбора алгоритма построения метамоделей и его настройки. Это не позволяет получить общее представление и как-либо оценить преимущества и недостатки выбранного алгоритма. Из проведенного анализа литературы не были найдены какие-либо подходы или рекомендации к созданию метамоделей проточной части осевого насоса. Все найденные научные труды посвящены оптимизации геометрии лопастных насосов центробежного типа без детального исследования выбираемых алгоритмов для создания метамоделей.

Выполнен обзор научной литературы, посвященный существующим методам оптимизации. Из выполненного анализа литературы следует, что на практике при проектировании лопастных гидромашин различных типов наибольшее распространение получили генетические алгоритмы оптимизации (MOGA, NSGA-II). С целью экономии вычислительных ресурсов зачастую данные алгоритмы оптимизации используются в связке с метамоделями различных типов. В рассмотренных научных работах вопрос, посвященный оптимизации осевых насосов с использованием метамоделей, рассмотрен недостаточно.

**Во второй главе** рассмотрена численная методика расчета проточной части осевого насоса, обоснован выбор оптимального размера расчетной сетки, описаны граничные условия постановки задачи, выполнена валидация численной методики на основе экспериментальных данных.

Гидродинамические расчеты проточных частей осевых насосов выполнялись путем численного решения уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу в стационарной постановке, в качестве модели турбулентности использовалась k-ε модель турбулентности. Настройка расчетной модели осуществлялась на варианте существующего каталожного осевого насоса ОП-5.

В результате выполненного численного расчета на сеточную сходимость приемлемая точность расчета напора и КПД насоса обеспечивается от 100 тыс. элементов расчетной сетки, в этом случае относительная погрешность напора и КПД насоса не превышает 1 %. Для многовариантных расчетов матрицы планирования эксперимента количество элементов расчетной сетки составило 150 тыс. гексаэдров.

Валидация численной модели проводилась на данных, представленных в открытых источниках, в частности на основе экспериментальной энергетической характеристики насоса ОП-5 и ОП-2 с быстроходностью  $n_s = 680$  и  $515$  соответственно.

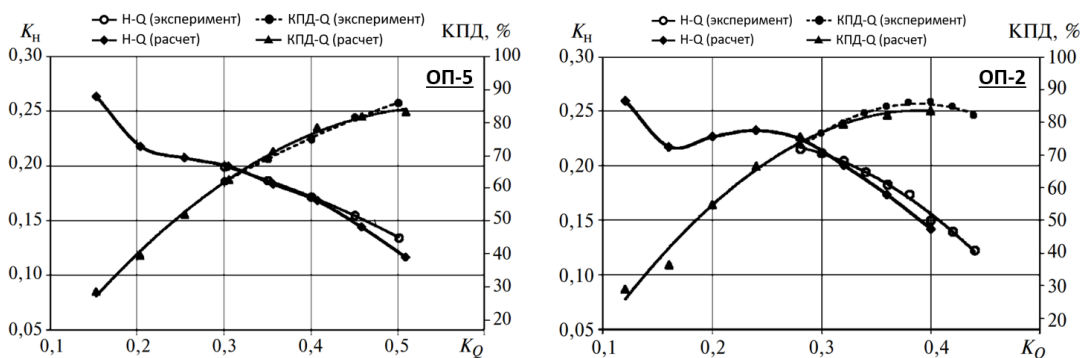


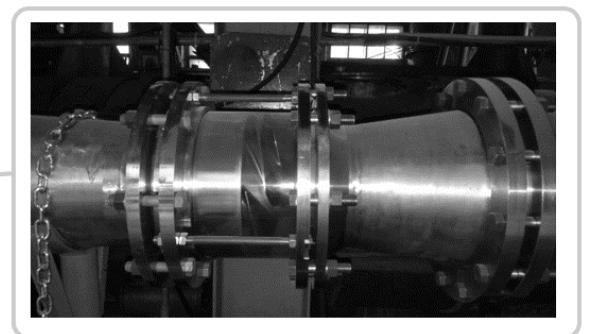
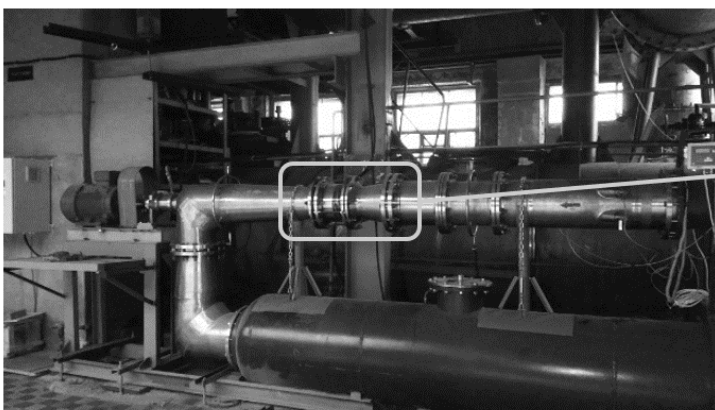
Рисунок 2 – Сравнение расчетной и экспериментальной характеристик насоса ОП-5 и ОП-2

Максимальное расхождение расчётных и экспериментальных значений для характеристики  $K_H = f(K_Q)$  составило 1,5 %. Максимальное отклонение расчётных значений и экспериментальных для характеристики  $\eta = f(K_Q)$  составило 3,1 %. По ГОСТ-6134-2007 неопределённость измерений экспериментальных параметров насоса по первому классу точности:

- неопределённость измерений напора насоса:  $e_H = \pm 1,5 \%$ ;
- неопределённость измерений КПД насоса:  $e_\eta = \pm 3,2 \%$ .

Проведенные численные исследования показали, что разработанный подход к численному моделированию позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать энергетические характеристики осевых насосов низкой быстроходности.

С использованием испытательного стенда Лаборатории гидромашиностроения СПбПУ выполнено исследование энерго-кавитационных характеристик разработанной ранее проточной части осевого насоса ОД-11 для использования в составе насосного агрегата ГЦНА-1720 реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, рисунок 3.



Проточная часть ОД-11

Рисунок 3 – Испытательный стенд



Моделирование прогнозной частной кавитационной характеристики выполнялось путём решения уравнения Rayleigh-Plesset, которое описывает динамику роста и схлопывания пузырька. В качестве граничных условий на входе в насос задавалось значение полного давления, (с постепенным снижением), на выходе постоянный массовый расход.

Частная кавитационная характеристика была рассчитана для номинального режима работы насоса  $Q = 410 \text{ м}^3/\text{ч}$  с постоянной частотой вращения ротора 2500 об/мин напором насоса  $H = 10 \text{ м}$  и потребляемой мощностью  $N = 15 \text{ кВт}$  (быстроходность насоса  $n_s = 550$ ).

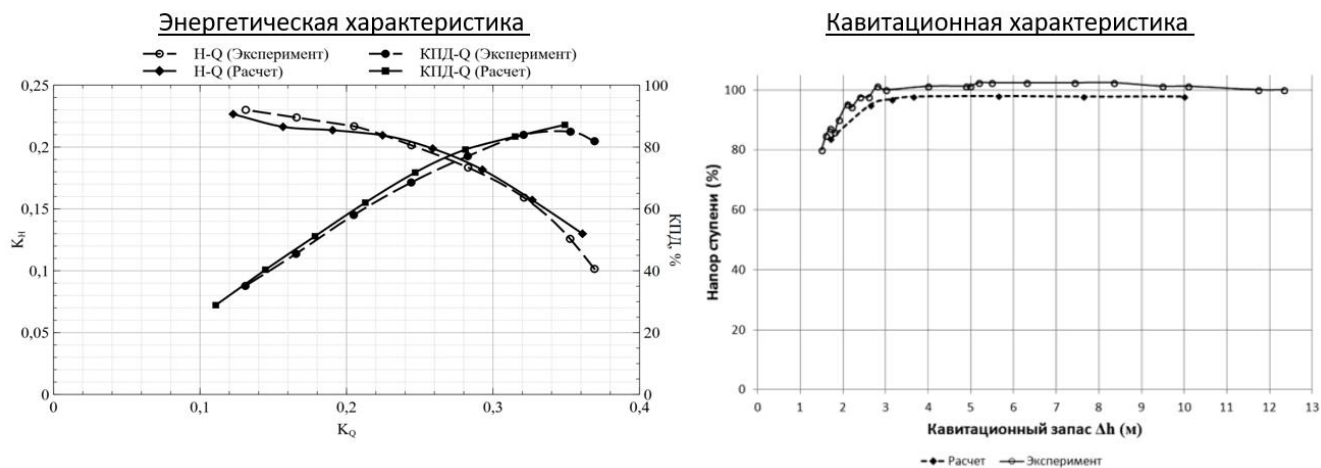


Рисунок 4 – Сравнение расчетной и экспериментальной характеристик насоса ОД-11

Максимальное расхождение расчётных и экспериментальных значений для характеристики  $K_H = f(K_Q)$  составило 1,2 %. Максимальное отклонение расчётных значений и экспериментальных для характеристики  $\eta = f(K_Q)$  составило 2,3 %. Полученные по результатам численного расчета течения с двухфазной моделью кавитации срывные кавитационные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными. Таким образом, численный расчет методами *CFD* позволяет определять момент срыва параметров осевого насоса и находить значение критического кавитационного запаса  $\Delta h_{кр}$ .

Проведена визуальная валидация прогнозирования развития кавитационной каверны на входе в рабочее колесо насоса при кавитационном запасе  $\Delta h = 3,65 \text{ м}$ .

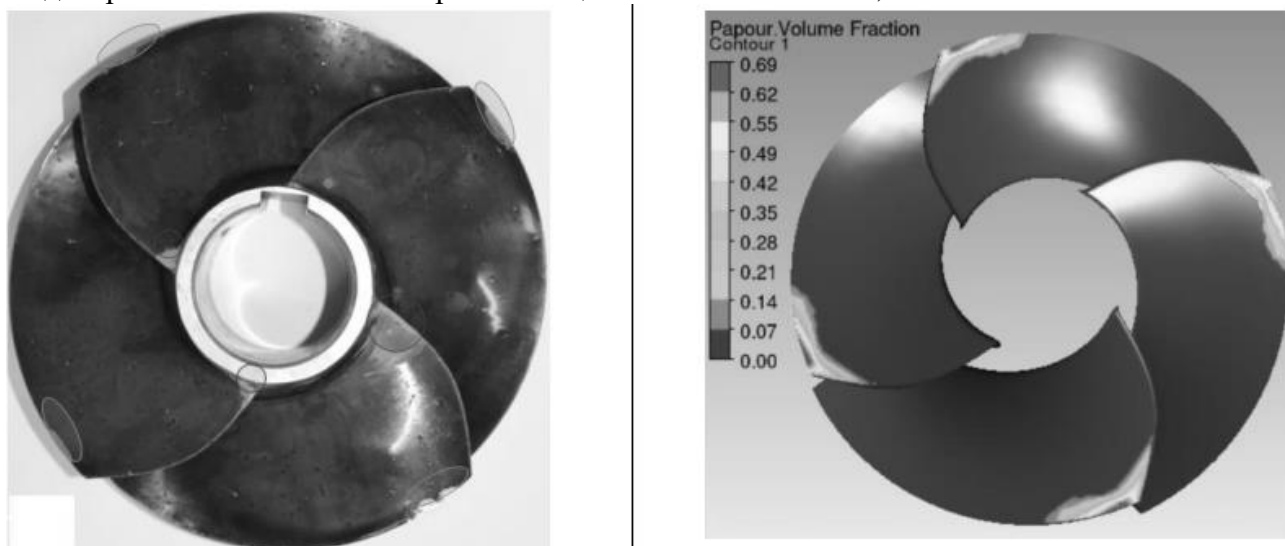


Рисунок 5 – Визуальная валидация прогнозирования кавитационной каверны

Из проведенного анализа следует, что моделирование *CFD* также позволяет адекватно оценивать степень развития кавитационной каверны при анализе кавитационных качеств проточной части насоса на режимах близких к кавитационному срыву.

В третьей главе представлена разработанная математическая модель геометрии лопастной системы осевого насоса, дано описание разработанного программного комплекса для создания параметрических моделей проточных частей осевых насосов. Заданы исходные



данные для разработки проточной части осевого насоса низкой быстроходности, выполнено построение базовой геометрии и выполнен расчет. Построена параметрическая модель осевого насоса с фиксированным набором геометрических параметров с целью выполнения многовариантных расчетов и дальнейшей оптимизации.

С использованием современного языка программирования *Python* на основе бесплатного ПО для твердотельного CAD моделирования *FreeCAD* разработано программное решение для проектирования осевых лопастных систем для дальнейшего использования при разработке проточных частей осевых насосов.

Алгоритм создания параметрической модели геометрии лопастной системы состоит из трех основных шагов (рисунок 6): генерация 2D профилей лопасти в плоскости конформного отображения на плоскости, где задается закон наклона скелетной линии профиля углом  $\beta_i$  и определяется толщина профиля  $T_i$ ; затем задается закон скругления входной и выходной кромок профиля и определяется положение точки центра массы профиля на плоскости; выполняется проекция профиля на заданную пользователем поверхность и генерируется 3D модель лопастной системы, также генерируется проточная часть лопастной системы, готовая к построению расчетной сетки.

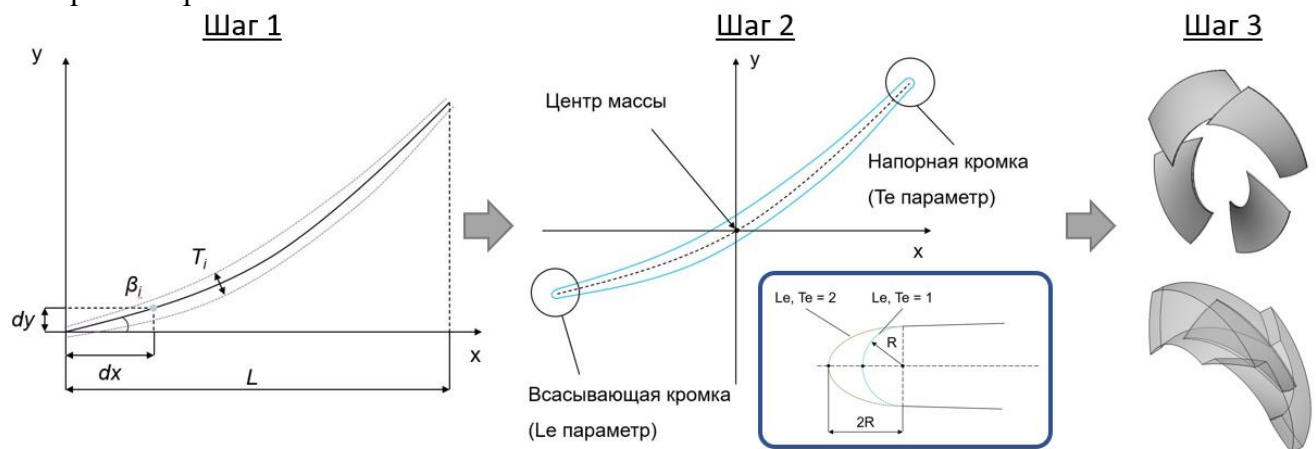


Рисунок 6 – Алгоритм создания параметрической модели осевой лопастной системы

Для разработанного программного обеспечения получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Генератор осевых лопастных систем» № 2019665355.

С использованием разработанного комплекса генерации геометрии осевой лопастной системы выполнена разработка геометрии базового варианта проточной части осевого насоса на энергетические параметры ОП-5. Цель разработки, модификация геометрии существующей проточной части насоса ОП-5 и определение максимально достижимых значений КПД, улучшение кавитационных качеств, определение критериев, влияющих на форму напорной характеристики и отработка методики создания метамоделей и оптимизации.

Количество геометрических параметров разработанной модели проточной части насоса на параметры ОП-5 составило 19 шт.

Выполненный расчет базового варианта ПЧ ОН показал, что спроектированный вариант с использованием методики Вознесенского-Пекина, позволяет в первом приближении получить значение напора насоса 4,35 м и КПД насоса 84,97 %. В сравнении с существующим вариантом каталожного насоса ОП-5 на данные параметры, разработанный базовый вариант ПЧ ОН в первой итерации имеет КПД на 1,03 % ниже, чем существующий аналог ОП-5.

**В четвертой главе** представлены описание и принцип разработки метамоделей применительно к проточной части осевого насоса. Описаны актуальные алгоритмы машинного обучения для создания метамоделей проточной части осевого насоса. Выполнено построение матрицы планирования эксперимента методом латинского гиперкуба *LHS*. Представлены результаты численного расчета матрицы планирования эксперимента и выполнен статистический анализ представленных результатов. Разработаны метамоделей проточной части осевого насоса на основе моделей *Random Forest*, полиномиальная регрессия и нейронная сеть.

Выполнено сравнение разработанных метамоделей и даны рекомендации по созданию метамоделей проточной части осевого насоса. Разработана мета модель прогнозирования кавитационных характеристик проточной части насоса на ограниченном количестве вариантов геометрии насоса.

Мета модель для расчета характеристик ПЧ ОН принимает на входе вектор признаков  $X$  и на выходе рассчитывает выходной вектор  $Y$ , состоящий из интегральных показателей насоса. Вектор  $X$  в случае ПЧ ОН представляет собой набор геометрических параметров, которые описывают лопастную систему. Вектор  $Y$  представляет собой набор целевых параметров, которыми являются энергетические и кавитационные параметры насоса (напор, КПД,  $C_{кр}$  и др.).

Преимущество использования мета модели в процессе оптимизации над прямым численным моделированием *CFD*, в том, что результат расчета при использовании мета модели рассчитывается «мгновенно».

Для обучения мета модели была подготовлена обучающая выборка, которая представляет собой рассчитанную методом *CFD* матрицу планирования эксперимента. Для генерации матрицы планирования эксперимента был выбран алгоритм *Latin Hypercube Sampling (LHS)*.

Количество успешно рассчитанных элементов матрицы для ОП-5 составило 2325. Общее количество элементов матрицы – 3100 вариантов. Процент успешно рассчитанных вариантов составил 75,0 %.

На рисунке 7 представлена гистограмма распределения КПД вариантов ПЧ ОН с удовлетворяющим значением напора.

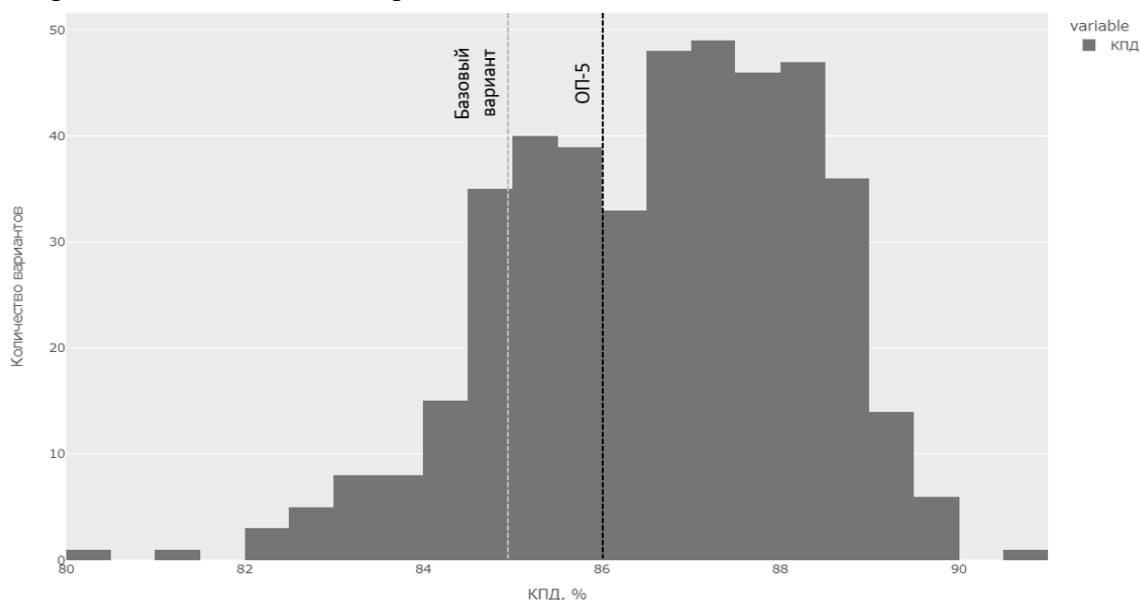


Рисунок 7 – Гистограмма распределения КПД вариантов ПЧ ОН

Для определения оптимального алгоритма при создании мета модели с целью прогнозирования энергетических параметров насоса:  $H$  – напор и КПД, были созданы мета модели на базе 3-х различных алгоритмов машинного обучения: нейронная сеть, *Random Forest* (случайный лес) и полиномиальная регрессия.

В таблице 1 представлено сравнение разработанных метамоделей на основе *Random Forest*, полиномиальной регрессии и нейронной сети.

Таблица 1 – Сравнение разработанных метамоделей на тестовой выборке данных

Модель	$\Delta$ КПД, %	$\Delta$ Н, %	$R^2$
Random Forest	1,29	5,48	0,7395
Полиномиальная регрессия 3 степени	0,79	1,19	0,9193
Нейронная сеть	0,42	1,09	0,9725

На основе анализа кривой обучения, рисунок 8, определено, что достаточное количество элементов ПЧ ОН в тренировочной выборке составляет от 1000 вариантов.

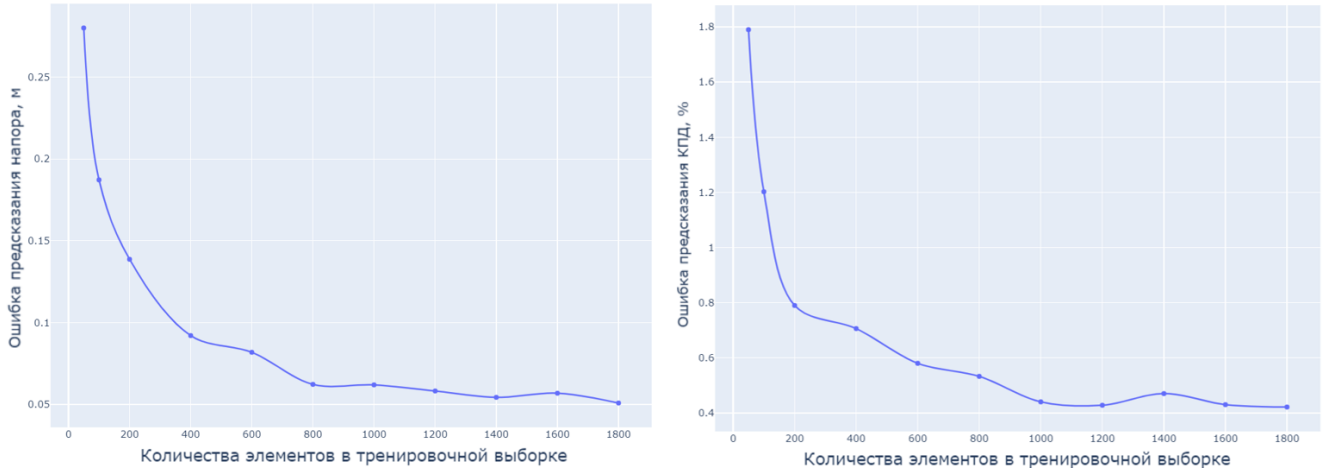


Рисунок 8 – Кривая обучения прогнозирования Н и КПД

Численное моделирование частной кавитационной характеристики насоса является вычислительно затратной задачей, требующей значительного количества вычислений. В связи с этим для выполнения многокритериальной оптимизации была разработана метамодель для оценки кавитационного коэффициента быстроходности  $C_{кр}$ , на основе геометрических параметров лопастной системы разработанной параметрической модели.

В качестве алгоритма для создания метамодели была выбрана полносвязная нейронная сеть. При обучении на входе в нейронную сеть подавались значения геометрических параметров, на выходе из нейронной сети - значение кавитационного коэффициента быстроходности  $C_{кр}$ .

Сформирована отдельная выборка обучающих данных в количестве 55 элементов. В обучающую выборку были добавлены ПЧ насоса, удовлетворяющие требованию по величине напора  $4,2 \text{ м} < H < 4,6 \text{ м}$ , где 10 элементов обучающей выборки являют лучшими ПЧ насоса с точки зрения гидравлического КПД. Остальные элементы обучающей выборки добавлены методом латинского гиперкуба, рисунок 9.

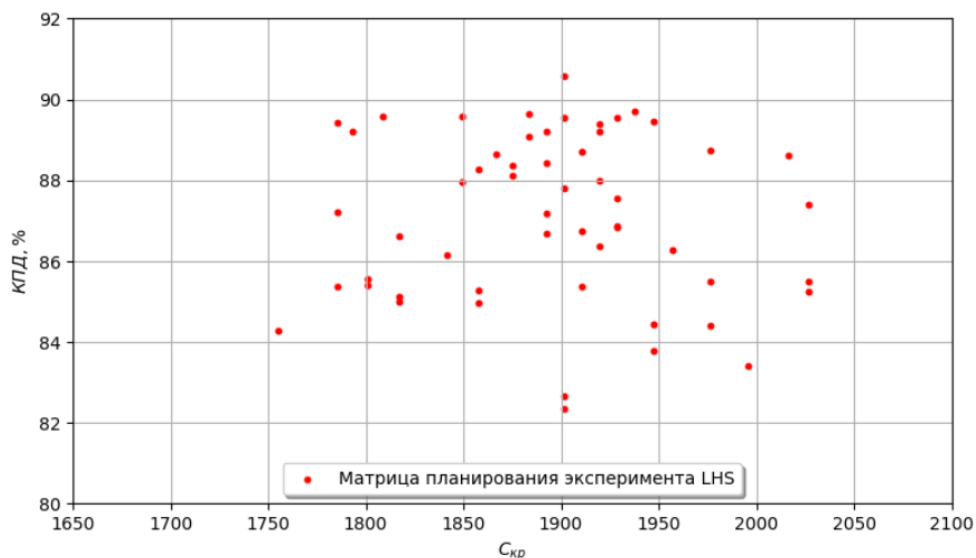


Рисунок 9 – Распределение КПД и  $C_{кр}$  обучающей выборки

Разработанная метамодель предсказания  $C_{кр}$  обладает приемлемой точностью оценки величины кавитационного коэффициента быстроходности, средняя неопределенность на валидационной выборке составила  $\Delta C_{кр} = 25$ , что составило  $0,04 \text{ м}$  от допустимого кавитационного запаса  $\Delta h_{дон} = 2,2 \text{ м}$ .

**В пятой главе** представлены основные результаты оптимизации геометрии проточной части осевого насоса на энергетические параметры ОП-5. Выполнена верификация алгоритмов

многокритериальной оптимизации на тестовых функциях с известным аналитическим решением. Выполнено сравнение эффективности алгоритмов многокритериальной оптимизации. Даны результаты исследования многокритериальной оптимизации проточной части насоса с учетом кавитационных характеристик по принципу Парето. Сформулированы рекомендации по обеспечению незападающей формы напорной характеристики ПЧ ОН низкой быстроходности.

Для задач многокритериальной оптимизации проточных частей турбомашин наиболее широкое применение нашли два алгоритма – генетической оптимизации *MOGA* и *NSGA-II* и их модификации. Из проведенного анализа литературы получено, что между данными методами при использовании в задачах оптимизации лопастных гидромашин нет существенного различия и при выполнении оптимизации расхождение между методами не превышает  $\Delta\eta = 0,02\%$ , что не имеет практического значения при решении задач проектирования лопастных гидромашин. Также на практике часто используется один из наиболее простых методов оптимизации, метод *Screening*, который представляет собой сортировку рассчитанной матрицы планирования эксперимента созданной, например, методом *Latin Hypercube Sampling*.

Верификация выбранных методов оптимизации выполнялась на тестовых аналитических функциях, для которых заранее известно оптимальное решение. В качестве функции для верификации однокритериальной оптимизации была принята функция *Rosenbrock*.

Результаты выполненной прямой однокритериальной оптимизации функции *Rosenbrock* представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты однокритериальной оптимизации функции *Rosenbrock*

Алгоритм	x	y	f(x, y)
Screening	0,99301	0,98392	5,04e-04
NSGA-II	1,00205	1,00413	4,24e-06

Для верификации многокритериальной оптимизации были выбраны функции семейства *Zitzler–Deb–Thiele's function № 1, 2, 3*, где количество варьируемых переменных функции равно 30, количество целевых параметров равно 2. Данные аналитические тестовые функции наиболее схожи с реальной практической задачей оптимизации лопастной гидромашин, где количество варьируемых геометрических параметров составило 19, а целевых параметров 2 (КПД,  $C_{кр}$ ).

На рисунке 10 представлены Парето-оптимальные решения, полученные методом *Screening* и методом *NSGA-II* для тестовой функции *Zitzler–Deb–Thiele's function № 1, 2 и 3*.

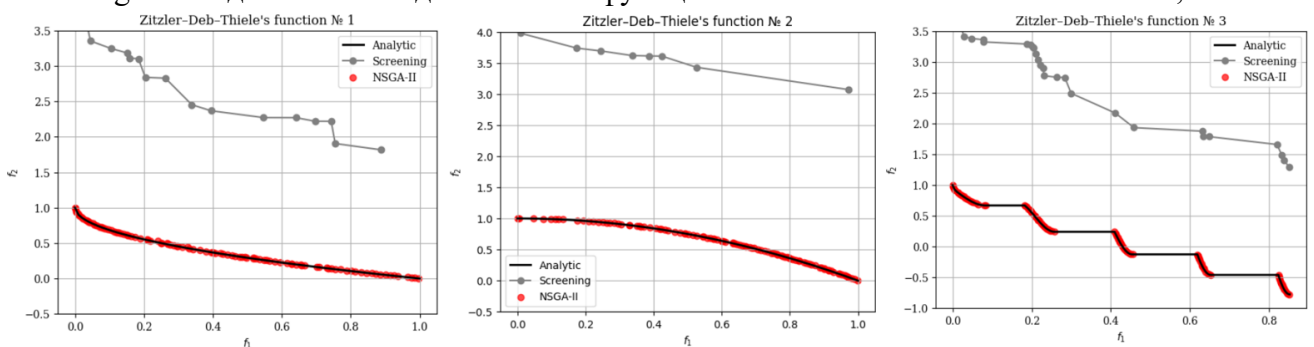


Рисунок 10 – Парето-оптимальные решения, полученные в результате оптимизации функции *Zitzler–Deb–Thiele's function № 1, 2 и 3*

На основе разработанных метамоделей для расчета энергетических и кавитационных характеристик выполнена многокритериальная оптимизация ПЧ ОН методом поиска Парето-оптимальных решений. Парето-фронт, полученный с использованием алгоритма оптимизации *NSGA-II* дал лучшие результаты чем метод сортировки (*Screening*) на основе рассчитанной матрицы планирования эксперимента *LHS*.

Из проведенной многокритериальной оптимизации следует, что Парето-фронт, полученный с использованием метамоделей и алгоритма оптимизации *NSGA-II*, позволяет без

существенных вычислительных затрат получить дополнительные промежуточные точки, формирующие Парето-фронт, рисунок 11.

В результате использования алгоритма многокритериальной оптимизации *NSGA-II* удалось увеличить энерго-кавитационные качества ПЧ ОН за счет расширения Парето-фронта – кавитационные качества ПЧ ОН  $C_{кр}$  увеличены с 2025 до 2058, максимальное увеличение КПД Парето-фронта составило 1%. Для существующего каталожного осевого насоса ОП-5, имеющего расчетный и экспериментальный КПД 86%, удалось увеличить КПД на 4% – до 90% при сопоставимой величине допускаемого кавитационного запаса, рисунок 11.

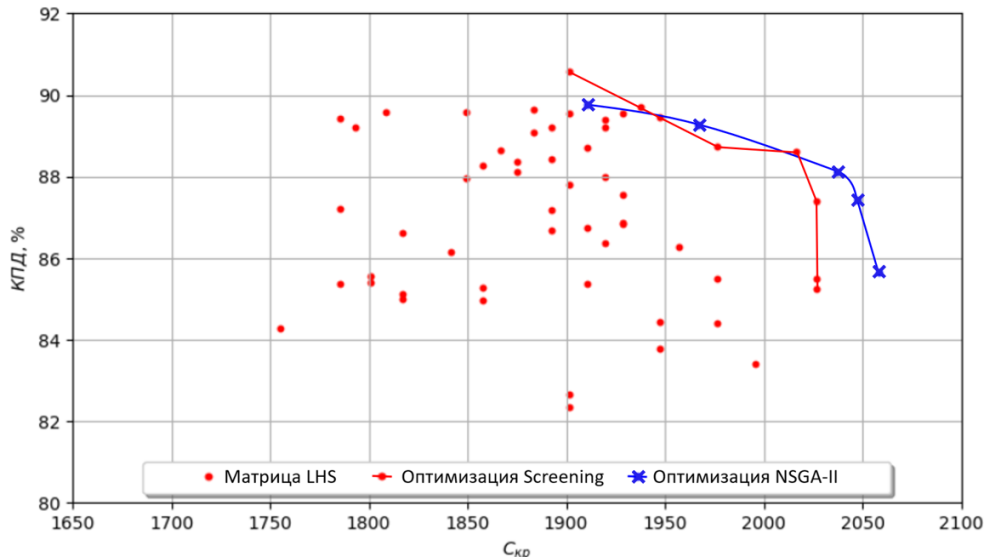


Рисунок 11 – Совмещенные точки конфликтующих целевых функций, *CFD* расчеты (ОП-5)

Для анализа геометрических параметров, влияющих на форму напорной характеристики ПЧ ОН, был выполнен расчет 55 вариантов ПЧ ОН. Расчет напорных характеристик выполнялся по 4 режимам работы насоса:  $0,4 \times Q_{ном}$ ,  $0,5 \times Q_{ном}$ ,  $0,6 \times Q_{ном}$ ,  $Q_{ном}$ .



Рисунок 12 – Распределение целевых функций с учетом формы напорной характеристики

На рисунке 13 представлено сравнение полей относительной скорости в межлопастном канале по периферийному сечению на режиме  $0,4 \times Q_{ном}$  для вариантов ПЧ ОН с западанием напорной характеристики ( $-8\%$ ) и с не западающей формой ( $+8\%$ ), с уровнем КПД насоса  $89,2\%$ .

В случае варианта ПЧ ОН с западающей формой напорной характеристики, периферийный межлопастной канал имеет отрыв и происходит задержание течения в межлопастном канале.

Из проведённого анализа влияния параметров определено, что наибольшая крутизна напорной характеристики обеспечивается при  $d_{вТ}/D_2 = 0,37-0,38$  в комбинации с углами  $\beta_{1-2вТ} = 46,5$  град и  $\beta_{1-2пер} = 15,4$  град. Увеличение угла наклона лопасти в середине профиля приводит к уменьшению угла охвата лопасти РК при неизменном  $d_{вТ}/D_2$  и снижает крутизну напорной характеристики.

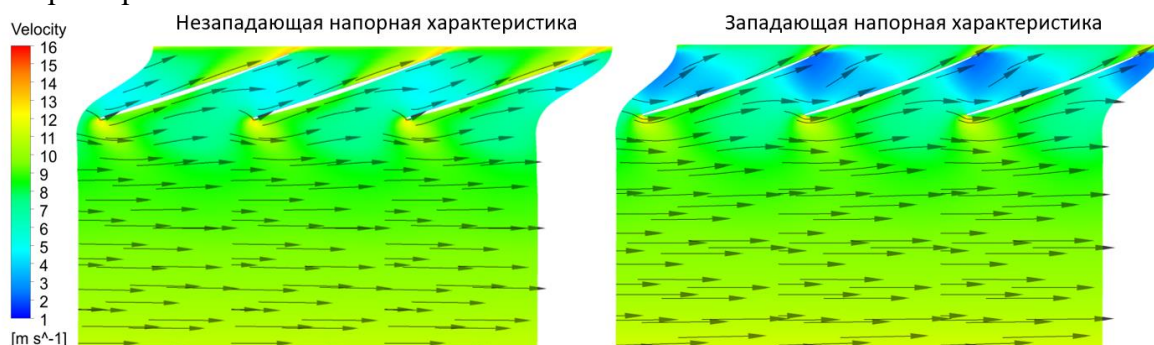


Рисунок 13 – Поля относительной скорости по периферийному сечению лопасти

В шестой главе приведены результаты использования разработанного подхода многокритериальной оптимизации проточной части осевого насоса ОД-11 для использования в составе насосного агрегата ГЦНА-1720 реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Разработанная методика позволила в короткие сроки выполнить модернизацию ОД-11 и повысить энергетические и кавитационные характеристики насоса.

В качестве исходной проточной части использовалась ранее разработанная проточная часть осевого насоса ОД-11, энерго-кавитационная характеристика которого представлена на рисунке 3. На основе созданной матрицы планирования эксперимента методом латинского гиперкуба выполнены CFD расчеты и отобраны 1000 вариантов ПЧ ОН удовлетворяющие требованию по напору. Выполнено обучение двух метамоделей на основе алгоритма нейронной сети для прогнозирования энергетической и кавитационной характеристик насоса. На основе разработанных метамоделей выполнена оптимизация геометрии проточной части осевого насоса с использованием генетического алгоритма NSGA-II. В результате оптимизации получен Парето-фронт по двум целевым функциям (КПД и  $C_{кр}$ ), удовлетворяющий требованию обеспечения не западающей формы напорной характеристики. Полученный Парето-фронт с обозначением параметров исходной проточной части ОД-11 представлен на рисунке 14.

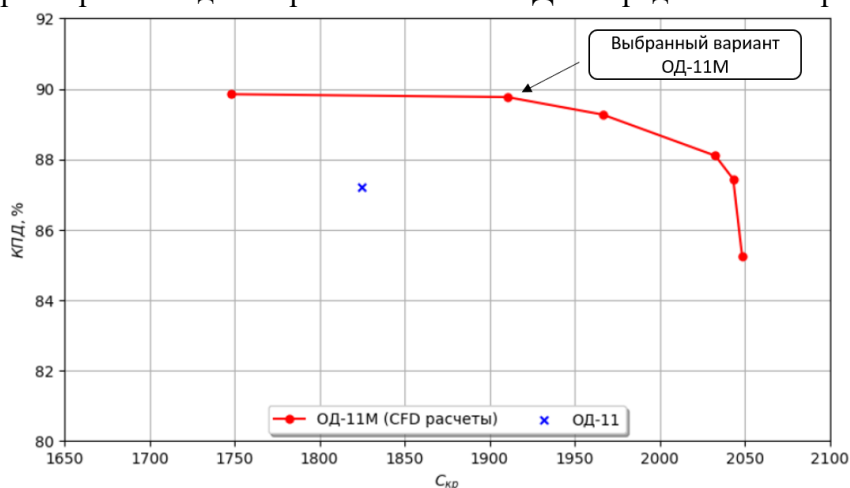


Рисунок 14 – Парето-фронт проточной части насоса ОД-11М

На рисунке 15 представлено сравнение энергетических характеристик исходной проточной ОД-11 и разработанной ОД-11М, а также визуализация выбранной геометрии разработанной проточной части ОД-11М. В результате выполненной модернизации исходной проточной части ОД-11 КПД насоса увеличен с 87,2 % до 89,8 % (увеличен на 2,6 %), кавитационный коэффициент быстроходности увеличен с 1825 до 1910.



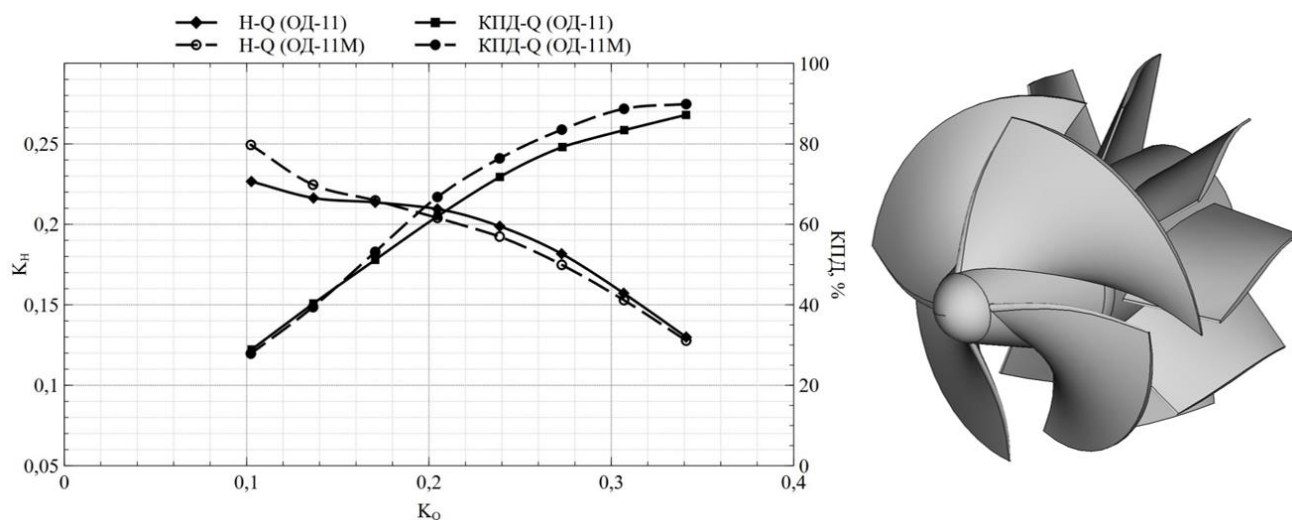


Рисунок 15 – Сравнение характеристик ОД-11 и ОД-11М, визуализация ОД-11М

Повышение КПД насоса обеспечено за счет значительного снижения густоты решетки профиля лопасти у втулки с 1,451 до 1,259 и уменьшения густоты решетки выправляющего аппарата с 1,561 до 1,525, уменьшение густоты решетки приводит к снижению профильных потерь трения в межлопастных каналах РК и ВА. Повышение кавитационных качеств насоса обеспечивается за счет уменьшения втулочного отношения  $d_{вт}/D_2$  с 0,55 до 0,44, что увеличивает площадь проходного сечения и снижает меридианную составляющую скорости потока и приводит к повышению статической составляющей давления на входе в РК.

#### Заключение

1. Разработана универсальная параметрическая модель проточной части осевого насоса, которая позволяет без ограничений адаптировать ее под любое программное обеспечение для 3D моделирования САД. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Генератор осевых лопастных систем» № 2019665355, которая используется при разработке проточных частей осевых насосов, а также в учебном процессе Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики ФГАОУ ВО «СПбПУ».

2. Разработана достаточно точная и экономная модель расчета течения и потерь в проточной части осевого насоса, которая позволяет рассчитать матрицу планирования эксперимента в размере, требуемом для создания метамодели проточной части осевого насоса, выполнена апробация разработанной модели расчета энерго-кавитационных характеристик осевых насосов с использованием экспериментальных данных насосов ОП-2, ОП-5 и ОД-11.

3. Разработана методика создания метамодели прогнозирования энергетических характеристик осевых насосов: напора и КПД на основе архитектуры полносвязной нейронной сети. Разработана методика создания метамодели прогнозирования кавитационного коэффициента быстроходности насоса в условиях малого количества элементов обучающей выборки. Методики могут быть использованы для других типов лопастных гидромашин. Метамодели разработаны на основе архитектуры полносвязной нейронной сети. Разработанные методики были также применены в ООО «СУЛАК» при оптимизации проточных частей погружных центробежных насосов типа ВПЭН.

4. Разработаны критерии обеспечения не западающей формы напорной характеристики, с использованием которых удалось обеспечить не западающую форму характеристики в широком диапазоне подач каталожного насоса ОП-5 при одновременном обеспечении высоких энергетических и кавитационных качеств насоса. Полученные результаты также были использованы в АО «Силовые машины» при проектировании осевого насоса общепромышленного назначения.

5. Выполнен критический анализ методов многокритериальной оптимизации: *Screening* (метод сортировки), *NSGA-II* и др. Выполнена верификация на тестовых функциях: *Rosenbrock*, *Zitzler-Deb-Thiele's function* № 1, 2 и 3. Алгоритм *Screening* не позволил достичь высокой степени сходимости с аналитическим Парето-оптимальным решением, в этом случае высокую



степень эффективности показал алгоритм многокритериальной оптимизации на основе генетического алгоритма *NSGA-II*. Для получения Парето-оптимальных решений при использовании метамоделей достаточно выполнить около 50 расчетов срывных кавитационных характеристик для прогнозирования кавитационного запаса насоса и 1000 менее ресурсоемких расчетов для прогнозирования КПД и напора.

6. Разработанные методы создания метамоделей применены для создания высокоэффективных проточных частей осевых насосов. Так для существующего каталожного осевого насоса ОП-5, имеющего расчетный и экспериментальный КПД 86 %, расчетный КПД был увеличен на 4 %. Выполнена модернизация проточной части осевого насоса ОД-11 для инновационного проекта БРЕСТ ОД-300. С использованием разработанной методики КПД насоса удалось увеличить с 87,2 % до 89,8 % (+ 2,6 %), кавитационный коэффициент быстроходности  $S_{кр}$  увеличен с 1825 до 1910. Обеспечена не западающая форма напорной характеристики модернизированного варианта ОД-11М, относительный прирост напора при переходе от режима  $0,5 \times Q_{ном}$  до  $0,4 \times Q_{ном}$  составил 7,67 %, что заметно превышает прирост напора исходного варианта насоса ОД-11, который составил 2,09 %. С применением разработанных рекомендаций была увеличена крутизна напорной характеристики в диапазоне подач от  $0,3 \times Q_{ном}$  до  $Q_{ном}$ .

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов:**

1. Свобода Д.Г., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Щуцкий С.Ю. Оптимизация проточной части осевого насоса с использованием поверхности отклика. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 8, с. 74–83, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83

2. Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский, Е.А. Иванов. О проектировании проточной части осевого насоса низкой быстроходности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 41-52. DOI: 10.18721/JEST.230204.

#### **В изданиях, индексируемых Scopus:**

1. Svoboda, D.G.; Zharkovskii, A.A.; Ivanov, E.A.; Shchutskii, S.Y.; Dyagilev, P.Y. High-Efficiency Axial Pump for Reactor Use. Russian Engineering Research, Allerton Press, Inc., 2019. Vol. 39, – №7, pp. 556-560, DOI: 10.3103/S1068798X19070220

2. Zharkovskii, A.A.; Ivanov, E.A.; Borshchev, I.O.; Svoboda, D.G. Technique for Axial Pump Characteristics Prediction in CFD Package OpenFOAM. AIP Conference Proceedings, Vol. 2141, № 1, 030063 (2019), Oil and Gas Engineering Conference, OGE 2019, Omsk; Russian Federation, 26 February to 28 February 2019; The code 151176, DOI: 10.1063/1.5122113

#### **Патенты, авторские свидетельства:**

1. Генератор пространства параметров. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019665576, 26.11.2019. Заявка № 2019664419 от 15.11.2019 / Борщев И.О., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Ключев А.С.

2. Генератор осевых лопастных систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019665355, 22.11.2019. Заявка № 2019664618 от 19.11.2019 / Борщев И.О., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Ключев А.С.