

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и
цифровому развитию

МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.э.н., профессор

Дроговоз Павел Анатольевич

« 20 »

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва на диссертационную работу Исаева Александра Анатольевича «Рабочий процесс безмасляных вакуумных насосов внешнего сжатия с различными профилями роторов», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.10 Гидравлические машины, вакуумная и компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Актуальность темы диссертации

Насос вакуумный двухроторный (НВД) типа Рутс является безусловным лидером среди безмасляных средств откачки высокой производительности. НВД агрегатируются, 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. Поэтому НВД являются неотъемлемой частью практически любой современной вакуумной системы. 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 России начата разработка насосов типа Рутс с быстротой действия 1000 и 2500 м³/ч. Эти насосы могут быть созданы только

промышленности, поэтому 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.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения и 4-х глав, заключения, списка литературы и 4-х приложений. В работе автором рассмотрены, исследования и получены новые знания в части влияния различных факторов на откачные характеристики НВД: влияние скорости вращения роторов, влияние профиля ротора, влияние зазоров роторного механизма, влияние молекулярной массы откачиваемого газа, которые во многом определяют надежность работы НВД.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, даны сведения о степени 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 **главе 1** представлены 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.

В главе 2 представлен стенд и экспериментальные исследования четырех НВД с различными профилями роторов в широком диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс откачки. Валидация математической модели, оценка эффективности каждого из профилей роторов, Общая схема НВД представлена на рис. 2.

В главе 3 представлена математическая модель НВД, учитывающая подвижность стенок каналов, тепловые изенения 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.

В главе 4 с представлен анализ влияния профиля роторов на откачные характеристики НВД. Расчеты проведены при одинаковых зазорах, что позволяет объективно сравнить эффективность профиля.

В заклучении на основе полученных результатов исследований формулируются выводы по диссертационной работе.

Научная новизна полученных результатов

1. Разработана математическая модель НВД, учитывающая перемещение стенок, которая позволяет рассчитать откачные характеристики уже на стадии проектирования насосов без предварительных экспериментальных испытаний опытных образцов, работающая в диапазоне давлений от 10 до 10^5 Па. Получены экспериментальные и расчетные характеристики НВД с тремя различными типами роторов.

2. Получены выражения для определения температуры роторов и корпуса в зависимости от давления на входе и частоты вращения роторов.

3. Установлено, что пульсации газа на выходе и неравномерность давления в отсеченном объеме в условиях разрежения практически не влияют на быстроту действия НВД

4. Выработаны рекомендации по повышению эффективности работы НВД за счет снижения обратных перетеканий.

5. Запатентован эллиптический профиль ротора насоса типа Рутс, обеспечивающий за счет снижения перетеканий через межроторный канал, увеличение степени повышения давления и быстроты действия.

Практическая значимость результатов исследования

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, используется в процессе 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».

4. Представлены практические рекомендации по назначению величин зазоров в роторном механизме НВД.

Основные замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертации имеются незначительное количество опечаток и пунктуационных ошибок.

2. На стр. 9 указано, что математическая модель работает в диапазоне давлений от 10^2 до 10^5 , а на стр. 7 - от 10 до 10^5 .

3. Стр. 48, 53 ГОСТ 32974.1-2016 – отменен

4. В презентации, на докладе 11.11.2024 не отражены доверительные интервалы измеряемых величин.
5. В презентации на докладе 11.11.2024 не отражены начальные и граничные условия расчета по математической модели.
6. В презентации на докладе 11.11.2024 говорится о сопоставлении расчетных данных, полученных в Ansys CFX, с расчетными данными по математической модели, приводится процент расхождения, но не демонстрируется по каким параметрам происходит сопоставление.
7. В презентации на докладе 11.11.2024 не обоснована применимость метода угловых коэффициентов для расчета перетеканий.
8. В презентации на докладе 11.11.2024 не представлено обоснование математической модели с использованием метода угловых коэффициентов.

Личный вклад автора

Разработка математической модели НВД, верификация и валидация математической модели, разработка роторов с тремя профилями и модернизация серийно выпускаемого НВД-200 под установку новых роторов, подготовка научных публикаций, выступление на конференциях, разработка и сборка испытательного стенда, получение экспериментальных и расчетных откачных характеристик, обсуждение полученных результатов.

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 экспериментальных результатов.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на Российской студенческой научно-технической конференции Вакуумная техника и технология г. Казань (2019, 2023), международной научно-технической конференции «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 конференции «Вакуумная техника и технология» г. Санкт Петербург (2020), научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», г. Москва (2020), международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы», г. Казань (2022).

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.

Соответствие содержания диссертации автореферату и указанной специальности

Диссертационная работа Исаева А. А. «Рабочий процесс безмасляных вакуумных насосов внешнего сжатия с различными профилями роторов» соответствует специальности 2.5.10 Гидравлические машины, вакуумная и компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы: п. 1. Математическое моделирование и оптимизация гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе; п. 2. Методы расчетов гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе, а также комплектующего эти системы оборудования; п. 4 Исследование

физических взаимосвязей между рабочими процессами, конструкторско-технологическими факторами и техническими характеристиками гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе, а также оборудования этих систем.

Соответствие диссертации требованиям

Представленная диссертационная работа является актуальной, обладает научной новизной и является законченной научно-квалификационной работой, в которой впервые изложены новые, научно-обоснованные технические решения, имеющие практическую значимость.

Представленные в работе результаты являются достоверными, что подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных исследований. Методики, алгоритмы и компьютерные программы на их основе, разработанные автором успешно применяются в практике проектирования НВД на ряде предприятий.

Материал диссертации изложен последовательно и логично, сопровождается достаточным количеством иллюстраций и ссылками на литературные источники, приведены выводы после каждой главы.

Материалы диссертации достаточно полно отражены, в многочисленных публикациях, в том числе, в научно-технических изданиях, включенных в перечень ВАК и базу цитирования Scopus, прошли достаточную апробацию на отечественных и международных конференциях, доступны широкому кругу специалистов в области вакуумной техники.

Автореферат отражает основное содержание, научную новизну и практическую значимость диссертации, а также личный вклад соискателя.

Диссертационная работа Исаева Александра Анатольевича «Рабочий процесс безмасляных вакуумных насосов внешнего сжатия с различными профилями роторов», соответствует требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением

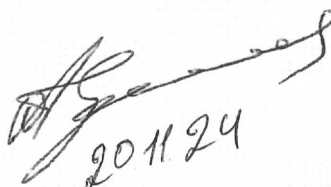
Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.10 Гидравлические машины, вакуумная и компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Тема работы соответствует п.1, 2, 4 паспорта специальности 2.5.10 Гидравлические машины, вакуумная и компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Диссертация «Рабочий процесс безмасляных вакуумных насосов внешнего сжатия с различными профилями роторов» Исаева Александра Анатольевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.10 Гидравлические машины, вакуумная и компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Диссертация доложена и обсуждена на заседании кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (протокол № 8 от «11» ноября 2024 г.)

Заведующий кафедрой «Вакуумная
и компрессорная техника»,
МГТУ им Н.Э. Баумана
д.т.н., профессор



201124

Чернышев
Андрей
Владимирович

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический
университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)»

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с.1

www.bmstu.ru

тел.: +7(499)263 63 91

e-mail: bauman@bmstu.ru

Вход. № 05-8263
« 03 » 12 2024 г.
подпись 