

На правах рукописи



Исаев Александр Анатольевич

**РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС БЕЗМАСЛЯНЫХ
ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ
ВНЕШНЕГО СЖАТИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ
ПРОФИЛЯМИ РОТОРОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Бурмистров Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: **Пронин Владимир Александрович,**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Сарманаева Альбина Фаридовна,
кандидат технических наук, заместитель главного конструктора ЦКУ-начальник отдела технологических инноваций и импортозамещения
АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»

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

Защита состоится «20» декабря 2024 г. в «11:00» часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.11 на базе ФГБОУ ВО «КНИТУ» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68 (зал заседаний Ученого совета – А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=522315>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.
Ученый секретарь
диссертационного совета

Т.Н. Мустафин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Насос вакуумный двухроторный (НВД) типа Рутс является безусловным лидером среди безмасляных средств откачки высокой производительности (до 40000 м³/ч). НВД агрегируются, как с насосами с масляным уплотнением, так и с «сухими» насосами. В последнем случае достигается создание безмасляного агрегата высокой производительности и низкого предельного остаточного давления (до 0,05 Па). Поэтому НВД являются неотъемлемой частью практически любой современной вакуумной системы. В связи с вышесказанным, НВД выпускают практически все ведущие производители вакуумного оборудования, в том числе, отечественный - АО «Вакуумаш». Однако, серийно в России выпускается лишь два небольших насоса типа Рутс производительностью 200 и 600 м³/ч. Эти насосы никак не могут покрыть потребности отечественной промышленности, поэтому в 2022 году в России начата разработка насосов типа Рутс с быстротой действия 1000 и 2500 м³/ч. Эти насосы могут быть созданы только на основе надежной математической модели, позволяющей уже на стадии проектирования прогнозировать откачные характеристики при изменении любых геометрических параметров роторного механизма. Поэтому настоящая работа направлена на углубленное изучение рабочего процесса насосов типа Рутс и разработку на этой основе математической модели и рекомендаций по повышению эффективности НВД.

Степень разработанности проблемы.

Первые работы по исследованию процесса откачки НВД принадлежат Van-Atta и Armbruster, а также В.И. Кузнецову. Теоретические и экспериментальные исследования перетеканий газа через щелевые каналы НВД проводились С.Е. Захаренко, И.А. Сакуном, И.П. Гинзбургом, В.И. Кузнецовым, Вальдесом. В 90 х годах XX столетия А.В. Бурмистровым разработан метод расчета НВД, основанный на их рассмотрении, как комбинированных объемно-скоростных средств откачки. Первые отечественные разработки двухроторных нагнетателей осуществлялись Кацем А.М., а затем исследования продолжены Ибраевым А.М., Хамидуллиным М.С. и Сайфетдиновым А.Г. Большой интерес представляют работы Gursharanjit Singh, Shuaihui Sun, Ahmed Kovacevic, Qianhui Li, Christoph Bruecker и Mario Matuzović, Sham Rane, Brijeshkumar Patel,, Zeljko Tuković. В них моделирование течения газа в машине

Рутс проводится с помощью методов CFD (Computational Fluid Dynamics). Однако серьезные ограничения возникают с точки зрения вычислительных ресурсов и применение этих методов в переходном и молекулярном режимах практически невозможно.

Цель работы: повышение эффективности рабочего процесса вакуумного насоса внешнего сжатия за счет снижения обратных перетеканий.

Задачи работы:

1. Разработка математической модели рабочего процесса НВД, работающей в переходном и вязкостном режимах течения газа, и учитывающей подвижность стенок роторов, температуры газа на входе и выходе роторного механизма.

2. Разработка трех опытных образцов НВД с различными профилями роторов: эвольвентный, эллиптический (патент №2730769), эллиптический под корпус насоса НВД-200, серийно выпускаемого АО «Вакууммаш» и их экспериментальное и расчетное исследование.

3. Разработка стенда комплексных экспериментальных исследований откачных характеристик НВД в широком диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс откачки.

4. Численный и экспериментальный анализ влияния на откачные характеристики НВД профиля и частоты вращения роторов, молекулярной массы откачиваемого газа, зазоров, быстроты действия форвакуумного насоса (ФВН).

5. Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности работы НВД и агрегатов на их основе.

Объект исследования - разработанные НВД с тремя типами роторов, а также серийно выпускаемый АО «Вакууммаш» НВД-200.

Предмет исследования – откачные характеристики и проводимости каналов насосов типа Рутс с тремя профилями роторов.

Научная новизна работы.

Получены экспериментальные и расчетные характеристики НВД с тремя различными типами роторов. Разработана математическая модель рабочего процесса НВД, работающая в диапазоне давлений от 10 до 10^5 Па и позволяющая повысить скорость и точность расчета. Получены выражения для определения температуры роторов и корпуса в зависимости от давления на входе и частоты вращения роторов. Установлено, что пульсации газа на выходе и неравномерность давления в отсеченном объеме в условиях разреже-

ния практически не влияют на быстроту действия НВД.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная математическая модель НВД с учетом перемещения стенок позволяет рассчитать откачные характеристики уже на стадии проектирования насосов без предварительных экспериментальных испытаний опытных образцов. Выработаны практические рекомендации по повышению эффективности работы НВД. Запатентован эллиптический профиль ротора насоса типа Рутс, обеспечивающий за счет снижения перетеканий через межроторный канал, увеличение степеней повышения давления и быстроты действия.

Реализация работы.

1. Математическая модель насосов НВД, учитывающая подвижность стенок щелевых каналов роторного механизма внедрена в процесс разработки новых НВД на АО «Вакууммаш» (г. Казань), серийный выпуск которых запланирован в 2025г.

2. Математическая модель насосов НВД, учитывающая подвижность стенок щелевых каналов роторного механизма внедрена в процесс разработки и оптимизации компрессоров объемного действия и климатического оборудования на ООО «ТРАКС» (г. Москва).

3. Разработанный стенд для комплексных экспериментальных исследований откачных характеристик и проводимости каналов НВД используется для проведения лабораторных занятий, выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование» на кафедре «Вакуумной техники электрофизических установок» КНИТУ, стенд для измерения температурных полей используется для получения температурных зависимостей роторов, корпуса и газа новых НВД на АО «Вакууммаш».

Методология и методы исследования. Использовались методы математического и физического моделирования. Для создания базы экспериментальных данных и оценки адекватности модели использовались насосы с тремя типами профилей роторов, а для получения их экспериментальных характеристик методики испытаний по ГОСТ. Валидация осуществлялась по трем параметрам откачной характеристики. Моделирование рабочего процесса выполнялось камерным методом, в том числе, в апробированных пакетах прикладных программ.

Основные положения, выносимые на защиту

- комплекс стендов и база экспериментальных данных по от-
качным характеристикам и проводимостям НВД с тремя типами
роторов при различных частотах вращения в трех режимах течения;
- разработанная математическая модель НВД, учитывающая
подвижность стенок каналов роторного механизма, и работающая в
диапазоне давлений от 10^2 до 10^5 Па;
- зависимости температуры роторов от температуры корпуса;
- рекомендации по повышению эффективности работы НВД.

Достоверность полученных результатов. Обеспечивается за
счет использования методик ГОСТ 32974.2-2023 и
ГОСТ 32974.3-2023; использования поверенных средств измерений
утвержденного типа; выполнения оценки погрешности измерений;
применения уравнений, в основе которых лежат фундаментальные
законы сохранения, использования апробированных пакетов для
расчета течения газа, хорошего согласия расчетных и эксперимен-
тальных результатов.

Апробация работы. Основные положения работы докладыва-
лись и обсуждались на Российской студенческой научно-
технической конференции Вакуумная техника и технология г. Ка-
зань (2019, 2023), международной научно-технической конферен-
ции «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва
(2019), международной научно-технической конференции «Техника
и технология нефтехимического и нефтегазового производства», г.
Омск (2020, 2022, 2024), Всероссийской научно-технической кон-
ференции «Вакуумная техника и технология» г. Санкт Петербург
(2020), научно-технической конференции «Вакуумная наука и тех-
ника», г. Москва (2020), международной научно-технической кон-
ференции «Инновационные машиностроительные технологии, обо-
рудование и материалы», г. Казань (2022).

Личный вклад. Разработка математической модели НВД, ве-
рификация и валидация математической модели, разработка рото-
ров с тремя профилями и модернизация серийно выпускаемого
НВД-200 под установку новых роторов, подготовка научных пуб-
ликаций, выступление на конференциях, разработка и сборка испы-
тательного стенда, получение экспериментальных и расчетных от-
качных характеристик, обсуждение полученных результатов.

Публикации. По теме исследования опубликовано 26 работ, в
том числе 8 в журналах ВАК и 7 в журналах, входящих в Scopus, 1

учебное пособие, 1 патент, остальные в материалах конференций различного уровня.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списков сокращений и условных обозначений, литературы, приложений. Объем работы составляет 163 страницы машинописного текста, включая 10 таблиц и 81 рисунок. Список литературы включает 103 наименования.

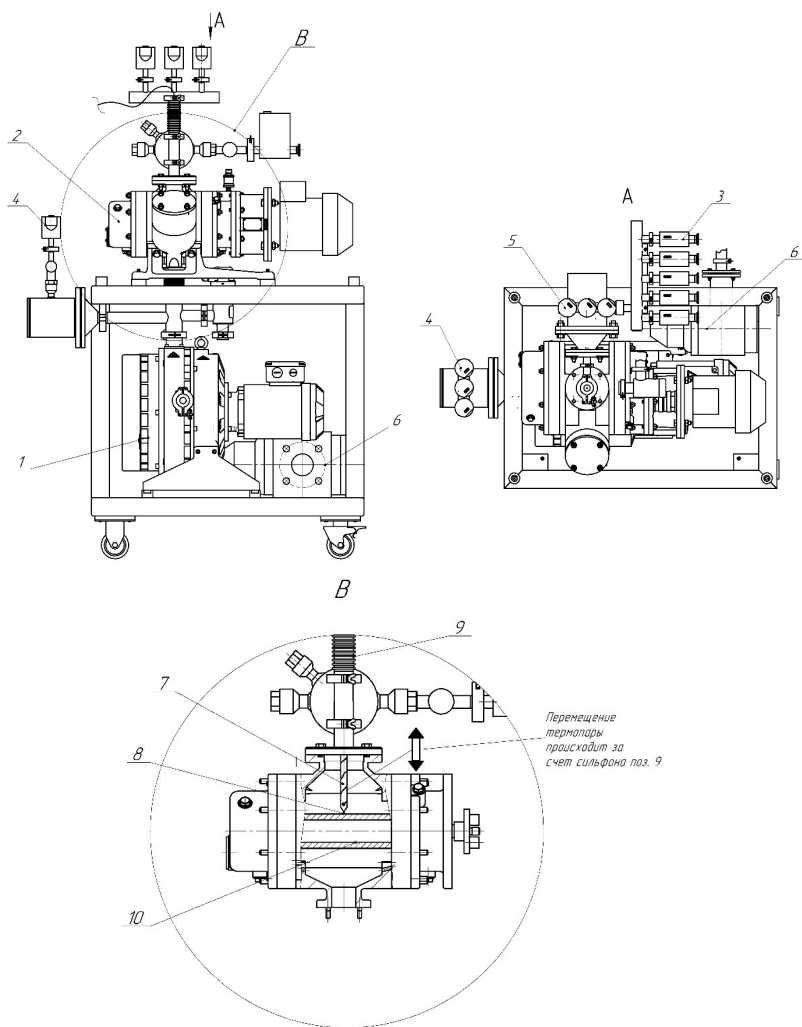
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы исследования, степень разработанности проблемы, цель и задачи работы, представлены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, реализация в промышленности, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, апробация и личный вклад в работу, структура и объем работы.

В первой главе обсуждаются основные схемы рабочих механизмов, общие и индивидуальные конструктивные решения. Представлена классификация по пяти основным конструктивным признакам и выявлены основные достоинства и недостатки. Рассмотрены удельные характеристики НВД, а также методики расчета, в том числе CFD анализа.

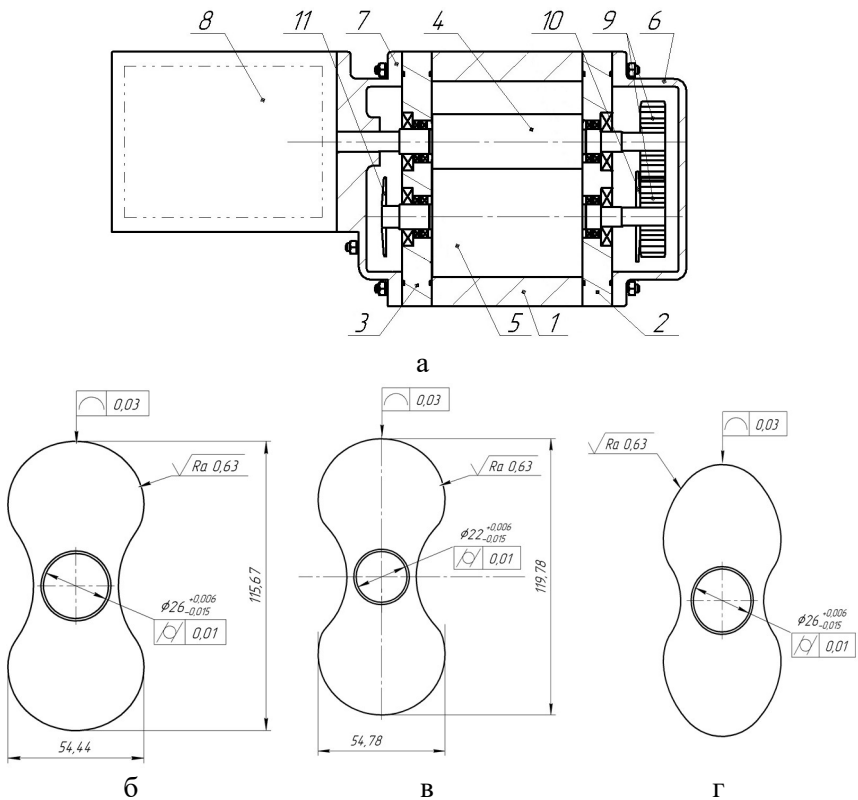
Вторая глава посвящена разработке стенда и экспериментальному исследованию четырех НВД с различными профилями роторов в широком диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс откачки (рис. 1). Для валидации математической модели, с последующей оценкой эффективности каждого из профилей роторов, были разработаны (рис.2): НВД с эллиптическим профилем ротора при соотношениях $b/a \approx 0.85$ и $r/a \approx 0.64$ (патент № 2730769); НВД с эллиптическим профилем ротора при соотношениях $b/a = 0,892$ и $r/a = 0,705$; НВД с эвольвентным профилем ротора.

Общая схема НВД представлена на рис. 2. В ходе экспериментов получено более 200 зависимостей, из них более 100 диаграмм проводимости роторного механизма, более 70 зависимостей быстроты действия и более 30 диаграмм для максимального отношения давлений. Проведена оценка погрешности эксперимента. Максимальная погрешность измерения быстроты действия составила 10%.



1 – форвакуумный насос НВСП-35; 2 – объект исследования НВД;
 3 - тепловые расходомеры; 4, 5 – мембранно-емкостные вакуум-
 метры; 6 - счетчик газа ротационный; 7 - текстолитовый стержень;
 8 - термопара; 9 - сильфон; 10 - ротор

Рис. 1 – Схема стенда для экспериментального исследования НВД



1 – корпус; 2, 3 – опорные крышки;
 4, 5 – ведущий и ведомый ротора; 6, 7 – картера; 8 –
 электродвигатель; 9 – синхронизирующие шестерни; 10, 11 –
 маслоразбрызгивающие диски; б – эллиптический профиль ротора
 патент № 2730769 с параметрами $b/a=0,85$ и $r/a=0,64$
 в – эллиптический профиль ротора с параметрами $b/a=0,892$ и
 $r/a=0,705$; г – эвольвентный профиль ротора

Рис. 2 – Схема НВД с тремя типами профилей роторов

В третьей главе разрабатывается математическая модель НВД, учитывающая подвижность стенок каналов и тепловые изменения зазоров роторного механизма. Приводятся основные допущения, также представлены результаты CFD моделирования рабочего процесса НВД в пакете Ansys Fluent, которые использованы для верификации разработанной математической модели. Математическая модель также прошла валидацию путем сравнения с собственными

и литературными экспериментальными данными.

Блок-схема математической модели, реализованная в виде программ в пакете Mathematica, представлена на рис. 3.

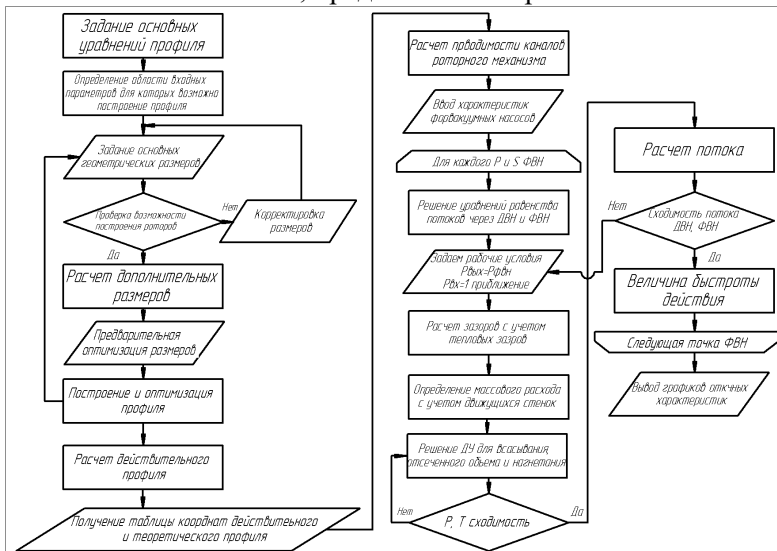


Рис. 3 – Блок-схема математической модели рабочего процесса НВД

В математической модели приняты допущения, которые надежно подтверждены при теоретических и экспериментальных исследованиях роторных насосов и компрессоров: рабочее тело рассматривается как однородная среда, в которой отсутствуют конденсирующиеся пары; откачиваемый газ рассматривается как идеальный газ; не учитываются газодинамические потери на трение газа о стенки рабочей полости; параметры газа перед всасывающим и за нагнетательным патрубками постоянны; в пределах каждого контрольного объема параметры газа одинаковы и изменяются мгновенно. Модель основана на решении уравнений состояния и сохранения энергии в дифференциальной форме, которые получены в работах Мамонтова М. А. Для моделирования процесса откачки рабочая полость НВД условно разделяется на 4 объема (рис. 4), при этом процессы, происходящие в отсечённых объемах (3, 4), идентичны, но смещены на 90 градусов.

Для каждого объема записывается своя система уравнений, например, для объема 3 (рис. 4а)

$$\frac{dP_3}{d\alpha} = \frac{k-1}{\omega V_3} \left(\omega \frac{dQ_{T3}}{d\alpha} + G_{1 \rightarrow 3} h_1 + G_{2 \rightarrow 3} h_2 - (G_{3 \rightarrow 1} + G_{2 \rightarrow 1}) h_3 - \frac{k}{k-1} \omega P \frac{dV_3}{d\alpha} \right),$$

$$\frac{dT_3}{d\alpha} = \frac{(k-1)T_3}{\omega P_3 V_3} \left(\omega \frac{dQ_{T3}}{d\alpha} + \frac{k-1}{k} (G_{1 \rightarrow 3} + G_{2 \rightarrow 3} - G_{3 \rightarrow 1} - G_{2 \rightarrow 1}) \cdot h_3 + \right. \\ \left. + G_{1 \rightarrow 3} (h_1 - h_3) + G_{2 \rightarrow 3} (h_2 - h_3) - \omega P_3 \frac{dV_3}{d\alpha} \right),$$

где Q_T - внешнее подведённое тепло; G - секундный приход и уход газа; h - энтальпия притекающего и утекающего газа; k – показатель адиабаты; P – давление; T – температура; V – объём; ω – угловая скорость ротора; α – угол поворота ротора. индексы 1, 2, 3 – номера полостей, стрелка – направление течения газа

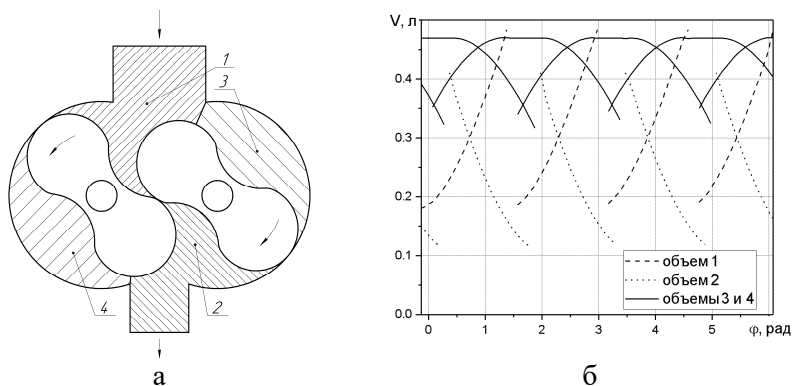


Рис. 4 –Контрольные объёмы и их зависимость от угла поворота ротора

Для расчета проводимостей щелевых каналов в вязкостном, переходном и молекулярном режимах течения газа использован универсальный метод расчета, представленный в работах С.И. Саликева, А.А. Райкова, А.В. Бурмистрова и работающий в вязкостном, переходном и молекулярном режимах течения газа. При расчетах учитываются скорости стенок каналов. С помощью CFD моделирования получены значения коэффициентов сопротивления входного и выходного трактов, которые аппроксимированы уравнениями и используются в матмодели НВД.

Проведена валидация математической модели по трем параметрам: проводимость роторного механизма НВД; быстрота действия агрегата НВД+ФВН; максимальное отношение давлений НВД в

безрасходном режиме. Сравнение проводилось для трех газов: воздух, аргон и гелий, как по экспериментальным данным, полученным в данной работе (рис.5), так и по экспериментам других источников (рис.6).

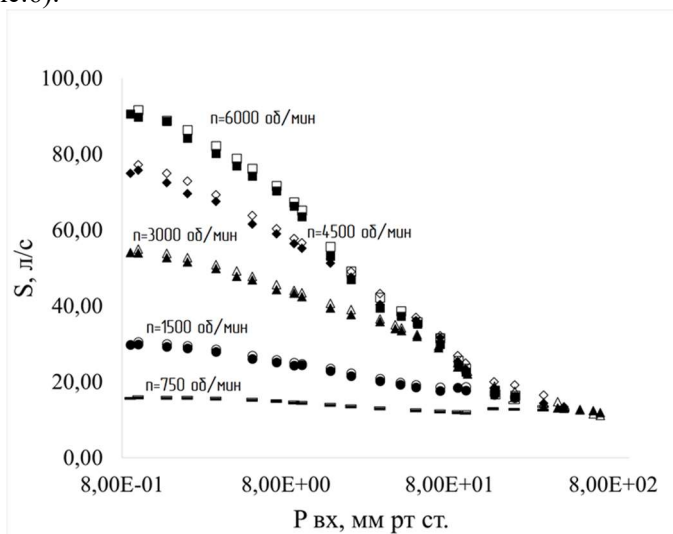


Рис. 5. Зависимость быстроты действия НВД с эвольвентным профилем ротора с форвакуумным насосом с быстротой действия $S_f=10$ л/с: закрашенные маркеры – эксперимент, незакрашенные – расчет

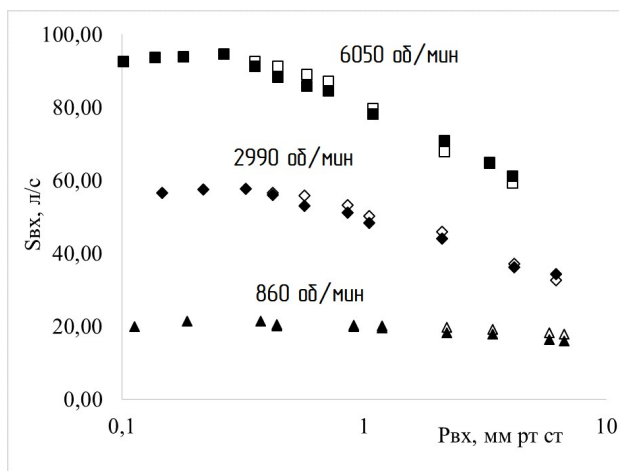


Рис. 6. Быстрота действия НВД-200 в агрегате с ФВН с быстро-

той действия $S_f=5\text{л/с}$ для гелия: закрашенные маркеры – эксперимент Бурмистрова А.В., незакрашенные – расчет

Кроме того, проведена валидация математической модели по отношению давлений для всех испытанных насосов. Отклонение значений, рассчитанных по математической модели, от эксперимента во всех случаях не превышает 11%.

В четвертой главе с помощью матмодели проведен анализ влияния профиля роторов на откачные характеристики НВД. Расчеты проведены при одинаковых зазорах, что позволяет объективно сравнить эффективность профиля. С точки зрения геометрической быстроты действия все профили практически равнозначны, а вот перетекания через щелевые каналы роторного механизма минимальны для эллиптического профиля роторов. Его усредненная по углу поворота роторов проводимость меньше эвольвентного на 9% и меньше проводимости НВД-200 на 19%.

Сравнение степени повышения давления (рис.7) показывает, что НВД с эллиптическим профилем превосходит все остальные насосы. Причем при 100 Па насос с эллиптическим профилем выигрывает по скорости действия у насоса с эвольвентным – 4,7 %, а у НВД-200 – почти 15%.

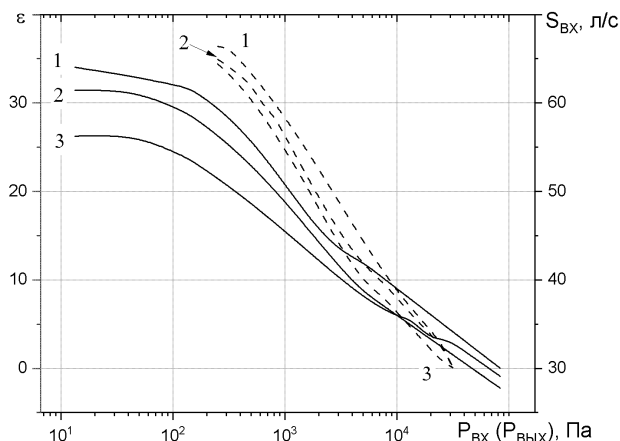


Рис.7. Зависимость быстроты действия (сплошная) от входного давления и степени повышения давления (пунктир) от давления на выходе для эллиптического (1), эвольвентного (2), НВД-200 АО «Вакууммаш» (3) профилей роторов

Зависимости коэффициента подачи на рис. 8 для трех профилей роторов показывают, что наибольшим коэффициентом подачи об-

лаждает насос с эллиптическим профилем ротора по патенту (№ 2730769). По сравнению с эвольвентным профилем он выше на 7%, а по сравнению с НВД-200 АО «Вакууммаш» - выше на 20%.

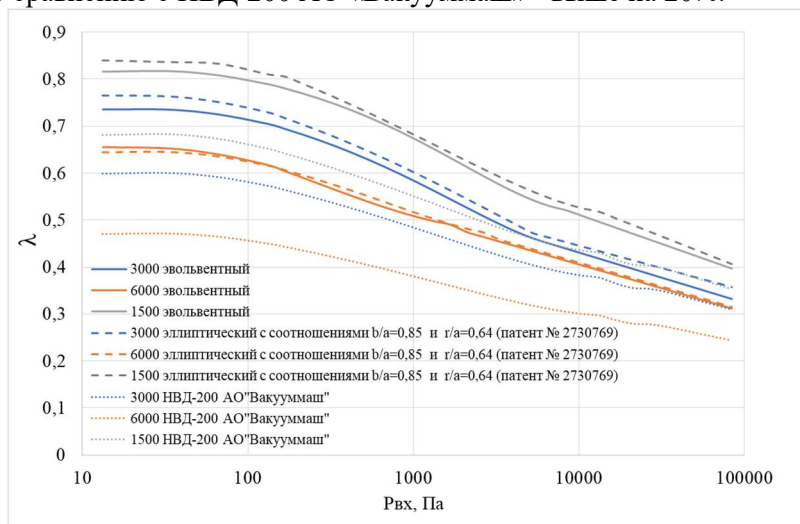


Рис. 8. Коэффициент подачи НВД с роторами эвольвентного, эллиптического и серийного АО «Вакууммаш» профиля

Таким образом, НВД с роторами, имеющими эллиптический профиль с соотношениями $b/a=0,85$ и $r/a=0,64$, обеспечивает наилучшую эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны и изготовлены три опытных образца НВД с различными профилями роторов: эвольвентный, эллиптический (согласно патента №2730769), эллиптический под серийный корпус насоса НВД-200, серийно выпускаемый АО «Вакууммаш».

2. Создан стенд для проведения опытно-экспериментальных работ по исследованию откачных характеристик НВД и получены следующие зависимости: быстроты действия от давления на входе с максимальной погрешностью измерения $\pm 10 \%$; степени повышения давления с максимальной погрешностью измерения $\pm 7 \%$. Проведено термометрирование роторов, корпуса и газа на входе и выходе. Аппроксимацией экспериментальных данных получены зависимости температуры роторов от температуры корпуса, температуры корпуса, температуры газа на выходе, которые используются для

уточнения матмодели.

3. Разработана математическая модель насосов НВД, работающая в переходном и вязкостном режимах течения газа, и учитывающая подвижность стенок роторов, температуры газа на входе, выходе и в щелевых каналах роторного механизма, которая позволяет рассчитать откачные параметры НВД и агрегатов с погрешностью не выше 11%.

4. Проверена и подтверждена возможность использования методики расчета перетеканий газа в каналах с движущимися стенками применительно к НВД.

5. Проведен анализ влияния на откачные характеристики насоса типа Рутс профиля ротора, молекулярной массы откачиваемого газа, зазоров, частоты вращения, быстроты действия ФВН

6. Математическая модель рабочего процесса НВД внедрена в процесс разработки и оптимизации двухроторных машин на АО «Вакууммаш» (г. Казань). Также математическая модель насоса НВД внедрена в процесс разработки и оптимизации компрессоров объемного действия на ООО «ТРАКС» (г. Москва).

7. Стенд комплексных экспериментальных исследований НВД используется на кафедре «Вакуумной техники электрофизических установок» при проведении лабораторных занятий, выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ по направлениям 15.03.02 и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Основные работы по теме диссертации

1. Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

Бурмистров, А. В. Разработка нового типоразмерного ряда ДВН типа Рутс / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, Е.Н. Капустин, А.А. Исаев // Наноиндустрия. - Наноиндустрия. Спецвыпуск (2s, том 13). – 2020. – С. 54-61.

Исаев А.А. Метод расчета откачных характеристик ДВН типа Рутс, работающих при повышенных давлениях (вязкостный режим течения газа в зазорах) / А.А. Исаев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев // Наноиндустрия. – 2021. – Т.14. № S6. С. 330-337.

Исаев А.А. Проводимость каналов роторного механизма двухроторного вакуумного насоса типа Рутс при молекулярном режиме течения газа / А.А.Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И.

Саликеев // Наноиндустрия – 2022. – Т.15. № 1(111). С. 58-63.

Исаев, А.А. Исследование перетеканий в двухроторном вакуумном насосе типа Рутс с эллиптическим профилем роторов при молекулярном режиме течения газа / А.А.Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И.Саликеев // Известия Вузов. Машиностроение. – 2023. – № 4(757). С. 38-45.

Исаев, А. А. Анализ температуры рабочих элементов двухроторного вакуумного насоса / А. А. Исаев // Компрессорная техника и пневматика. – 2023. – № 2. – С. 24-27. – EDN MXUABL.

Исаев, А.А. Потери во входном тракте двухроторного вакуумного насоса / А.А. Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, // Вестник машиностроения. – 2021, - № 9. - С. 44-46.

Математическое моделирование рабочего процесса двухроторного вакуумного насоса Рутса / А. А. Исаев, А. А. Райков, А. В. Бурмистров, С. И. Саликеев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2024. – № 1(148). – С. 55-68. – EDN FBFXCC.

Повышение эффективности рабочего процесса двухроторного вакуумного насоса внешнего сжатия за счёт снижения обратных перетеканий в роторном механизме / А. А. Исаев, А. А. Райков, А. В. Бурмистров, Е. Н. Капустин // Компрессорная техника и пневматика. – 2024. – № 1. – С. 11-14. – EDN TMKYCQ.

2. Основные публикации в других изданиях:

Исаев, А.А. Разработка метода расчета вакуумных насосов типа Рутс, основанного на энергетическом балансе термодинамической системы тела переменной массы / А.А. Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, Е.Н. Капустин, С.Ю. Голоднов // Материалы тезисов 10й международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омск.: ОмГТУ. 2020. – С.111 – 112.

Isaev A. Development of calculation method based on energy balance of thermodynamic system of variable mass body for roots pumps / A. Isaev, A. Raykov, A. Burmistrov [et al.] // AIP Conference Proceedings, Omsk, 26–29 февраля 2020 года. – Omsk, 2020. – P. 030042. – DOI 10.1063/5.0027208. – EDN KVZDWO.

Бурмистров, А. В. Повышение эффективности рабочего процесса бесконтактных вакуумных насосов / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, А.А. Исаев, С.И. Саликеев // Труды 27й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием

«Вакуумная техника и технология». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. – С. 11-15.

Исаев А.А. Метод расчета откачных характеристик ДВН типа Рутс, работающих при повышенных давлениях (вязкостный режим течения газа в зазорах) / А.А. Исаев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев // Материалы XXVII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». М.: НОБЕЛЛА. - 2020. – С. 58-62.

Burmistrov, A. Effectiveness enhancement of non-contact vacuum pumps working process A. Burmistrov, A. Raykov, A. Isaev, S. Salikeev / Journal of Physics: Conference Series 27th International Conference on Vacuum Technique and Technology Journal of Physics: Conference Series 1799 (2021) 012003 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1799/1/012003

Патент № 2730769 Российская федерация, МПК F04C 25/02 (2020.02); F04C 18/126 (2020.02). Двухроторная машина: №2020107745: заявл. 19.02.2020: опубл. 25.08.2020 / Исаев А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Райков А.А., Бронштейн М.Д., Капустин Е.Н.; заявитель и патентообладатель АО «Вакууммаш» Бюл. № 24 – 10 с. : ил. - Текст: непосредственный.

Raykov A. Working process of Roots vacuum pumps. Development and verification of CFD model / A. Raykov A. Burmistrov, S. Salikeev, A. Isaev // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2021. - Vol. 33. - Is. 3. – P. 29-33.

Исаев, А.А. Сопротивление выходного тракта двухроторного вакуумного насоса / Исаев А.А., А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Материалы тезисов 11й международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омск: ОмГТУ. 2021. – С.68 – 69.

Исаев А.А. Проводимость каналов роторного механизма двухроторного вакуумного насоса типа Рутс при молекулярном режиме течения газа / А.А.Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Материалы XXVIII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». М.: НОБЕЛЛА. - 2021. – С. 61-65.

Isaev A. A., Losses in the Input Channel of a Two-Rotor Vacuum Pump / A. A. Isaev, A. A. Raikov, A. V. Burmistrov, S. I. Salikeev ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2021, Vol. 41, No. 12, pp. 1161–1164. © Allerton Press, Inc., 2021

Isaev A. Resistance of roots pump exhaust duct / A. Isaev, A.

Raykov, A. Burmistrov, S. Salikeev, E. Kapustin // AIP Conference Proceedings 2412, 030039 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0075000>

Исаев, А.А. Разработка и исследование двухроторного вакуумного насоса с эвольвентным профилем роторов / А.А. Исаев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, Е.Н. Капустин // Материалы тезисов 12й международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омск: ОмГТУ. 2022. – С.74 – 75.

Исаев А.А. Анализ потерь в процессе всасывания вакуумного насоса внешнего сжатия / А.А.Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И.Саликеев // Материалы XI Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022», Казань. – С. 57 - 60.

Исаев А.А. Термометрирование двухроторного вакуумного насоса / А.А. Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Вестник РВО, выпуск 2, 2023. – С. 1-7.

Isaev A. Development and study of roots vacuum pump with involute rotors profile/ A. Burmistrov; A. Raykov; S. Salikeev; E. Kapustin // AIP Conference Proceedings 2784, 030008 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0141846>

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF ROOTS VACUUM PUMP WORKING PROCESS: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHODS MODELING Salikeev S., Burmistrov A., Raykov A., Isaev A., Kapustin E., Fomina M. Vakuum in Forschung und Praxis. 2022. Т. 34. № 3. С. 32-37.

Исаев, А.А. Влияние профиля роторов на характеристики двухроторной машины внешнего сжатия / А.А. Исаев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Материалы тезисов 14й международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омск.: ОмГТУ. 2024. – С.84 – 85.

Двухроторные вакуумные насосы с внешним сжатием: учебное пособие / А. В. Бурмистров, А. А. Райков, С. И Саликеев, А.А. Исаев; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2019. – 80 с.ISBN 978-5-7882