

Акимов Станислав Викторович

**Разработка методов математического моделирования и
повышения энергоэффективности нефтяных магистральных
насосов путем модернизации поверхности элементов
проточной части**

05.04.13 - Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель:

Жарковский Александр Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы энергетического машиностроения ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты:

Валюхов Сергей Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазового оборудования и транспортировки ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

Ломакин Владимир Олегович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Тимушев Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры 202 «Ракетные двигатели» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится « 01 » марта 2022 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета У.05.04.13 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118).

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

Автореферат разослан « ___ » _____ 20__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Борщев Игорь Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Повышение КПД магистральных насосов достигается за счет снижения потерь энергии, которые разделяются на механические, объемные и гидравлические. Первые два типа потерь рассчитываются достаточно точно. Расчет гидравлических потерь является более сложной задачей, так как геометрия каналов и структура течения в проточной части центробежного насоса сложны, а гидравлические потери зависят как от формы, так и от качества поверхностей проточной части.

Несмотря на то, что в настоящее время проведено большое количество исследований, посвященных оптимизации формы проточных частей центробежных насосов с целью минимизации гидравлических потерь, влияние качества поверхностей на экономичность насосов не изучено в полной мере. Как следствие, отсутствуют рекомендации по применению экономически обоснованных методов повышения КПД нефтяных магистральных насосов за счет улучшения качества поверхностей проточной части.

Таким образом, разработка методов математического моделирования и повышения энергоэффективности нефтяных магистральных насосов путем модернизации поверхности элементов проточной части является актуальной темой, требующей проведения углубленных исследований.

Целью диссертационной работы является разработка методов математического моделирования и повышения энергоэффективности нефтяных магистральных насосов путем модернизации поверхности элементов проточной части.

Основными задачами диссертации являлись:

1. Разработка аналитической методики оценки величины гидравлических потерь в отводящих элементах насоса двухстороннего входа (спиральный отвод однозавиткового или двухзавиткового типа, направляющий аппарат, конический диффузор).

2. Разработка методики оценки эффективности модернизации поверхностей проточных частей нефтяных магистральных насосов с применением методов вычислительной гидродинамики.

3. Проведение экспериментальных и расчетных исследований по определению влияния модернизации поверхностей проточных частей нефтяных магистральных насосов на их гидравлические и энергетические характеристики.

4. Расчетно-экспериментальное определение зависимости величины эквивалентной песочной шероховатости от среднеарифметического отклонения профиля (R_a).

5. Разработка алгоритма и программы для оценки влияния качества поверхностей проточных частей на энергоэффективность нефтяных магистральных насосов на основе разработанной аналитической методики.

Научная новизна работы:

1. Методика оценки эффективности модернизации поверхностей проточных частей нефтяных магистральных насосов с применением методов вычислительной гидродинамики.

2. Аналитическая методика оценки эффективности модернизации внутренних поверхностей элементов отвода.

3. Зависимость величины эквивалентной песочной шероховатости от среднеарифметического отклонения профиля (R_a).

4. Результаты экспериментальных исследований влияния модернизации поверхностей проточных частей на напорные и энергетические характеристики магистральных насосов.

Достоверность результатов обеспечивается экспериментальными исследованиями полноразмерных образцов нефтяных магистральных насосов на аттестованном стенде с применением высокоточных средств измерений, соблюдением требований нормативной документации, в части требований к испытательным стендам, методам, средствам и условиям проведения испытаний, к обработке результатов испытаний.

Основными методами исследования являются численное моделирование и анализ экспериментальных данных, полученных путем сравнительных стендовых испытаний натуральных образцов магистральных насосов.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный метод используется для повышения КПД нефтяных магистральных насосов, поставляемых на нефтеперекачивающие станции системы «Транснефть».

2. Изготовлен и находится в опытной эксплуатации нефтяной магистральный насос НМ 1250-260 с увеличенным КПД, содержащий спиральный отвод, на поверхности которого нанесено специальное покрытие. Подтверждена стойкость покрытия при длительном перекачивании нефти и нефтепродуктов.

3. Разработан алгоритм и программа для оценки влияния качества поверхностей проточных частей отводов на энергоэффективность нефтяных магистральных насосов на основе разработанной аналитической методики.

4. На основе результатов экспериментальных и расчетных исследований получен прирост КПД для типоразмерного ряда нефтяных магистральных насосов с номинальными подачами от 1250 до 10000 м³/ч.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки эффективности нанесения покрытий при модернизации поверхностей проточных частей нефтяных насосов с применением методов вычислительной гидродинамики.

2. Аналитическая методика проведения оценки эффективности модернизации внутренних поверхностей элементов отвода.

3. Зависимость между величиной эквивалентной песочной шероховатости и среднеарифметическим отклонением профиля (Ra).

4. Результаты экспериментальных исследований влияния модернизации поверхностей проточных частей на напорные и энергетические характеристики магистральных насосов.

5. Полезная модель одноступенчатого центробежного насоса двухстороннего входа.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: IX-я Международная научно-техническая конференция «Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе» - «СИИТ'17», г. Воронеж, 2017 г.; X-я Международная научно-техническая конференция «Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе»- «СИИТ'19», г. Воронеж, 2019 г.; XI-я международная научно-техническая конференция «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», г. Санкт-Петербург, 2020 г.; Международная научно-техническая конференция «ЕСОРУМР-RUS'2020. Энергоэффективность и инновации в насосостроении» г. Москва, 2020 г.; XI-я Международная научно-техническая конференция «Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе»- «СИИТ'21», г. Воронеж, 2021 г.; Международная научно-техническая конференция «ЕСОРУМР-RUS'2021. Энергоэффективность и инновации в насосостроении» г. Москва, 2021 г.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертационной работы изложены в 9 печатных научных работах, опубликованных в журналах и сборниках научных трудов, в том числе 2 – в статьях, входящих в список научных изданий, рекомендованных ВАК, 1 – в изданиях, индексируемых Scopus, а также в 1 патенте на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 216 страницы. Работа содержит 12 таблиц, 119 рисунков, 6 приложений и библиографический список из 74 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** рассматриваются основные пути повышения КПД нефтяных магистральных насосов. Выявляются основные направления исследования, формулируется цель работы, научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, методы исследования и достоверность результатов.

В первой главе проводится анализ ранее выполненных работ, в том числе работ по применению покрытий и механическому улучшению качества поверхностей проточных частей центробежных насосов, моделированию шероховатости поверхностей, применению программных продуктов вычислительной гидродинамики для расчетов напорных и энергетических характеристик центробежных насосов с учетом шероховатости стенок проточной части. Предложена зависимость между величиной эквивалентной песочной шероховатости и среднеарифметическим отклонением профиля (Ra).

Рассмотрены результаты ранее выполненных научных работ, в которых проведены исследования влияния покрытий на характеристики насосов, в том числе: полиуретанового покрытия, покрытий на основе поверхностно-активных ингибиторов коррозии и на основе фторопласта. Во всех случаях авторами работ отмечается повышение КПД насосов после нанесения покрытий, которое в некоторых случаях достигает 10%. В случае покрытий на основе поверхностно-активных ингибиторов коррозии и на основе фторопласта, указывается, что гидрофобные свойства покрытий оказывают положительное влияние на величину прироста КПД. Однако данные результаты получены для насосов с относительно низкими значениями подачи (до 380 м³/ч), напора (до 32 м) и мощности (до 40 кВт), что не позволяет использовать данные результаты применительно к нефтяным магистральным насосам, мощность которых лежит в пределах от 1 до 6 МВт. Кроме этого, перечисленные покрытия имеют сложную и дорогостоящую технологию нанесения с использованием массивных стационарных установок, что ограничивает возможность их применения ввиду невозможности проведения восстановления покрытий в условиях эксплуатации. Также рассмотрены промышленные покрытия типа Loctite 7227 Nordbak Brushable Ceramic или Belzona 1341 Supermetalgilde, которые имеют простую технологию нанесения, аналогичную технологии нанесения обычных лакокрасочных покрытий. Отмечено, что данные покрытия не имеют гидрофобных свойств, а их влияние на энергоэффективность насосов достигается за счет низкой величины шероховатости (до $Ra_{0,48}$). Сделан вывод, что данный вид покрытий является более предпочтительным для применения в нефтяных магистральном насосах из-за простой технологии нанесения и, следовательно, высокой ремонтпригодности.

Проведен обзор исследований, связанных с повышением КПД центробежных насосов за счет снижения величины шероховатости элементов проточной части, в том числе механическим способом. Увеличение КПД при этом достигает в среднем 4...6% и более. Влияние шероховатости растёт по мере снижения коэффициента быстроходности насоса n_s . На прирост КПД оказывает влияние исходная величина шероховатости и размер насоса.

Одним из важных вопросов, связанных с оценкой влияния шероховатости на энергоэффективность насосов, является вопрос соотношения между техническими параметрами шероховатости (Ra , Rz) и значениями эквивалентной (песочной) шероховатости k_s , используемой в численных расчетах. Анализ литературных источников показывает, что для одних и тех же величин Ra значение k_s может лежать в широких пределах в зависимости от формы и шага микронеровностей. В связи с этим при проведении численных расчетов было предложено использовать выражение (1), достоверность которого подтверждается результатами расчетов в разделах 3, 4 диссертационной работы.

$$k_s = 2,3 \cdot Ra. \quad (1)$$

Измерение величины Ra немодифицированных поверхностей рекомендуется проводить с помощью образцов шероховатости для конкретного метода обработки (например, литьё с дробеструйной обработкой), поскольку в случае поверхностей отливок профилометры могут давать некорректные значения из-за непериодического характера микронеровностей.

Проведен обзор программных продуктов для выполнения расчетов характеристик центробежных насосов методами вычислительной гидродинамики. На основе положительного опыта автора, а также преимуществ, связанных с низкой трудоемкостью и временными затратами при создании расчетных моделей проточных частей, в качестве указанного программного продукта был выбран пакет FloEFD.

Во второй главе приводятся краткое описание конструкции насосов типа НМ, экспериментальной установки (испытательного стенда) и результаты экспериментальных исследований насосов типа НМ с модернизированными поверхностями проточной части.

Экспериментальные исследования проведены на аттестованном испытательном стенде АО «ТНН», который обеспечивает возможность проведения испытаний нефтяных магистральных насосов по 1 классу точности по ГОСТ 6134-2007 и имеет следующие метрологические характеристики: относительная предельная погрешность измерения подачи $e_Q=0,2\%$, относительная предельная погрешность измерения напора $e_H=0,72\%$, относительная предельная погрешность измерения КПД $e_{\eta}=0,75\%$.

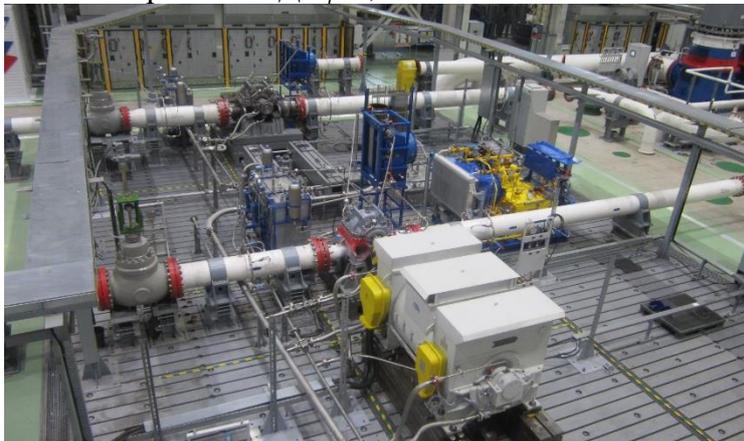


Рисунок 1 – Испытательный стенд

Экспериментальные исследования проведены для насосов: НМ 1250-260-1, НМ 1250-260-2 и НМ 10000-210. Исполнения 1 и 2 насоса НМ 1250-260 отличаются тем, что конструкция НМ 1250-260-1 имеет однозавитковый спиральный отвод с установленным двухканальным направляющим аппаратом, а НМ 1250-260-2 – классический двухзавитковый спиральный отвод с разделительным ребром.

Модернизации подвергались следующие элементы проточных частей насосов:

- НМ 1250-260-1 – поверхности спирального отвода и конического диффузора, метод модернизации – нанесение гладкого покрытия;
- НМ 1250-260-2 – механическая обработка (полирование) спиральных каналов отвода;
- НМ 10000-210 – механическая обработка (полирование) спиральных каналов отвода, механическая обработка (полирование) межлопастных каналов рабочего колеса, нанесение гладкого покрытия на поверхности межлопастных каналов рабочего колеса.

Для насоса НМ 1250-260-1 сравнение результатов испытаний до и после проведения модернизации показали, что напор насоса на оптимальном режиме увеличился на 6,7 м, а КПД насоса возрос на 2,0%. Потребляемая мощность насоса осталась неизменной во всем диапазоне подач. Влияние покрытия на КПД и напор насоса существенно зависит от подачи. При значениях коэффициента подачи $\varphi < 0,04$, что соответствует $\approx 0,65 Q_{ber}$, значения КПД и напора насоса с покрытием соответствует значениям КПД и напора насоса без покрытия.

Для насоса НМ 1250-260-2 сравнение результатов испытаний до и после проведения модернизации показали, что напор насоса на оптимальном режиме увеличился на 4,9 м, а КПД насоса возрос на 2,4%. Потребляемая мощность насоса совпадает до значений коэффициента расхода $\varphi=0,05$, а при значениях $\varphi > 0,05$ наблюдается расхождение коэффициента мощности λ , которое увеличивается с ростом значения φ (коэффициент мощности меньше для насоса с обработанными каналами). В отличие от испытаний НМ 1250-260-1 увеличение напора и КПД происходит во всем диапазоне подач. Даже на достаточно низких подачах ($\varphi \approx 0,2$) величина прироста КПД превышает 1%, что, очевидно, связано с модернизацией поверхностей спиральных каналов (у НМ 1250-260-1 спиральные каналы выполнены в направляющем аппарате и не подвергались модернизации).

Сравнение энергетических характеристик насосов НМ 1250-260-1 и НМ 1250-260-2 в безразмерном виде до модернизации (пунктирные линии) и после модернизации (основные линии) показаны на рисунке 2. Символом «*» отмечены характеристики после модернизации.

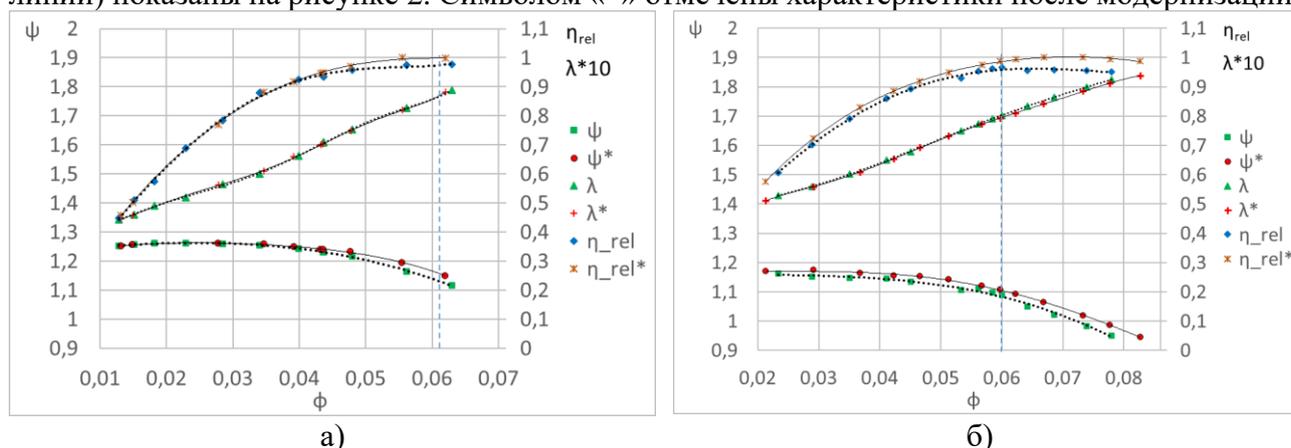


Рисунок 2 – сравнительные характеристики насоса НМ 1250-260-1 (а) и НМ 1250-260-2 (б)

Сравнение результатов испытаний насоса НМ 10000-210 до и после проведения модернизации спиральных каналов отвода показало отсутствие какого-либо значимого улучшения характеристик. При этом, линейные размеры каналов отвода насоса НМ 10000-210 более чем в 3 раза превышают размеры каналов у насосов НМ 1250-260. Следовательно, относительная шероховатость K_s исходных поверхностей отвода насоса НМ 10000-210 как минимум в 3 раза ниже, чем у НМ 1250-260, в результате чего величина прироста КПД насоса НМ 10000-210 может оказаться значительно ниже погрешности измерения (0,75%).

При модернизации поверхностей межлопастных каналов рабочего колеса насоса НМ 10000-210 путем механической обработки (полирования) по результатам сравнительных испытаний повышение КПД на номинальном режиме составило 2,8%, а напора – 7 м. Потребляемая мощность насоса во всем диапазоне подач осталась практически неизменной.

В случае модернизации аналогичного насоса путем нанесения гладких покрытий на поверхности межлопастных каналов рабочего колеса результаты оказались хуже: на номинальной подаче получено снижение КПД на 0,4% и снижение напора на 5,9 м.

Сравнение энергетических характеристик насоса НМ 10000-210 в безразмерном виде до модернизации (пунктирные линии) и после модернизации (основные линии) показаны на рисунке 3. Символом «*» отмечены характеристики после модернизации.

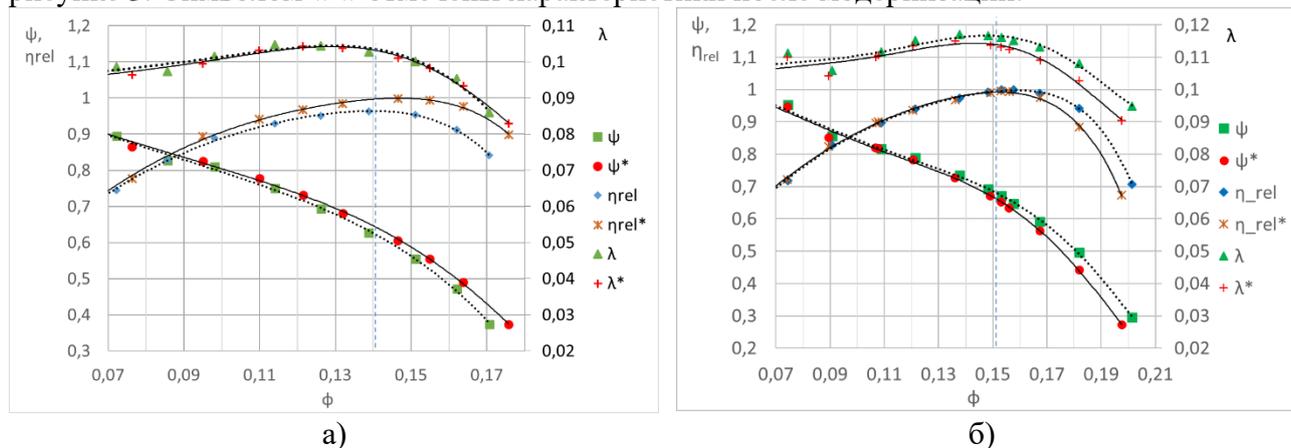


Рисунок 3 – сравнительные характеристики насоса НМ 10000-210 при модернизации механическим способом (а), и путем нанесения гладкого покрытия (б)

При ревизии покрытия после испытаний были выявлены сколы на двух из четырнадцати лопаток на выходе рабочего колеса и на одной лопатке – на входе в рабочее колесо. Кроме этого, на снижение характеристик насоса предположительно оказывает влияние наличие волнистости на поверхности покрытия (из-за образования наплывов в процессе нанесения).

Выявленные недостатки объясняются технологическими причинами: затрудненным доступом к поверхностям межлопастных каналов в процессе нанесения покрытия, сложной формой поверхностей лопастей и неодинаковым положением лопастей одного и того же колеса в пространстве в процессе нанесения покрытия. Учитывая изложенное для модернизации рабочих колес, предпочтение следует отдавать механическому способу.

При этом, на нефтеперекачивающих станциях проведено обследование насосов НМ 10000-380 с гладкими покрытиями спиральных отводов, по результатам которого выявлены насосы с наработкой более 30000 ч, покрытия которых практически не имели повреждений. Также имелись насосы НМ 10000-380 у которых степень разрушения покрытий составляла более 90% по площади поверхности. Указанные различия свидетельствуют о важности соблюдения технологии нанесения гладких покрытий для обеспечения их долговечности.

Дополнительно в главе 2 приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния коррозии поверхностей рабочего колеса на изменение энергоэффективности нефтяного магистрального насоса НМ 3600-230. В исходном состоянии рабочее колесо указанного насоса было модернизировано методом полирования. Отмечено, что при относительно небольшом повышении шероховатости поверхностей рабочего колеса до величины $\sim Ra19$ снижение КПД насоса на номинальной подаче составило 3,2%.

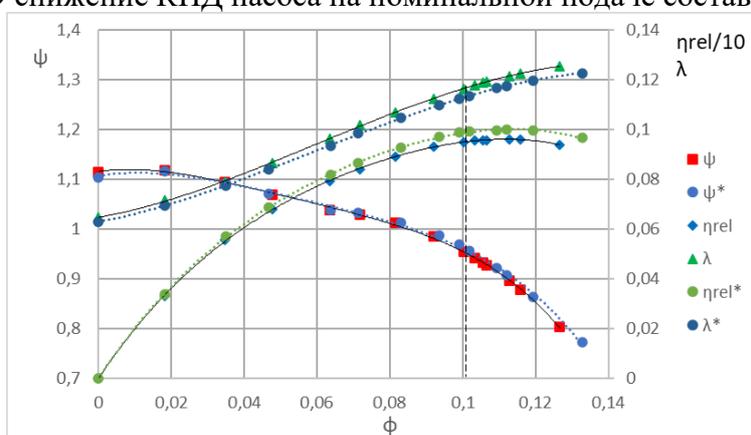


Рисунок 4 – Сравнительные характеристики насоса НМ 3600-230 в модернизированном (пунктирные линии) и корродированном состоянии (основные линии)

С целью выполнения анализа полученных результатов проведена серия CFD-расчетов насоса при различных величинах эквивалентной песочной шероховатости k_s поверхностей рабочего колеса. Графики мощности дискового трения (P_d) и снижения КПД ($\Delta\eta$) в зависимости от величины шероховатости, полученные по результатам CFD-расчетов, приведены на рисунке 5.

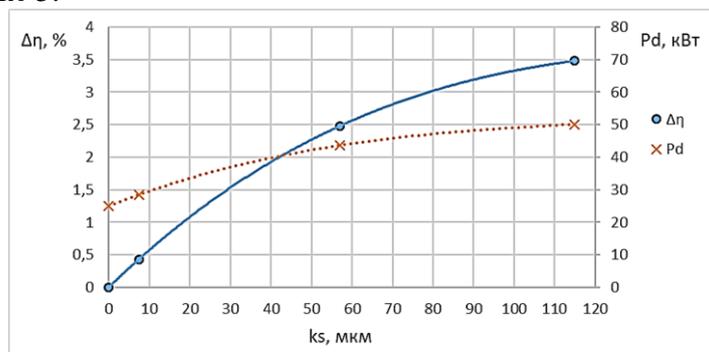


Рисунок 5 – Результаты CFD-расчетов

В соответствии с рисунком 5, величине экспериментально определенного значения падения КПД – 3,2% соответствует значение $k_s=90$ мкм. Таким образом, сопоставляя полученное значение k_s с измеренным значением шероховатости Ra19, для случая

корродированных поверхностей предложена следующая формула расчета эквивалентной песочной шероховатости:

$$k_s = 4,7 \cdot Ra. \quad (2)$$

В третьей главе представлена разработка аналитической методики определения эффективности модернизации поверхностей проточных частей отводов насосов типа НМ. На примере насосов НМ 1250-260 и НМ 10000-210 показано, что результаты расчетов по указанной методике имеют хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований.

Суть метода заключается в интегрировании по поверхности отвода уравнения (3), связывающего мощность потерь с характеристиками потока среды.

$$dP = \frac{\rho}{2} \cdot (c_f + 0,0015) \cdot V^3 \cdot dA, \quad (3)$$

где dP – мощность потерь на трение жидкости о поверхность площадью dA , ρ – плотность жидкости, V – абсолютная скорость течения жидкости, c_f – коэффициент трения.

Вывод формул для потерь в спиральном отводе путем интегрирования выражения (3) возможен при условии упрощения геометрии отвода, в связи с чем форма поперечного сечения отвода упрощается до прямоугольной с постоянной шириной B , а реальный профиль спирали заменяется эквивалентной спиралью Архимеда, радиус R_S и угол φ которой связаны формулой:

$$R_S = \frac{H_p}{2\pi} \cdot \varphi, \quad (4)$$

где H_p – высота рабочего сечения отвода.

Абсолютная скорость движения жидкости в произвольной точке спирального отвода, находящейся на расстоянии R от центральной оси (оси вращения ротора насоса), определяется по формуле:

$$V = \frac{1}{R} \left(\frac{Q^2}{4\pi^2 B^2 \eta_v^2} + \frac{g^2 H^2}{\omega^2 \eta_h^2} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где η_v , η_h – объемный и гидравлический КПД соответственно.

Коэффициент трения c_f определяется по формуле:

$$c_f = \frac{0,136}{\left[-\log \left(0,2 \frac{k_s}{R_h} + \frac{12,5}{Re} \right) \right]^{2,15}}, \quad (6)$$

где k_s – абсолютная (песочная) шероховатость, $R_h = 0,5 \cdot D_h$ – гидравлический радиус, Re – число Рейнольдса, ν – кинематическая вязкость перекачиваемой жидкости.

$$D_h = \frac{4A}{P_w}, \quad (7)$$

$$Re = \frac{V_{cp} D_h}{\nu}, \quad (8)$$

где A – поперечная площадь сечения спирального канала, P_w – периметр поперечного сечения канала (смоченный периметр), $V_{cp} = 0,5(V(R_2) + V(R_{max}))$ – средняя скорость течения в сечении.

Непосредственное интегрирование формулы (3) затруднено в связи с тем, что коэффициент c_f в соответствии с формулами (7), (8) различен для разных сечений отвода. Поэтому целесообразно разбить область спирального отвода на n сегментов (рисунок 6б), в пределах которых значение c_f можно принять постоянным. Как правило, $n=8...10$.

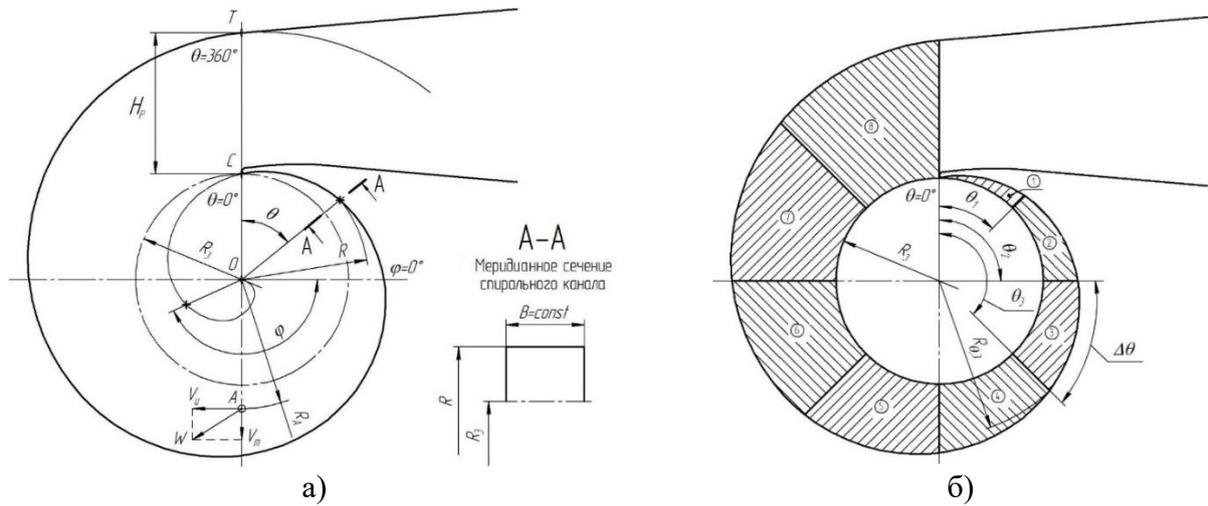


Рисунок 6 – меридианное сечение спирального отвода (а) и разбиение на сегменты (б)

С учетом изложенного, результат интегрирования уравнения (3) по двум боковым и одной спиральной стенке отвода может быть представлен формулами:

$$P = K_1 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q^2}{4\pi^2 B^2 \eta_v^2} + \frac{g^2 H^2}{\omega^2 \eta_h^2} \right)^{1,5} \cdot \sum_{i=1}^n \left[(c_f + 0,0015) \cdot \left(\iint_{A_i} \frac{1}{R^3} dA \right) \right]. \quad (9)$$

Интеграл в формуле (9) может быть представлен в виде:

$$\iint_{A_i} \frac{1}{R^3} dA = 2I_{C,i} + 2I_{S,i} + I_{SP,i}, \quad (10)$$

где I_C , I_S , I_{SP} – интегралы для двух боковых и одной спиральной стенки отвода.

$$I_{C,i} = \frac{2\pi}{n} \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_3 + H_p \frac{i-1}{n}} \right), \quad (11)$$

$$I_{S,i} = \left[\left(2\pi \frac{i}{n} + \frac{2\pi R_3}{H_p} \right) \left(-\frac{1}{R} \right) - \frac{2\pi}{H_p} \ln R \right] \Bigg|_{H_p \frac{i-1}{n}}^{H_p \frac{i}{n}}, \quad (12)$$

$$I_{SP,i} = -\frac{2\pi^2 B}{H_p^2} \left[\frac{1}{\varphi^2} \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) + \ln \left(1 + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right] \Bigg|_{2\pi \frac{i-1}{n} + \frac{2\pi R_3}{H_p}}^{2\pi \frac{i}{n} + \frac{2\pi R_3}{H_p}}, \quad (13)$$

где R_3 – радиус расположения языка отвода (рисунок 6).

Для случая двухзавиткового спирального отвода, последний можно рассматривать как систему, состоящую из двух спиральных каналов и одного переводного канала.

При расчете гидравлических потерь в отводе такого типа, для определения потерь в спиральных каналах применяются ранее приведенные формулы для однозавиткового спирального отвода с той лишь разницей, что в формуле (9) выполняется удвоенное суммирование для $n/2$ секторов.

Вычисление потерь в коническом диффузоре также выполняется по формуле (3). Для этого строится эквивалентный диффузора круглого сечения, входной диаметр которого равен гидравлическому диаметру рабочего сечения спирального отвода, а длина эквивалентна длине конического диффузора. Эквивалентный диффузор разбивается на N сегментов, в пределах которых значения Re можно принять постоянными. Как правило $N=8...10$.

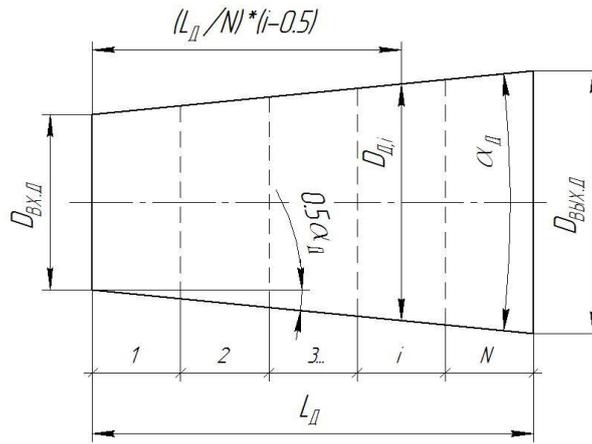


Рисунок 7 – Схема эквивалентного диффузора

Суммарные потери в коническом диффузоре определяются по формуле:

$$P_D = \frac{32\rho Q^3}{\pi^2} \cdot \frac{L_D}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{0,136 \left[-\log \left(0,2 \frac{k_s}{R_{Д,i}} + \frac{12,5}{Re_{Д,i}} \right) \right]^{2,15} + 0,0015}{D_{Д,i}^5} . \quad (14)$$

Для определения величины прироста КПД $\Delta\eta$ по аналитической методике, для каждого отдельного насоса проводится расчет при шероховатости поверхностей до модернизации (для исследуемых насосов $k_s=92$ мкм) и после модернизации ($k_s=0$ мкм). Используя полученные по результатам расчетов значения потерь мощности $P_{омв}$ (для поверхностей в исходном состоянии) и $P_{омв}^*$ (для модернизированных поверхностей) находится снижение потерь мощности в насосе за счет модернизации поверхностей $\Delta P_{омв}$, КПД насоса после модернизации η^* и прирост КПД $\Delta\eta$:

$$\Delta P_{отв} = P_{отв} - P_{отв}^* , \quad (15)$$

$$\eta^* = \frac{\rho g Q H}{\frac{\rho g Q H}{\eta} - \Delta P_{отв}} , \quad (16)$$

$$\Delta\eta = \eta^* - \eta . \quad (17)$$

С помощью сравнительных расчетов аналитическим методом получены величины прироста КПД для ранее исследованных экспериментальным путем насосов НМ 1250-260-1 и НМ 1250-260-2 (рисунок 8), а также для НМ 10000-210. В дополнение к расчетам для измеренного значения $k_s=92$ мкм ($Ra40$) на рисунке 8 приведены результаты расчетов для $k_s=115$ мкм ($Ra50$) и $k_s=58$ мкм ($Ra25$).

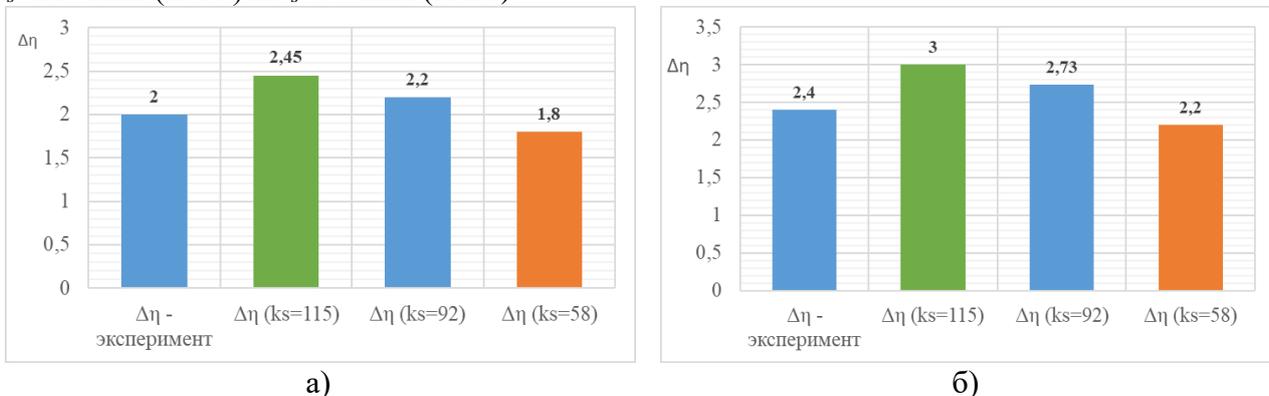


Рисунок 8 – сравнение экспериментального и расчетных значений прироста КПД насоса НМ 1250-260-1 (а) и НМ 1250-260-2 (б) при различных k_s

Как видно из рисунка 8 расчетные значения прироста КПД для значения $k_s=92$ мкм показали хорошее совпадение с экспериментальными значениями, отклонения составили: 0,2% для насоса НМ 1250-260-1 и 0,33% для НМ 1250-260-2.

Расчет повышения КПД насоса НМ 10000-210 показал результат 0,3%, что также хорошо согласуется с результатами эксперимента, по результатам которого прироста КПД выявлено не было, поскольку значение порядка 0,3% существенно меньше погрешности измерения КПД стенда (0,75%).

Таким образом, расхождение расчетных и экспериментальных значений для экспериментального метода составляет не более 0,33%

Приемлемое расхождение расчетных и экспериментальных значений КПД нефтяных магистральных насосов подтвердило достоверность принятого в формуле (1) соотношения $k_s=2,3 \cdot Ra$ для перевода значений среднего арифметического отклонения профиля микронеровностей (Ra) в значения эквивалентной песочной шероховатости k_s .

В главе 4 представлена разработка методики определения эффективности модернизации поверхностей проточных частей отводов насосов типа НМ с применением средств вычислительной гидродинамики.

Для реализации численного метода использована программа FloEFD, которая ранее успешно применялась в АО «ТНН» для оптимизационных расчетов различных нефтяных насосов. FloEFD, включает в себя все стадии численного моделирования: создание САД-модели, автоматическое построение расчетной сетки, расчет и визуализация результатов.

Программа FloEFD решает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, замкнутые модифицированной $k-\varepsilon$ моделью турбулентности с демпфирующими функциями, предложенными Лэмом и Бремхорстом, и ламинарно-турбулентным переходом, уравнения сохранения массы, момента и энергии. Для разрешения пограничного слоя используется метод «двухмасштабных пристеночных функций», который включает в себя пристеночную функцию с использованием «подсеток» в пограничном слое. Такой подход позволяет преодолеть ограничения обычного CFD-кода, связанные с необходимостью построения очень густой сетки вблизи стенки.

Расчетная область представлена непосредственно проточной частью насоса и проточной частью прямолинейных участков всасывающего и напорного трубопровода длиной 6Ду.

В качестве граничных условий задаются: на входе в расчетную область – объемный расход, на выходе из расчетной области – статическое давление.

В качестве рабочей среды задана вода с температурой 20⁰С без учета сжимаемости.

Вращение рабочего колеса задано путем указания области вращения с применением метода скользящих сеток (sliding) для описания взаимодействия ротор-статор.

Величины шероховатости Ra элементов проточной части определяются с помощью образцов шероховатости отливок с дробеструйной обработкой. По известным значениям Ra с помощью формулы (1) определяются значения эквивалентной песочной шероховатости k_s , которая для исследуемых насосов составляет: для каналов рабочего колеса – $k_s=32$ ($Ra_{12,5}$), поверхности отвода и конического диффузора до покрытия – $k_s=92$ (Ra_{40}), поверхности отвода и конического диффузора после модернизации – $k_s=0$ (Ra_0). Для механически обработанных поверхностей значения Ra определены по образцам шероховатости для фрезерования и точения. Получено: для ротора – $k_s=4$ ($Ra_{1,6}$), для направляющего аппарата – $k_s=8$ ($Ra_{3,2}$).

Величины утечек через щелевые уплотнения рабочего колеса рассчитаны по существующим полуэмпирическим методикам.

Расчетная сетка – прямоугольная декартова, выполнена с дополнительным дроблением элементов сетки в проточной части насоса. Для выбора оптимальной величины расчетной сетки выполнены расчеты на сеточную сходимость. Результаты расчетов сеточной сходимости по величине КПД корректируются с учетом потерь трения в подшипниках, трения в щелевых уплотнениях и утечки через гидроциклонные сепараторы, для определения которой выполняется отдельный гидродинамический расчет. В случае насоса НМ 10000-210 для достижения сеточной сходимости при умеренном количестве конечных элементов (5 млн.)

было выполнено дополнительное дробление (адаптация) расчетных ячеек в пристеночном слое проточной части рабочего колеса. Без выполнения указанного дробления сеточная сходимость не достигалась даже при количестве конечных элементов 9 млн.

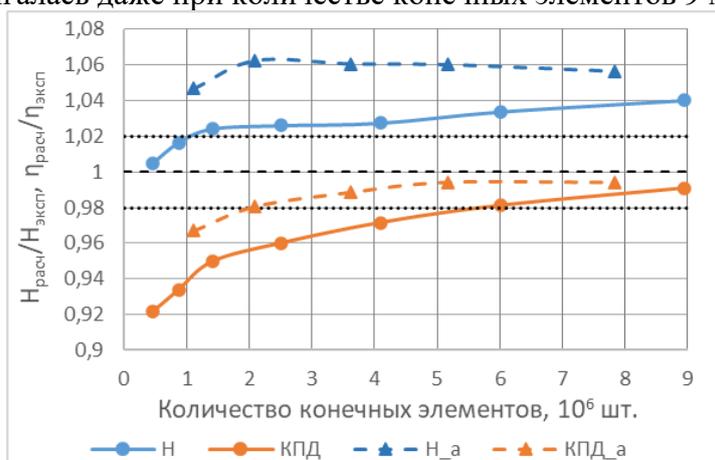


Рисунок 9 – Результаты расчета сеточной сходимости НМ 10000-210 (основные линии – без дробления сетки, пунктирные линии – с дроблением)

Выполнена оценка влияния величины шага по времени на результаты расчетов (Рисунок 10). По результатам оценки величину шага по времени рекомендуется выбирать в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ с, что соответствует повороту рабочего колеса на угол $1,8^{\circ} \dots 3,6^{\circ}$ за одну итерацию при номинальной частоте вращения ротора 3000 об/мин.

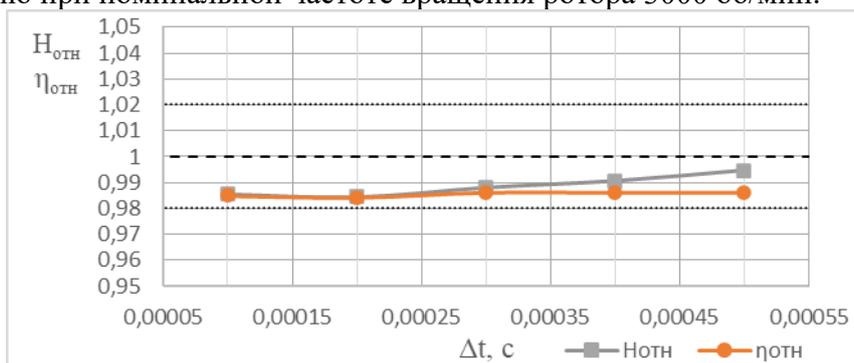


Рисунок 10 – Зависимость относительного КПД и коэффициента напора от шага по времени

Результаты сравнительных расчетов насоса НМ 1250-260-1 с выполненной модернизацией приведены на рисунке 11, а. Результаты расчетов насоса без модернизации приведены на рисунке 11, б. Пунктирными линиями на рисунке 11 обозначены расчетные характеристики, основными линиями – экспериментальные характеристики.

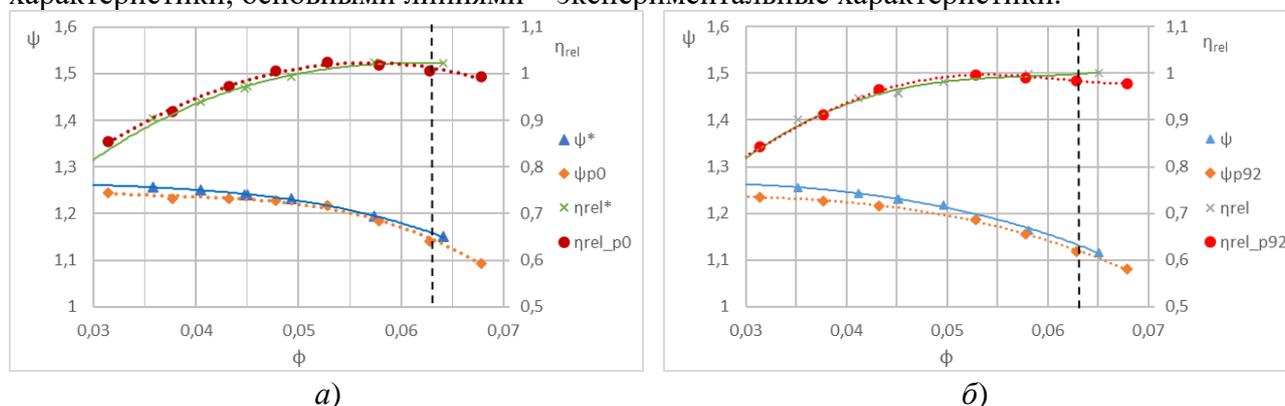


Рисунок 11 – Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик насоса НМ 1250-260-1 с покрытием (а) и без покрытия (б)

Из рисунка 11 видно, что результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонение КПД не превышает 3% во всем диапазоне подач.

Расхождение расчетных и экспериментальных величин прироста КПД $\Delta\eta$ составляет 0,1% на номинальной подаче, а в диапазоне значений ϕ от 0,04 до 0,068 $\Delta\eta$ составляет не более 0,3%, что является очень хорошим результатом.

Результаты сравнительных расчетов насоса НМ 10000-210 приведены на рисунке 12. Пунктирными линиями обозначены расчетные характеристики, основными линиями – экспериментальные характеристики.

Из рисунка 12 видно, что результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонение КПД не превышает 2% во всем диапазоне подач.

Заметное расхождение расчетных и экспериментальных характеристик напора связано с влиянием отклонений размеров проточной части РК (ширины канала на выходе, угла наклона лопастей на выходе РК).

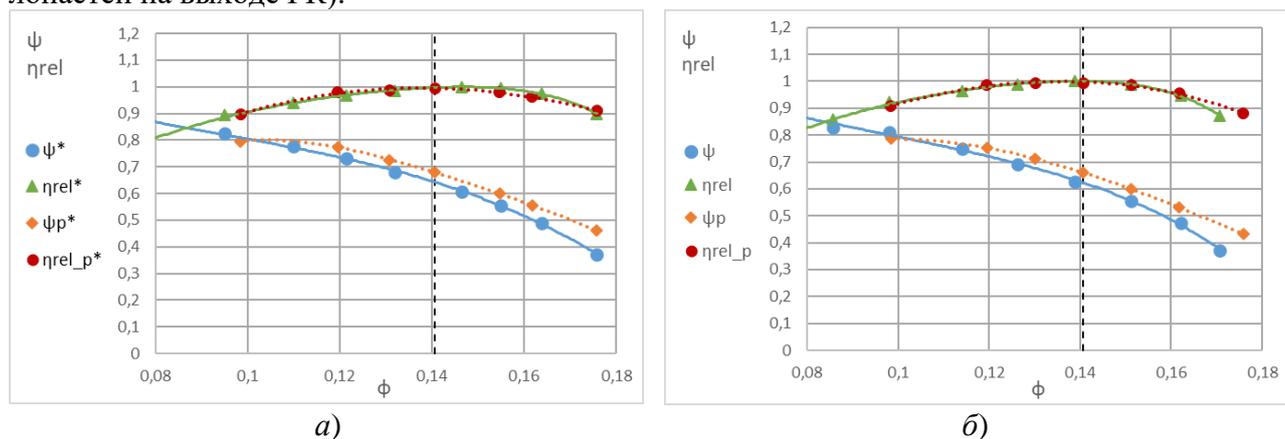


Рисунок 12 – Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик для насоса НМ 10000-210 с модернизацией (а) и без модернизации (б)

По результатам моделирования разница между расчетным и экспериментальным значением прироста КПД вследствие обработки межлопаточных каналов РК на номинальной подаче ($\phi=0,14$) составляет 0,4%, а на подачах ниже номинальной вплоть до нижней границы рабочего диапазона ($\phi=0,1$) расхождение не превышает 1%.

На подачах более $1,1Q_{ном}$ ($\phi=0,155$) отклонение расчетного значения прироста КПД от экспериментального превышает значение 1% и на правой границе рабочего диапазона насоса ($\phi=0,168$) достигает 2,8%. Однако, учитывая, что насосы типа НМ, как правило, работают небольшое количество времени на режиме максимальной подачи, сниженная точность расчетов на данном режиме не является критичной.

В главе 5 приведены результаты анализа эффективности модернизации насосов НМ на основе разработанной аналитической методики. Значения повышения КПД нефтяных магистральных насосов и снижения потребляемой мощности приведены на рисунке 13.

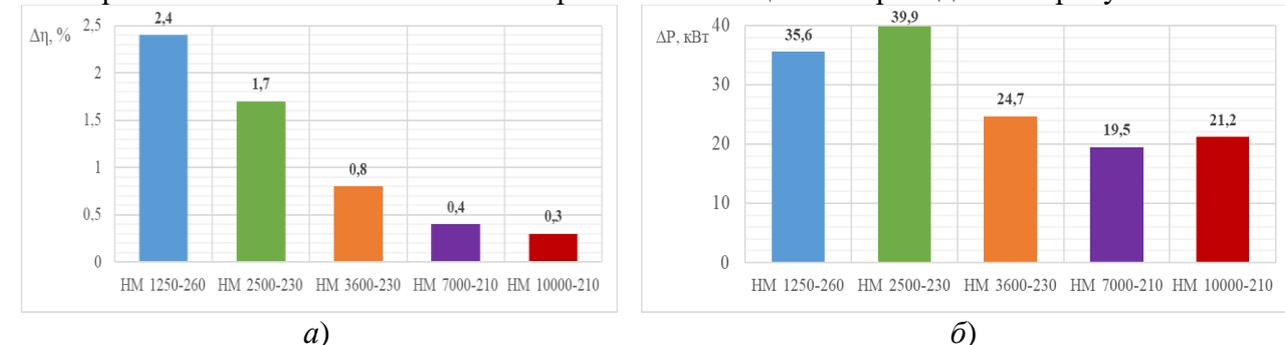


Рисунок 13 – Прирост КПД (а) и снижение потребляемой мощности (б) насосов типа НМ

Рассчитана величина среднегодовой экономии денежных средств (Рисунок 14) при условии, что стоимость электроэнергии равна 4 руб./кВт·ч, а коэффициент загрузки (относительное время работы насоса) равен 0,5.

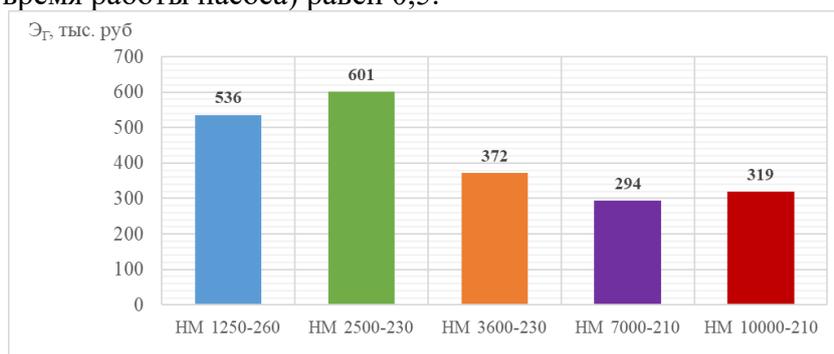


Рисунок 14 – Среднегодовая экономия денежных средств при проведении модернизации

Результаты, представленные на рисунках 13, 14 приведены для случая модернизации только спиральных каналов отвода, в связи с тем, что поверхности переводного канала спирального отвода труднодоступны для модернизации, а доступ к коническому диффузору на месте эксплуатации для проведения ремонта и восстановления модернизированной поверхности отсутствует, так как соединение патрубков насосов типа НМ с трубопроводами выполняется методом сварки.

Для обеспечения доступа ко всем поверхностям отвода предложена конструкция магистрального отвода со сменной проточной частью (рисунок 15).

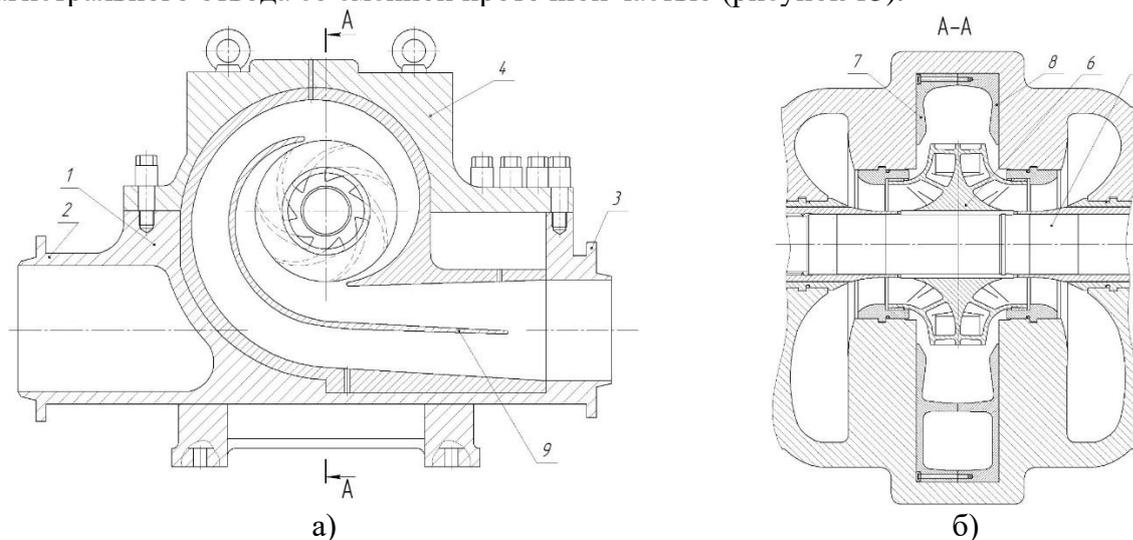


Рисунок 15 – Конструкция сменной проточной части насоса типа НМ

Спиральный отвод сменной проточной части выполнен в виде двух отдельных самостоятельных симметричных деталей.

Применение предлагаемой конструкции увеличит прирост КПД насосов типа НМ при проведении модернизации на величину от 0,25% до 3,1% в зависимости от типоразмера насоса

Дополнительными преимуществами предлагаемой конструкции являются:

- возможность установки в насос сменной проточной части с геометрией элементов, рассчитанной на подачу и напор, отличные от исходных номинальных;
- спиральные отводы могут изготавливаться из материалов, у которых механические свойства и стойкость к коррозионно-эрозионному износу выше, чем у корпусных деталей.

На предложенную конструкцию получен патент на полезную модель № 193781 U1.

Основные результаты

1. Разработана аналитическая методика оценки величины гидравлических потерь в отводящих элементах насоса двухстороннего входа (спиральный отвод однозавиткового или двухзавиткового типа, направляющий аппарат, конический диффузор). Отклонение результатов расчетов повышения КПД насосов НМ 1250-260 и НМ 10000-210 по указанной методике от результатов экспериментальных исследований составляет не более 0,33 % на номинальной подаче.

2. Разработана методика оценки эффективности модернизации поверхностей проточных частей нефтяных магистральных насосов с применением методов вычислительной гидродинамики. Отклонение результатов расчетов повышения КПД насосов НМ 1250-260 и НМ 10000 210 по указанной методике от результатов экспериментальных исследований составляет не более 0,4% на номинальной подаче.

3. Проведены экспериментальные и расчетные исследования по определению влияния модернизации поверхностей проточных частей нефтяных магистральных насосов на их гидравлические и энергетические характеристики. Исследована стойкость гладких покрытий к перекачиваемой насосами среде. По результатам исследования выявлено, что нанесение покрытий целесообразно выполнять на неподвижные поверхности отвода насоса, в то время как для межлопастных каналов рабочего колеса модернизацию целесообразно проводить путем механической обработки поверхностей.

4. Выполнено расчетно-экспериментальное определение зависимости величины эквивалентной песочной шероховатости от среднеарифметического отклонения профиля (Ra). Предложена формула $k_s=2,3 \cdot Ra$ для перевода значений среднего арифметического отклонения профиля микронеровностей (Ra) в значения эквивалентной песочной шероховатости k_s . При этом определение параметра Ra необходимо выполнять с помощью образцов шероховатости отливок, подвергнутых дробеструйной обработке. Приемлемое расхождение расчетных и экспериментальных значений КПД нефтяных магистральных насосов подтверждает правильность принятого соотношения.

5. Разработан алгоритм и компьютерная программа для оценки влияния качества поверхностей проточных частей отводов на энергоэффективность нефтяных магистральных насосов на основе разработанной аналитической методики. Программа позволяет с минимальными временными затратами определять влияние отдельных элементов отводов (спиральные каналы, переводной канал, конический диффузор) на КПД нефтяных магистральных насосов.

6. Разработана и запатентована конструкция насоса типа НМ со сменным отводом, которая позволяет обеспечить доступ ко всем поверхностям отвода для выполнения модернизации. Проведены расчеты, показывающие, что данная конструкция позволяет дополнительно увеличить прирост КПД и экономию денежных средств при эксплуатации насосов типа НМ на величину от 0,25% до 3,1% в зависимости от типоразмера.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов:

1. Акимов, С. В. Численный метод определения характеристик нефтяного магистрального насоса, модифицированного путем нанесения гладкого покрытия на элементы проточной части / С. В. Акимов // Насосы. Турбины. Системы. – 2021. – № 1(38). – С. 38-46.

2. Акимов, С. В. Расчет гидравлических потерь в спиральном отводе центробежного насоса / С. В. Акимов, П. И. Шотер // Насосы. Турбины. Системы. – 2018. – №1(26). – С. 56-65.

В изданиях, индексируемых Scopus:

1. Akimov, S. V. (2021). Experimental and Calculation Studies of Main Line Oil Pumps Efficiency Change Due to Smooth Coatings. E3S Web of Conferences, 320, 04012. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202132004012>.

В прочих изданиях:

1. Акимов, С. В. Экспериментальные и расчётные исследования изменения эффективности нефтяных магистральных насосов за счёт применения гладких покрытий / С. В. Акимов // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития : Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 02–03 июля 2020 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 317-337. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id20-362.

2. Акимов С.В. Исследование влияния коррозии рабочего колеса насоса НМ 3600-230 на его энергетические характеристики // Сборник докладов МНТК ЕСОРУМР-RUS'2021. Инновации и энергоэффективность в насосостроении: докл. Межд. науч.-техн. конф. (Москва, 28 окт. 2021 г.) / Москва, МВЦ «Крокус-Экспо» – М.: Типография ООО «Цифра 101», 2021. – С. 5-13.

3. Акимов С.В. Опыт применения гладких покрытий для снижения гидравлических потерь насосов типа НМ // Сборник докладов МНТК ЕСОРУМР-RUS'2020. Энергоэффективность и инновации в насосостроении: докл. Межд. науч.-техн. конф. (Москва, 29 окт. 2020 г.) / Москва, МВЦ «Крокус-Экспо» – М.: Типография ООО «ПринтаГрупп», 2020. – С. 5-9.

4. Акимов, С. В. Разработка методов математического моделирования и повышения энергоэффективности нефтяных магистральных насосов путем модернизации поверхности элементов проточной части / С. В. Акимов // Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе : Труды XI Международной научно-технической конференции, Воронеж, 20–24 сентября 2021 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2021. – С. 18-30.

5. Акимов, С. В. Численный метод определения характеристик нефтяного магистрального насоса, модифицированного путем нанесения гладкого покрытия на элементы проточной части / С. В. Акимов // Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе : Труды X Международной научно-технической конференции, Воронеж, 16–19 сентября 2019 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2019. – С. 28-37.

6. Акимов, С. В. Расчет гидравлических потерь в спиральном отводе центробежного насоса / С. В. Акимов, П. И. Шотер // Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе : Труды IX Международной научно-технической конференции, Воронеж, 18–22 сентября 2017 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2017. – С. 128-139.

Патенты:

1. Патент на полезную модель № 193781 U1 Российская Федерация, МПК F04D 1/00, F04D 29/44, F04D 29/02. Одноступенчатый центробежный насос двухстороннего входа : №2019109700 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 14.11.2019 / С. В. Акимов, А. А. Ковров ; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Акционерное общество "Транснефть Нефтяные Насосы" (АО "ТНН").