На правах рукописи

РОДИОНОВ Юрий Викторович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АПК

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Мичуринск-Наукоград РФ
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» на кафедре «Теория машин, механизмов и детали машин»

Научный консультант — доктор технических наук, профессор, академик РАСХН
Завражнов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты
Рудобашта Станислав Павлович
доктор технических наук, профессор, Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина / кафедра «Теплотехника и энергообеспечение предприятий», заведующий
Капустин Василий Петрович
доктор технических наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет / кафедра «Автомобильная и аграрная техника», профессор
Латышенок Михаил Борисович
доктор технических наук, профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева / кафедра «Безопасность жизнедеятельности» заведующий

Ведущая организация – Рязанский научно-исследовательский институт сельского хозяйства Россельхозакадемии

Защита диссертации состоится «29 » марта 2013 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, зал заседаний диссертационных советов

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « » 2012 г и размещен на сайтах www.vak.ed.gov.ru и www.mgau.ru

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук доцент — В.Ю. Ланцев.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Реальная необходимость удовлетворения растущей физиологической потребности населения в продуктах питания, в том числе молоке, овощах, фруктах и ягодах высокого качества, получаемых в агропромышленном комплексе, объективно ставит задачу увеличения их производства.

Среди них особую роль имеют высушенные с использованием вакуумных насосов плоды, потребность в которых значительно возрастает в связи с расширением сферы их использования, включая потребности северных областей страны и питание космонавтов.

Важное значение при этом приобретает эффективное использование потенциальных возможностей жидкостнокольцевых вакуумных насосов (**ЖВН**) в технологиях сушки растительного сырья, хранения готовой продукции и доения коров.

На основании многолетних отечественных и зарубежных исследований и опыта использования вакуум-насосов в технологических процессах сушки, хранения готовой продукции и доения коров установлено, что в реальных условиях получают продукцию недостаточного качества и низкой конкурентоспособности. Применение традиционных ЖВН при сушке и хранении приводит к получению продукции при больших затратах энергии и длительности процесса, при доении коров из-за нестабильности вакуума – к заболеваниям животных маститом, снижению надоев молока.

Изложенное позволяет констатировать, что разработка новых и совершенствование существующих методик расчета и создание на их базе ЖВН для технологических процессов сушки растительных материалов, хранения готовой продукции и доения коров, обеспечивающих теоретическое и практическое повышение эффективности указанных процессов, остается актуальной проблемой, решение которой внесет значительный вклад в развитие агропромышленного комплекса страны.

Работа выполнена в рамках гранта, предоставленного Фондом содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере, программы СТАРТ-09 по государственным контрактам № 6844 от 23.03.2009 «Сушка и хранение растительного сырья с использованием вакуумной техники», №9920р/9352 от 11.01.2012 г. «Разработка технологии хранения и сушки для растительных продуктов с последующим исследованием путей интенсификации процесса»; «Теоретико-экспериментальные исследования влияния поверхностных явлений на сорбционные и проницаемые коэффициенты пористых тел» на 2009 – 2011 гг. (государственный контракт № 02.740.11.0272 от 07.07.2009); при поддержке федеральных целевых программ «Повышение научного

потенциала высшей школы» и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по государственным контрактам № 14.740.11.1028 от 23 мая 2011 г., № 16.740.11.0659 от 02 июня 2011 г., № 16.740.11.0525 от 16 мая 2011 г.

Цель исследований. Повышение производительности (быстроты действия), давления разряжения, КПД, снижение расхода жидкости и энергозатрат ЖВН при использовании их в технологических процессах сушки плодоовощного сырья, хранении готовой растительной продукции и доении коров.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи исследования:

- разработать методику расчета действительной быстроты действия и эффективной мощности двухступенчатого жидкостно-пластинчатого вакуумного насоса (**ЖПВН**) и усовершенствовать методику расчета этих показателей для различных типов ЖВН, методику расчета проектирования эвольвентного профиля кинематического замыкания на долговечность по критериям износа и отсутствия заедания.

- исследовать влияние расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости, давления разряжения, частоты вращения рабочего колеса и физических свойств рабочей жидкости на форму внутренней поверхности жидкостного кольца и эксплуатационные характеристики и определить распределение скорости жидкости в рабочей полости одноступенчатого ЖВН;

- разработать программу оптимизации конструктивных параметров (наименьшие зазоры между рабочими колесами и корпусами, радиусы рабочих колес, углы наклона лопаток рабочих колес, ширины корпусов, эксцентриситет) из условия минимума удельной мощности одноступенчатых и двухступенчатых ЖВН;

- разработать экспериментальную установку для определения утечек газовой фазы в шарнирах двухступенчатых ЖПВН и стенды для испытаний ЖВН средней и малой быстроты действия всех предложенных конструкций;

- разработать и обосновать конструктивные параметры двухступенчатых КВИ сушилок растительных материалов, вакуумных контейнеров для хранения пищевых продуктов и минидоильной установки на базе одноступенчатого ЖВН с регулируемым нагнетательным окном;

- провести проверку в производственных условиях предложенных конструкций насосов в технологических процессах сушки растительных материалов, хранении пищевых продуктов и минидоильной установки и выявить показатели их эффективности, и целесообразности использования (внедрения, применения);

- разработать математические модели движения жидкости в новых и усовершенствованных ЖВН, учитывающие их конструктивные осо-

бенности и наличие газовой фазы и обосновать параметры различных ЖВН для использования в технологических процессах сушки овощного сырья, хранении готовой продукции и доении коров.

Объект исследования. Технологические процессы создания вакуума при сушке растительного сырья, доении коров и хранении сельскохозяйственной продукции и средства, их обеспечивающие.

Предмет исследования. Закономерности движения жидкости и газа в ЖВН различных конструкций, влияние режимов вакуумирования на процессы сушки, хранения и доения.

Методика исследования. В теоретических исследованиях использовались законы гидродинамики, теплотехники и аэродинамики. При экспериментальных исследованиях использовались общеизвестные методики, ГОСТы и ОСТы, методика планирования эксперимента, а также разработанные на их основе частные методики. При этом использовались современные приборы и оборудование, а также новые разработанные экспериментальные установки.

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием современных компьютерных математических программ.

Научная новизна. Обоснованы конструктивно технологические схемы различных конструкций ЖВН, характеризующихся высокими удельной производительностью, надежностью, давлением разряжения, коэффициентом полезного действия и сниженными энергозатратами. Техническая новизна подтверждена 10 патентами РФ.

Новые адекватные физические и математические модели течения среды с учетом термодинамики газовой фазы в рабочей полости, динамики внешних процессов и конструктивных особенностей насосов для гидродинамических процессов, протекающих в безлопаточном и лопаточном пространствах ЖВН.

На основании разработанных моделей движения несжимаемой жидкости в зависимости от значения предельного остаточного давления и термодинамики внешних процессов предложены: методики расчета конструкций новых и модернизаций существующих ЖВН; критерии и симплексы подобия оценки влияния режимных и конструктивных параметров на закономерности квазистационарных процессов в ЖВН; классификация ЖВН с учетом конструктивных, кинематических, геометрических, технологических признаков, интеллектуализации работы конструкции и процесса в целом; усовершенствованная методика проведения экспериментальных исследований определения кинематических и динамических параметров турбулентного движения жидкости в центробежном силовом поле с использованием разработанного нового стенда.

Теоретическую и практическую значимость работы составляют: методики расчета конструктивно-режимных параметров насосов

для технологических процессов сушки плодоовощного сырья, хранения готовой растительной продукции и доения коров.

Полученные результаты могут иметь большую значимость для проектно-конструкторских организаций (разработанные конструкции машин и оборудование, отдельные элементы, методика обоснования конструкций и их классификация), государственных и частных предприятий, отраслевых министерств, организаций планирования (при разработке концепций, прогнозов, планов, методических рекомендаций, программ обоснования стратегий, различных нормативных документов по обеспечению продовольственной безопасности страны), в ВУЗах (при чтении лекций, проведения лабораторных работ и практических занятий).

На защиту выносятся следующие основные научные результаты:

- обоснование конструктивных параметров и режимов различных ЖВН для использования в технологических процессах при сушке плодоовощного сырья, хранении готовой растительной продукции и доении коров;

- математические модели движения жидкости в новых и усовершенствованных ЖВН, учитывающие их конструктивные особенности и наличие газовой фазы;

- зависимости влияния расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости, давления разряжения, частоты вращения рабочего колеса и физических свойств рабочей жидкости на форму внутренней поверхности жидкостного кольца и эксплуатационные характеристики с учетом закономерностей распределения скорости жидкости в рабочей полости ЖВН;

- новая методика расчета действительной быстроты действия и эффективной мощности двухступенчатого ЖПВН и усовершенствованные методики расчета этих показателей для различных типов ЖВН, методика расчета проектирования эвольвентного профиля кинематического замыкания на долговечность по критерию отсутствия заедания;

- программы для ЭВМ оптимизации конструктивных параметров одноступенчатых и двухступенчатых ЖВН по удельной мощности;

- новые экспериментальные установки для определения утечек газовой фазы в шарнирах двухступенчатых ЖПВН, скорости потока жидкости, быстроты действия, эффективной мощности, расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости, формы жидкостного кольца, давления разряжения, и нагнетания газовой фазы и стенды для испытаний ЖВН средней и малой быстроты действия всех предложенных конструкций;

- результаты проверки в производственных условиях предложенных конструкций насосов в технологических процессах плодоовощного

сырья, хранении готовых растительных продуктов, доении коров и показатели их эффективности.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований, предложенные методики расчета и разработанные на их основе конструкции ЖВН изготовляются на ОАО "Мичуринский завод "Прогресс", ОАО «Тамбовполимермаш». На базе разработанных ЖВН в ООО «Навакс» спроектирована и изготовлена двухступенчатая конвективная вакуум-импульсная сушка растительного сырья. Она внедрена в производство на НПО «Здоровье и питание», ИП Долгова. Методики расчета ЖВН используется в учебном процессе при курсовом проектировании, в учебной и научно-исследовательской работе при подготовке магистров направления высшего профессионального образования 150400 «Технологические машины и оборудование». Жидкостнокольцевые вакуумнасосы применены в проектах ГНУ ВНИИТиН для минидоильных установок на 10 голов и установок для ферм на 200 голов. Вакуумные контейнеры прошли испытание на кафедре «Технологии хранении и переработки растительной продукции» ФГБОУ ВПО МичГАУ в учебном процессе для бакалавров, магистров и аспирантов.

Достоверность полученных результатов исследования. Достоверность научных положений подтверждается результатами экспериментальных исследований и их согласованием с теоретическими данными, использованием действующих и новых разработанных методик, современной измерительной аппаратуры, и разработанных новых экспериментальных стендов, обработкой экспериментальных данных с помощью компьютерных и математических программ. Выступлениями с результатами исследований на различного уровня научно-практических конференциях, их одобрением, и публикацией материалов, внедрением разработок в производство.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований доложены, обсуждены и одобрены на Международной научно-технической интернет конференции «Технология - 2002» (Орел, 2002); Международной конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2003); Международной практической конференции «Прогрессивные технологии и развития» (Тамбов, 2004); Международной научно-практической конференции «Глобальный научный потенциал» (Тамбов, 2005); III-й Международной научной Интернет конференции (Орел, 2005); 3-й Международной научно-практической конференции «Качество науки, качество жизни» (Тамбов, 2006); Международной научно-практической конференции «Составляющие научно-технического прогресса» (Тамбов, 2006); 2-й Международной научно-практической конференции «Достижения ученых XXI века» (Тамбов, 2006); 2-й международной научно-практической конференции «Глобальный научный потенциал» (Тамбов,

2006); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы технологии производства, хранения, переработки и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции» (Мичуринск – наукоград РФ, 2007); 3-й Международной научно-практической конференции «Достижения ученых XXI века» (Тамбов, 2007); 3-й международной научно-практической конференции «Глобальный научный потенциал» (Тамбов, 2007); научно-практической конференции «Перспективы селекции яблони и других культур для промышленных насаждений» (Мичуринск – наукоград РФ, 2007); 4-й Международной научно-практической конференции «Качество науки, качество жизни» (Тамбов, 2008); 5-й Международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и развития» (Тамбов, 2009); Международной практической конференции «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов» (Воронеж, 2010); Международной научно-практической конференции «Достижения науки и инновации в производстве, хранении и переработки сельскохозяйственной продукции» (Мичуринск – наукоград РФ, 2011); Международной научной конференции «Динамика современной науки» (Болгария, 2012); IV, V, VI, VIII, VIIII, X, XI, XII научных конференциях ТГТУ (Тамбов, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 93 научных трудах, в т.ч. 19 статьях рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, 10 патентах РФ на изобретения и свидетельством о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации составляет 434 страницы основного текста, содержит 165 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 296 наименований, из них 15 на иностранных языках и 23 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность работы и дана ее общая характеристика.

В первой главе «Постановка проблемы. Цель и задачи исследований» приведен анализ конструкций ЖВН, технологических процессов сушки плодоовощного сырья, хранения готовой растительной продукции и доения коров.

Разработке и совершенствованию ЖВН посвящены работы И.А. Райзмана, В.Д. Лубенца, И.В. Автономова, В.И. Кучеренко, Э.Е. Апанасенко, Ю.М. Вертепова, В.П. Галича и др.

Значительный вклад в изучение процесса сушки растительных материалов внесли П.А. Ребиндер, С.М. Липатов, Ю.Л. Кавказов, А.В.

Лыков, С.П. Рудобашта и др. Особенно большой научный и практический интерес представляют комбинированные способы сушки с чередованием инфракрасной и конвективной или высокочастотной и конвективной ступенями, предложенные Б.А. Посновым и Н.А. Першановым. Огромный вклад в развитие вакуум-импульсного способа сушки сделал академик Я.К. Абрамов, на основе исследований которого созданы специальные сушильные установки. Но при разработке различных способов сушки растительных материалов мало уделялось внимания сохранению качества конечного продукта, что явилось основанием для совершенствования ступеней и стадий сушки.

Большой научный вклад в исследования процесса хранения внесли ученые В.А. Гудковский, Ю.Г. Скрипников, А.С. Ильинский и др.

Проведен теоретический анализ процесса доения и использования в нем вакуумных насосов по работам А.И. Завражнова, И.З. Аширова, А.Н. Матвеева и др.

В результате анализа литературных источников автором предложена классификация ЖВН, позволяющая выделить основные направления в их совершенствовании для использования в технологических процессах сушки плодоовощного сырья, хранения готовой растительной продукции и доения коров.

Особый интерес представляют новые конструкции ЖВН различного диапазона предельного остаточного давления, со сниженными показателями энергозатрат, регламентацией дополнительно подаваемой рабочей жидкости, автоматическим управлением и контролем процесса вакуумирования.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе «Теоретические исследования рабочих процессов жидкостнокольцевых вакуумных насосов» представлены результаты: теоретического исследования движения жидкости в рабочей полости ЖВН, определения действительной быстроты действия и эффективной мощности.

По способу вращения жидкости в рабочей полости ЖВН могут быть подразделены на три типа:

- жидкость вращается под действием рабочего колеса. При этом корпус насоса может быть неподвижным (ЖВН с неподвижным корпусом) или, в рабочем пространстве корпуса размещается свободно вращающаяся втулка;

- жидкость вращается под действием корпуса насоса. При этом рабочее колесо, размещенное на неподвижном валу, свободно вращается (ЖВН с кинематическим замыканием);

- жидкость в ЖПВН вращается под действием корпуса и рабочего колеса, привод которых осуществляется от одного приводного вала.

Движение жидкости в ЖВН – процесс, осуществляющийся в замкнутом объеме (рабочей полости) и включающий два тела в различных агрегатных состояниях (жидкость и газ), что определяет сложность его изучения.

Процесс движения жидкости в ЖВН происходит с большими скоростями. Число Рейнольдса в рабочем пространстве ЖВН различных размеров равно $2\cdot10^4$–$3\cdot10^5$, с учетом этого движение жидкости следует рассматривать турбулентным.

Для математического описания движения жидкости в ЖВН с неподвижным корпусом используем уравнения Навье-Стокса и неразрывности, записанных в декартовой системе координат.

Моделируя движение жидкости в рабочей полости одноступенчатого ЖВН, принимаем за основу следующие допущения:

1. жидкость – вязкая и несжимаемая ρ = const.

2. движение жидкости двухмерное и установившееся.

3. массовые силы и силы поверхностного натяжения малы по сравнению с вязкостным сопротивлением и силами инерции, поэтому ими можно пренебречь.

Используя основные допущения, получаем систему уравнений, описывающих движение жидкости в рабочей полости ЖВН:

$$\left.\begin{aligned} u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}&=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu_т\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right);\\ u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}&=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu_т\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right);\\ \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}&=0. \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где x y – координаты частицы жидкости; $u(xy)$ $v(xy)$ – составляющие эпюры осредненной скорости $U(xy)$; ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

В системе уравнений (1) турбулентная вязкость $\nu_т$, в отличие от молекулярной вязкости, не является физической постоянной жидкости, так как зависит от скорости жидкости и других параметров, характеризующих степень турбулентности потока. Значение турбулентной вязкости часто превышает молекулярную вязкость на несколько порядков.

Для решения системы уравнений (1) сформулируем граничные условия для ЖВН с неподвижным корпусом.

В точках соприкосновения вязкой жидкости с неподвижным корпусом (граница $Д_1$, рисунок 1), скорость жидкости равна нулю.

$$u = 0,\ v = 0 \text{ при } r = R. \qquad (2)$$

В точках примыкания вязкой жидкости к подвижным лопаткам рабочего колеса (граница $Д_2$), скорость жидкости по величине и направлению совпадает со скоростью соответствующей точки стенки. С учетом этого граничные условия примут вид:

$$u = -\omega\sqrt{x^2 + y^2}\,\sin(\tan(y/x)),$$
$$v = -\omega\sqrt{x^2 + y^2}\,\cos(\tan(y/x)) \quad \text{при} \quad r = r_2 \qquad (3)$$

Давление на границе Д3 будет равно давлению газовой фазы $p_г$, которое принимает свое значение в зависимости от угла поворота рабочего колеса. В соответствии с этим граничные условия примут вид

$p_г = p$ при $\varphi = \varphi_{вс} = \varphi_{м.з}$; (4)

$p_г = p\tau'^m - \Delta p$, где τ'^m - степень повышения давления. при $\varphi = \varphi_{сж}$; (5)

$p_г = p_а + kp_{сж}$ при $\varphi = \varphi_н$. (6)

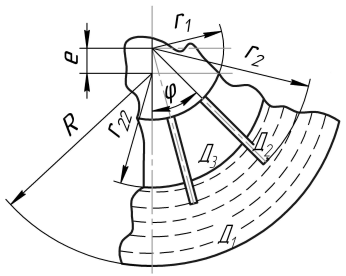


Рисунок 1 – Принципиальная схема ЖВН с неподвижным корпусом.

Скорость движения жидкости на границе Д3 совпадает по величине и направлению со скоростью соответствующей точки границы Д3:

$$u = -\omega\sqrt{x^2 + y^2}\,\sin(\tan(y/x)),$$
$$v = -\omega\sqrt{x^2 + y^2}\,\cos(\tan(y/x)) \qquad (7)$$

при $r = r_{22}$.

Чтобы смоделировать движение жидкости в рабочей полости ЖВН с кинематическим замыканием, принимаем за основу допущения (1-3) и систему уравнений 1.

Для решения задачи о движении жидкости необходимо к этим уравнениям сформулировать граничные условия (рисунок 2).

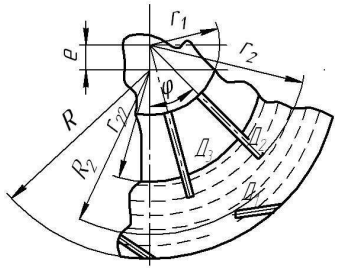


Рисунок 2 – Схема определения граничных условий в ЖВН-КЗ.

Граничные условия в ЖВН КЗ задаем на границе $Д_i$ области течения жидкости и газовой фазы в рабочей полости. В нашей задаче граница $Д_i$, в зависимости от угла поворота рабочего колеса делится на три части (рисунок 2): подвижная граница $Д_1$ и $Д_2$ (корпус с лопатками вакуум-насоса и лопатки рабочего колеса); $Д_3$ – свободная граница в ячейках рабочего колеса (поверхность раздела жидкости и газовой фазы).

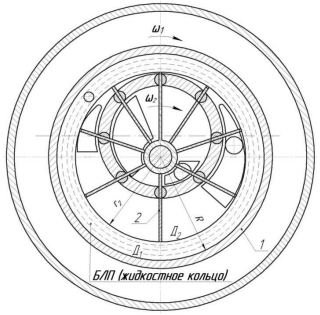


Рисунок 3 – Схема определения граничных условий в ЖПВН.

В зависимости от угла поворота рабочего колеса условия для давления газовой фазы на границе $Д_3$ определяются по формулам 4,5,6. Скорость жидкости на границе $Д_3$ определяется по формуле 7.

Особенность ЖПВН заключается в том, что весь поток жидкости движется между вращающимся корпусом 1 и лопатками рабочего колеса 2, то есть в безлопаточном пространстве (БЛП) (рисунок 3). Внутренняя граница корпуса $Д_1$ подвижна и вращается с постоянной угловой скоростью равной скорости вращения корпуса 1. Свободная граница жидкостного кольца $Д_2$ вращается со скоростью равной скорости вращения лопаток рабочего колеса 2. Для описания движения вязкой несжимаемой жидкости в рабочей полости ЖПВН будем пользоваться системой уравнений 1.

Граничные условия для внутренней поверхности корпуса свободной поверхности жидкостного кольца определяются по формуле 7 ($Д_1$ при $r = R$; $Д_2$ при $r = r_2$).

Система уравнений (1) решалась методом конечных элементов (МКЭ), для реализации которого использовался программный продукт фирмы PDE Solutions Inc. FlexPDE, предназначенный для построения сценарных моделей решения дифференциальных уравнений и их систем.

В качестве объекта исследования использовалась часть рабочего пространства одноступенчатого ЖВН, заполненная рабочей жидкостью, ограниченная корпусом радиуса R и внутренней поверхностью жидкостного кольца радиусом r_{22}.

Геометрические размеры модели соответствовали экспериментальному образцу ЖВН 0,5(30)Р с регулируемым нагнетательным окном, разработанному на кафедре «Теория машин, механизмов и детали машин» ГОУ ВПО ТГТУ: r_1 = 20,0 мм; r_2 = 45,0 мм; R = 54,0 мм; e = 7,0 мм; z = 10; $\beta = 0^0$; δ = 2,0 мм. В качестве модельных жидкостей использовались вода, растворы воды и глицерина, моторное масло М-6з/12Г1.

Моделирование проводилось во всем диапазоне изменения давления разряжения (или давлением всасывания, которое определяется как $p = p_a - p_p$) с угловой скоростью рабочего колеса – 298,3 рад/с. Моделирование внутренней степени сжатия осуществлялось изменением размера проходного сечения нагнетательного окна.

Данные математического моделирования позволили определить профиль скорости материала в жидкостном кольце. Интегрируя полученный профиль скорости жидкости и относя его к единице площади рассматриваемого радиального сечения вычислялась средняя скорость жидкости $v_{ср\varphi}$, что позволило определить массовый расход жидкости в любом сечении жидкостного кольца, мощность, затрачиваемую на перемещение жидкостного кольца и уточнить методику расчета эффективной мощности одноступенчатого ЖВН.

На рисунках 4–5 представлены некоторые результаты расчета гидродинамических параметров жидкостного кольца.

Результаты математического моделирования позволили сделать вывод, что скорость жидкости в нижнем сечении II–II фактически меньше скорости концов лопаток рабочего колеса.

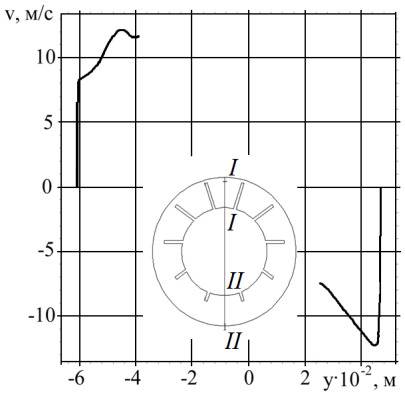


Рисунок 4 – Профиль радиальной скорости движения жидкости в сечениях I–I, II–II.

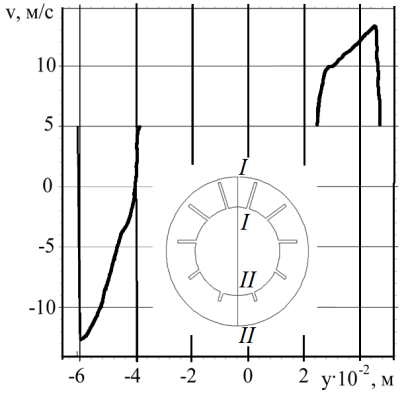


Рисунок 5 – Профиль окружной скорости движения жидкости в сечениях I–I, II–II.

Потери скорости жидкости, зависящие от вязкостного трения и вихреобразования, учитываются скоростным коэффициентом $k_{v\varphi}$, полученным в данной работе.

При разработке новых конструкций ЖВН использовалась теория подобия. ЖВН являются подобными, если они обладают геометрическим подобием и имеют одинаковые модифицированные числа Эйлера и Рейнольдса в виде

$$Eu_m = A\mathrm{Re}_0^{m_0} L^{n_0}, \qquad (8)$$

При проектировании ЖВН необходимо определять значения быстроты действия и эффективной мощности.

Действительная быстрота действия зависит от теоретической и всегда меньше ее на значение потерь, зависящих от ряда факторов и учитываемых коэффициентом подачи $\lambda_П$.

Геометрическая быстрота действия определяется как цилиндр с радиусом $r_{22\varphi}$ в каждой ячейки рабочей полости.

Коэффициент подачи для одноступенчатого ЖВН с неподвижным корпусом рассматривается в следующем виде

$$\lambda_п = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3. \qquad (9)$$

Коэффициент λ_1 учитывает потери быстроты действия, обусловленные переносом газовой фазы со стороны нагнетания на сторону всасывания через «мертвую зону» (пространство между втулкой рабочего колеса и внутренней поверхностью жидкостного кольца в сечении I-I вакуум-насоса) (рисунок 6). λ_1 зависит от размеров и положения нагнетательного окна, области подачи и расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости и определяется по формуле:

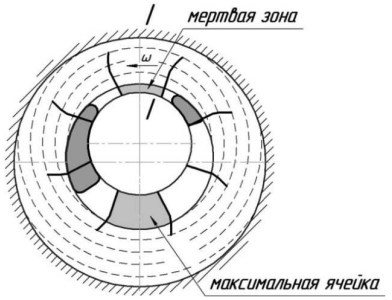


Рисунок 6 – Схема расположения «мертвой зоны» и максимальной ячейки.

$$\lambda_1 = \frac{V_{м.з.} \cdot z}{\pi \cdot \left(r_{22}^2 - r_1^2\right) \cdot b \cdot \psi}, \qquad (10)$$

где $V_{м.з.}$- объем «мертвой зоны».

Коэффициент λ_2 характеризует потери быстроты действия вследствие перетечек газовой фазы в соседние ячейки через торцевые зазоры. Количество газовой фазы, перетекающей по торцевым зазорам в соседние ячейки, определяется по методике, приведенной в работе И.А. Сакуна.

Коэффициент λ_3 учитывает потери быстроты действия за счет испарения, для его нахождения необходимо использовать методику предложенную И.А. Райзманом.

$$\lambda_3 = \frac{V_{исп.} \cdot z}{\pi \cdot \left(r_{22}^2 - r_1^2\right) \cdot b \cdot \psi}, \qquad (11)$$

где $V_{исп}$ – объем испарившейся жидкости.

Используя уравнение неразрывности жидкого потока в любом радиальном сечении жидкостного кольца находим радиус внутренней поверхности жидкостного кольца по углу поворота рабочего колеса

$$r_{22\varphi} = r_2 \cdot \sqrt{\frac{(r_1 + d)^2}{r_2^2} - \frac{2 \cdot k_{v\varphi} \cdot \delta \cdot \zeta}{\psi} + \frac{2 \cdot k_{v\varphi} \cdot (2e + \Delta) \cdot \zeta}{r_2 \cdot \psi}} - e \cdot (1 + \cos(\varphi)), \qquad (12)$$

где $k_{v\varphi} = v_{II\,ср} / u_2$ - скоростной коэффициент в верхнем сечении; $v_{II\,ср}$ - средняя скорость рабочей жидкости в безлопаточном пространстве в верхнем сечении; u_2 – окружная скорость на периферии рабочего колеса; d – зазор между ступицей и жидкостным кольцом в верхнем сечении ζ - коэффициент, учитывающий торцевой зазор; $\delta = \Delta / r_2$ - относительный зазор.

Действительная быстрота действия двухступенчатого ЖВН модульного типа с одновременным включением ступеней определяется

$$S_o = S_{T1} \cdot k_\lambda \cdot \lambda_{П1}^2. \qquad (13)$$

Таким образом, для расчета геометрических размеров второй ступени следует правильно разбить двухступенчатый вакуум-насос по степеням повышения давления ступеней. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали, что в общем случае для выбора давления первой ступени в двухступенчатом вакуум-насосе подтверждаются ранее принятые рекомендации. Однако, как показали проведенные исследования, на стадии проектирования следует как можно больше сузить диапазон выбора степени сжатия τ_1 первой ступени. Для двухступенчатых вакуум-насосов средней быстроты действия предлагается выбирать τ_1 в интервале 2,5…3.

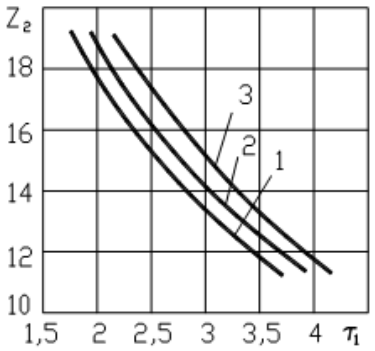
Для проектирования второй ступени предложено использовать зависимость числа лопаток второй ступени от первой, так как для двухступенчатого ЖВН окружная скорость на периферии рабочего колеса второй ступени должна быть больше, чем на первой. При одинаковых диаметрах и выбранной ширине каждого рабочего колеса этого можно достигнуть выбором разного числа лопаток рабочих колес первой и второй ступеней.

Оптимальное число лопаток зависит от потери напора H_L за счет циркуляции жидкости в канале.

Используя уравнение Эйлера из условия

$$\frac{dH_L}{dZ} = 0, \qquad (14)$$

получено выражение для определения оптимального числа лопаток. Учитывая расход жидкости первой и второй ступеней, получена зависимость k_Z числа лопаток второй ступени от числа лопаток первой, которая следует из полученных зависимостей числа лопаток первой и второй ступеней от расхода жидкости и быстроты действия первой ступени. Так, для опытного образца насоса $q_{ДПРЖ}$=0,72 м^3/ч; τ_1=2,5; k_Z=1,224, z_1=12, z_2=15. По решению уравнения 14 построены зависимости, представленные на рисунке 7.



1 – $q_{ДПРЖ}$ = 0,72 м^3/ч; 2 - $q_{ДПРЖ}$ = 0,9 м^3/ч; 3 - $q_{ДПРЖ}$ = 1,8 м^3/ч.

Рисунок 7 – Зависимость оптимального числа лопаток второй ступени от степени сжатия в первой ступени при расходе воды $q_{ДПРЖ}$.

Имея параметры первой ступени z_1 и τ_1, вводим понятие приведенной быстроты действия второй ступени

$$S_{b2} = S_{b1} / \tau_1, \qquad (15)$$

посредством которого выражаем ширину рабочего колеса второй ступени

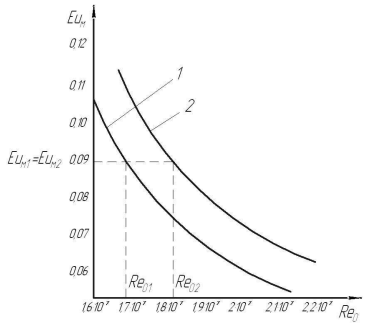
$$b_2 = \frac{S_{b2}}{\pi \cdot r_2^2 \cdot \psi_2}, \qquad (16)$$

где $\psi_2 = \frac{\pi \cdot \left(r_2^2 - r_1^2\right) - s \cdot l \cdot z_1 \cdot k_z}{\pi \cdot \left(r_2^2 - r_1^2\right)}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение геометрического объема второй ступени за счет толщины лопаток.

При известных геометрических параметрах второй ступени коэффициент подачи будет определятся по формуле

$$\lambda_{П2} = k_\lambda \cdot \lambda_{П1}, \qquad (17)$$

где $k_\lambda = \frac{1}{\sqrt{\tau_1}} \cdot \frac{\psi_2}{\psi_1}$ - коэффициент пропорциональности.



1 – первая ступень; 2 – вторая ступень

Рисунок 8 – Зависимость между критериями подобия.

Быстрота действия двухступенчатого ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней определяется по формулам:

при $p_1 < p_{вкл}$ $S_\partial = S_{\partial 1} = S_{T1} \cdot \lambda_{П1}$, (18)

при $p_1 > p_{вкл}$ $S_{\partial_1} = S_{\partial 1} \cdot \lambda_{П2}$, (19)

где $p_{вкл} = p_1^* = \frac{101{,}3}{\tau_1^m \cdot 0{,}8}$.

Установлено, что жидкостные кольца в первой и второй ступенях идентичны при условии

$$Eu_{m1} = Eu_{m2} \qquad (20)$$

Так, для двухступенчатого ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней, быстротой действия 30 м^3/ч, предельно достигаемым вакуумом 5 кПа и конструктивными параметрами

$\chi_1 = \frac{b_1}{r_2} = 2$; $\chi_2 = \frac{\chi_1}{\tau_1} = 0{,}8$; $\varepsilon = \frac{e}{r_2} = 0{,}15$; τ_1=2,5; ω_1=298,3 с$^{-1}$ установлена эмпирическая зависимость между числами подобия в первой и второй ступенях при условии соблюдения идентичности жидкостных колец (рисунок 8).

Из условия 20 получаем соотношения угловых скоростей вращения рабочих колес ступеней для конкретных режимов:

$$\frac{\omega_{21}}{\omega_{22}} = k \qquad (21).$$

При проектировании одноступенчатого ЖВН с кинематическим замыканием необходимо также определить значение действительной и теоретической быстроты действия.

С учетом $b=\chi \cdot r_2$, $r_1=\nu \cdot r_2$, $e=\varepsilon \cdot r_2$, $l_k=R-r_a$, $\omega_2=\omega_1/u_{12}$ радиус внутренней поверхности жидкостного кольца по углу поворота рабочего колеса φ определим по формуле

$$r_{22\varphi} = \sqrt{\frac{-\left(\psi \cdot R^2 - \psi \cdot \nu^2 r_2^2 - \psi \cdot r_2^2 - 4 \cdot k_{\nu\varphi} \cdot r_2^2 \cdot \psi \cdot \varepsilon + 2 \cdot k_{\nu\varphi} \cdot r_2 \cdot \psi \cdot R - 2 \cdot k_{\nu\varphi} \cdot r_2 \cdot \psi \cdot r_a - u_{12} \cdot R^2 + u_{12} \cdot r \cdot a^2\right)}{\psi}} - e \cdot (1 + \cos\varphi) \qquad (22)$$

Коэффициент подачи для данного насоса определяется по выражению

$$\lambda_{\Pi} = 1 - \lambda_3 . \qquad (23)$$

Для ЖПВН действительная быстрота действия определяется по формуле:

$$S_д = S_{г1} \cdot \lambda_{\Pi 1} \cdot \lambda_{\Pi 2} \text{ при } p_1 \le p_{вкл} \qquad (24)$$

$$S_д = S_{г1} \cdot \lambda_{\Pi 1} \text{ при } p_1 \ge p_{вкл}, \qquad (25)$$

где $S_{г1}$ – геометрический объем газовой фазы, подаваемой первой ступенью насоса со стороны всасывания на сторону нагнетания в единицу времени при отсутствии потерь, м^3/с.

Для первой ступени ЖПВН, работающей как ЖВН, коэффициент подачи $\lambda_{\Pi 1}$ характеризует потери быстроты действия на каждом режиме работы, которые связаны с перетеканием и натеканием газовой фазы в торцевых зазорах λ_1, шарнирах λ_2 и испарением (конденсацией) рабочей жидкости в ячейки рабочего колеса λ_3 и определяется по формуле:

$$\lambda_{\Pi 1} = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 . \qquad (26)$$

Для ЖПВН с гибкой оболочкой λ_3 принимается равным 0.

Для второй ступени ЖПВН, представляющей собой пластинчатый вакуум-насос, коэффициент подачи $\lambda_{\Pi 2}$ характеризует потери быстроты действия перетеканием газовой фазы в торцевых зазорах λ_1, шарнирах λ_2 с учетом возможного попадания капельной жидкости и коэффициентом дросселирования k. Тогда:

$$\lambda_{\Pi 2} = 1 - (\lambda_1 - \lambda_2)k . \qquad (27)$$

Эффективная мощность одноступенчатого ЖВН с неподвижным корпусом $N_е$ на валу насоса складывается из мощности $N_{сж}$, затрачиваемой на сжатие парогазовой смеси; мощности $N_г$, затрачиваемой на перемещение жидкостного кольца, и мощности $N_{тр}$, затрачиваемой на преодоление трения в сальниках и подшипниках, то есть

$$N_е = N_{сж} + N_г + N_{тр}. \qquad (28)$$

В свою очередь мощность, затрачиваемую на перемещение жидкостного кольца, определяем как:

$$N_г = N_{бл} + N_к, \qquad (29)$$

где $N_{бл}$, $N_к$ – мощности, затрачиваемые на движение жидкостного кольца в безлопаточном пространстве и рабочем колесе соответственно.

Процесс сжатия в насосе политропный. Среднее значение показателя политропы определяется путем замера параметров газа на входе и выходе из вакуум-насоса.

Эффективная мощность двухступенчатого ЖВН модульного типа с одновременным включением ступеней $N_е$ на валу насоса складывается из мощности $N_{сж}$, затрачиваемой на сжатие парогазовой смеси в первой и во второй ступенях; мощности $N_г$, затрачиваемой на перемещение жидкостного кольца в первой и во второй ступенях, и мощности $N_{тр}$,

$$N_е = N_{сж1} + N_{сж2} + N_{г1} + N_{г2} + N_{тр}. \qquad (30)$$

Организация процесса вакуумирования с последовательным включением первой и второй ступени позволяет исключить на начальных стадиях работы затраты мощности на сжатие парогазовой смеси во второй ступени $N_{сж2}$ и мощности, затрачиваемой на перемещение жидкостного кольца во второй ступени $N_{г2}$. Тогда до значения вакуума определяемого как $p_{вкл} = 101{,}3 \cdot 10^3 \Big/ \tau_1^m$ формула эффективной мощности аналогична формуле 28.

Эффективная мощность вакуум-насоса с кинематическим замыканием $N_е$ на валу складывается из мощностей $N_{сж}$, $N_г$, $N_{тр}$ и мощности $N_{кз}$, затрачиваемой на кинематическое замыкание лопаток корпуса и рабочего колеса, то есть

$$N_е = N_{сж} + N_г + N_{тр} + N_{кз} \qquad (31)$$

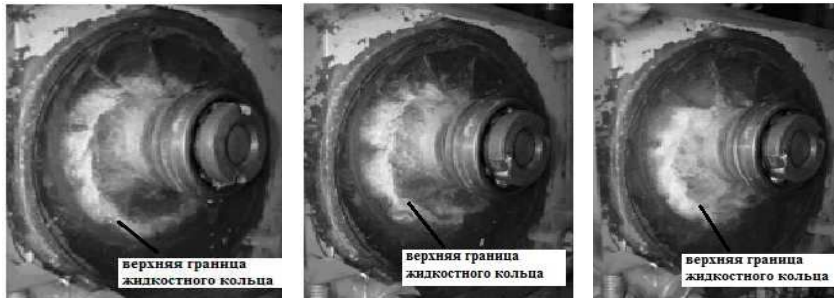
Эффективная мощность на валу ЖПВН $N_е$ складывается из мощностей $N_{сж1}$, $N_{сж2}$, $N_{бл}$, $N_{тр}$ и мощности, затрачиваемой на трения в шарнирах $N_ш$:

$$N_e = N_{сж1} + N_{сж2} + N_{бл} + N_{тр} + N_ш . \qquad (32)$$

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены программа, общая и частные методики экспериментальных исследований и обработки полученных данных. Описаны устройство новых разработанных экспериментальных установок и стендов.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований жидкостнокольцевых вакуумных насосов и технологических процессов сушки овощного сырья, хранения готовой продукции и доения коров» приведены результаты экспериментальных исследований формы внутренней поверхности жидкостного кольца при различных давлениях разряжения, частотах вращения рабочего колеса и рабочих жидкостях показали, что его форма изменяется от указанных параметров (рисунки 9, 10), а, следовательно, изменяются эксплуатационные характеристики ЖВН. Полученные данные позволили уточнить расчет формы внутренней поверхности жидкостного кольца, а, следовательно, усовершенствовать методику расчета действительной быстроты действия и эффективной мощности ЖВН.

Результаты экспериментальных исследований влияния расхода дополнительно подаваемой рабочей ($q_{ДПРЖ}$) жидкости на действительную быстроту действия и давление разряжения представлены на рисунки 11, 12.



а б в

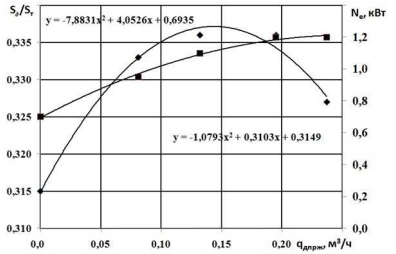
а - $q_{ДПРЖ}$=0,08 м^3/ч; б - $q_{ДПРЖ}$=0,13 м^3/ч; в - $q_{ДПРЖ}$=0,24 м^3/ч; p_p=0 Па

Рисунок 9 – Фотографии жидкостного кольца.

а б в

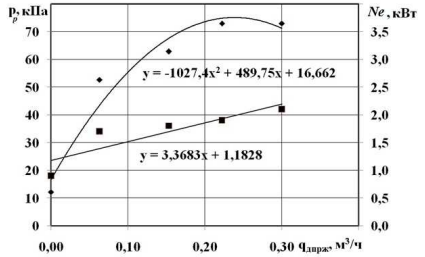
а – p_p=0 Па; б – p_p=30·10^3 Па; в – p_p=80·10^3 Па

Рисунок 10 – Фотография жидкостного кольца рабочая жидкость – Тосол 40 «Аляска».



♦ - $S_д/S_Г$; ■ - N_e

Рисунок 11 – Зависимость $S_д/S_Г$ и N_e от $q_{ДПРЖ}$; p_p=0 Па.



♦ - p_p; ■ - N_e

Рисунок 12 – Зависимость p_p и N_e от $q_{ДПРЖ}$

Значение действительной быстроты действия и давления разряжения увеличивается с ростом $q_{ДПРЖ}$. Характер изменения действительной быстроты действия и давления разряжения вполне закономерен, так как при малых значениях $q_{ДПРЖ}$ торцевые зазоры между лопатками рабочего колеса и боковыми крышками, а также «мертвая зона» в значительной степени открыты для перетечек газовой фазы, что приводит к меньшим значениям действительной быстроты действия и давления разряжения. С увеличением $q_{ДПРЖ}$ расход газовой фазы через торцевые зазоры и площадь «мертвой зоны» уменьшаются (рисунок 13), так как рабочая жидкость занимает большую часть торцевого зазора и заполняет «мертвую зону», при этом действительная быстрота действия и давление разряжения начинают расти. Причем, рост значений действительной быстроты действия и давления разряжения происходит до некоторого значения $q_{ДПРЖ}$ (см. рисунок 11), после которого дейст-

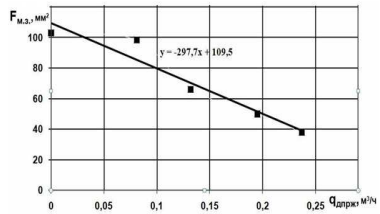
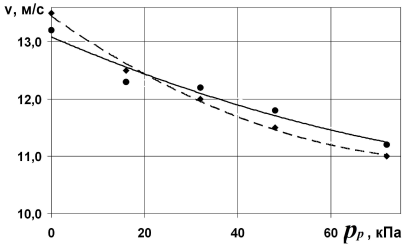


Рисунок 13 – Зависимость площади «мертвой зоны» $F_{м.з.}$ от $q_{ДПРЖ}$.

вительная быстрота действия резко уменьшается, а давление разряжения остается постоянным, при этом эффективная мощность возрастает по линейному закону (см. рисунок 12). Это изменение объясняется заполнением полезного объема поступающей рабочей жидкостью и увеличением гидравлического сопротивления.

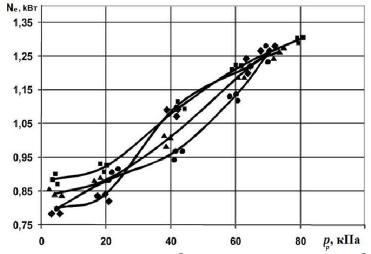


♦ – расчетная; • – экспериментальная

Рисунок 14 – Зависимость скорости движения жидкости в безлопаточном пространстве, сечение II–II от давления разряжения.

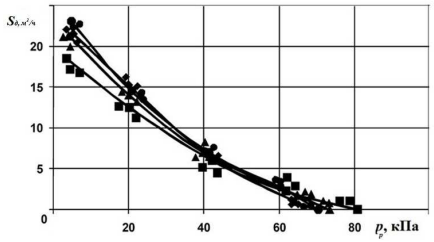
Результаты исследования эпюры скорости жидкости в рабочей полости ЖВН приведены на рисунке 14. Наибольшая погрешность результатов математического моделирования и экспериментальных данных не превышает 10…15%. В целом было установлено удовлетворительное совпадение результатов эксперимента с расчетными данными математической модели, что позволяет использовать ее при проектировании одноступенчатых ЖВН.

Анализ экспериментальных исследований влияния размера нагнетательного окна на эксплуатационные характеристики одноступенчатого ЖВН (рисунки 15, 16) позволил сделать вывод – каждому режиму работы (значению давления разряжения) соответствует оптимальный размер проходного сечения нагнетательного окна, который обеспечивает наилучшие эксплуатационные характеристики одноступенчатого ЖВН.



♦ – $F_{ок}$ = 250 мм^2; • – $F_{ок}$ = 190 мм^2;
▲ – $F_{ок}$ = 135 мм^2; ■ – $F_{ок}$ = 95 мм^2

Рисунок 15 – Зависимость эффективной мощности от давления разряжения одноступенчатого ЖВН при различных размерах нагнетательного окна



♦ – $F_{ок}$ = 250 мм^2; • – $F_{ок}$ = 190 мм^2;
▲ – $F_{ок}$ = 135 мм^2; ■ – $F_{ок}$ = 95 мм^2

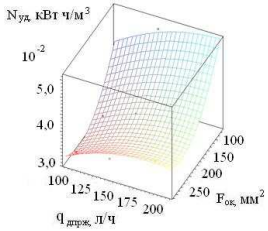
Рисунок 16 – Зависимость действительной быстроты действия от давления разряжения одноступенчатого ЖВН при различных размерах нагнетательного окна

На эффективную работу ЖВН с регулируемым нагнетательным окном оказывает влияние расход дополнительно подаваемой жидкости,

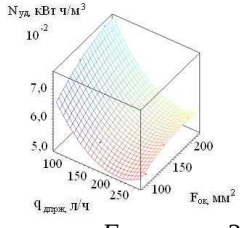
площадь нагнетательного окна и давление разряжения (рисунок 17).

Анализ зависимостей аппроксимирующих экспериментальные данные (см. рисунок 17) при различных значениях давления разряжения позволяет определить минимум удельной мощности в диапазоне варьирования определяющих параметров.

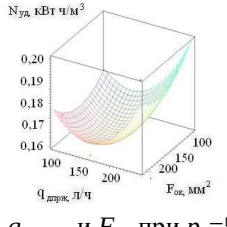
При p_p=5 кПа минимум удельной мощности $N_{уд}$=0,0316 кВт·ч/м^3 следует ожидать при значениях $F_{ок}$=209,9 мм^2 и $q_{ДПРЖ}$=100 л/ч. При p_p= 20 кПа минимум удельной мощности $N_{уд}$=0,0508 кВт·ч/м^3 будет при $F_{ок}$=208,4 мм^2 и $q_{ДПРЖ}$=100 л/ч. При p_p= 50 кПа минимум удельной мощности $N_{уд}$=0,1650 кВт·ч/м^3 обеспечивают $F_{ок}$=177,1 мм^2 и $q_{ДПРЖ}$=136,7 л/ч.



$q_{ДПРЖ}$ и $F_{ок}$ при p_p=5 кПа



$q_{ДПРЖ}$ и $F_{ок}$ при p_p=20 кПа



$q_{ДПРЖ}$ и $F_{ок}$ при p_p=50 кПа

Рисунок 17 – Зависимость $N_{е.уд}$ от $q_{ДПРЖ}$ и $F_{ок}$.

В результате получена математическая зависимость, позволяющая создавать конструкции ЖВН с регулируемым нагнетательным окном и внедрить автоматическую систему управления насосом при работе на всех режимах.

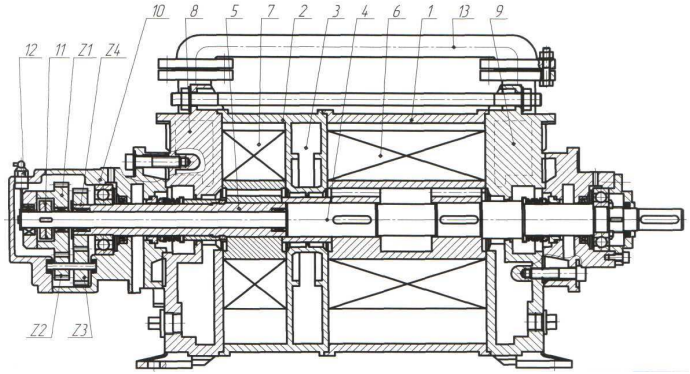
$$N_{уä} = ae^{b_1 p_ð} + b_2 F_{îê} + b_3 q_{ÄÏÐÆ} + b_4 F_{îê}\, q_{ÄÏÐÆ} + b_5 F_{îê}^{\ 2} + b_6 q_{ÄÏÐÆ}^{\ 2} \qquad (33)$$

По результатам экспериментальных исследований предложена новая конструкция двухступенчатого ЖВН, отличительной особенностью которой является наличие промежуточной камеры, отношение ширины модуля первой ступени ко второй составляет 3,125, что соответствует расчетному значению, приведенному по формуле (16).

Конструкция позволяет изменять направление ввода и вывода жидкой фазы (что влияет на гидродинамический режим в ступенях) посредством дополнительных отверстий в крышках и корпусе. Включение в конструкцию новых уплотнительных устройств снижает потери на трение и повышает герметичность насоса. Данная конструкция насоса позволяет получить следующие технические характеристики ЖВН ДМ 3(180):

- предельный вакуум – 98 % (2 кПа);
- максимальная потребляемая мощность на валу насоса - 4,7 кВт.

Проведенные экспериментальные исследования двухступенчатого ЖВН с последовательным включением ступеней по определению оптимальных значений частот вращения ступеней и давления разряжения, позволяют проектировать ЖВН, характеризущиеся минимальными удельными энергетическими затратами, высокими эксплуатационно-техническими показателями, универсальностью использования с точки зрения давления разряжения (рисунок 18).



1, 2 – корпуса первой и второй ступеней; 3 - промежуточная камера; 4 – вал первой ступени; 5 – полый вал второй ступени; 6, 7 – рабочие колеса первой и второй ступеней; 8, 9 – торцевые крышки первой и второй ступени; 10 – двухступенчатый мультипликатор; 11 – электромагнитная муфта; 12 - щеткодержатель; 13 – коллектор; z_1, z_2, z_3, z_4 – шестерни и колеса мультипликатора

Рисунок 18 – Двухступенчатый ЖВН ДМ 3(180) с мультипликатором и электромагнитной муфтой

Проведены экспериментальные исследования зависимости действительной быстроты действия и эффективной мощности от вакуума при работе на одной, двух и последовательным включением ступеней, рисунки 19,20.

Для определения давления включения p^* второй ступени проведены эксперименты по установлению зависимости эффективной мощности и действительной быстроты действия от давления разряжения при работе на одной (одноступенчатый ЖВН), двух ступенях (двухступенчатый ЖВН с одновременным включением ступеней). Установлено, что на начальных режимах вакуумирования эффективней использовать одноступенчатый ЖВН (рисунки 19, 20, кривая 2) Это подтверждается меньшими затратами потребляемой мощности и лучшими показателями быстроты действия. Получение заданного вакуума возможно при использовании второй ступени (рисунки 19, 20 кривая 1). Для испытуемого ЖВН (r_2=45 мм, b1=92 мм; b_2=36 мм; τ_1=2,5; ω_1=298,3 $с^{-1}$; ω_2=388 $с^{-1}$) давление включения p^*=50 кПа, что подтверждает расчетную формулу.

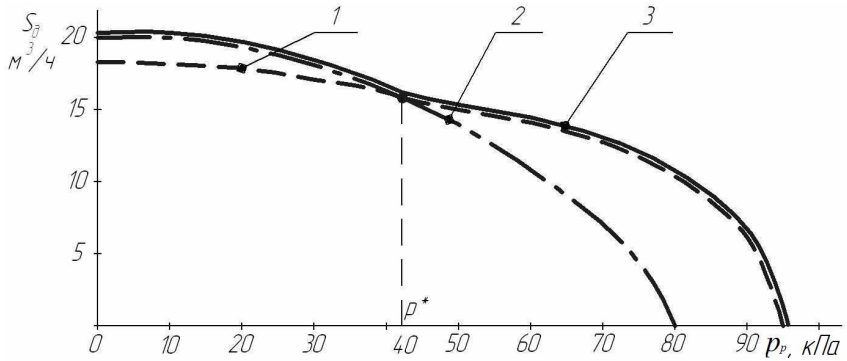


Рисунок 19 – Зависимость действительной быстроты действия от вакуума при работе: 1 - на двух ступенях; 2 - на одной ступени; 3 - с последовательным включением ступеней.

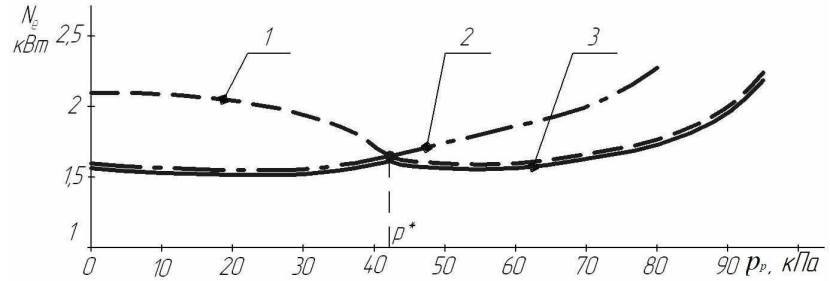


Рисунок 20 – Зависимость эффективной мощности от вакуума: 1 - на двух ступенях; 2 - на одной ступени; 3 - с последовательным включением ступеней.

В пятой главе «Методика расчета жидкостнокольцевых вакуум-насосов» решались задачи определения коэффициента быстроты действия и оптимизации конструктивных параметров (наименьший зазор между рабочим колесом и корпусом, радиус рабочих колес, угол наклона лопаток рабочего колеса, ширина корпусов, эксцентриситет) одноступенчатого и двухступенчатого ЖВН по удельной мощности.

ЖВН используемые в процессах сушки плодоовощного сырья, хранения готовой растительной продукции и доении коров должны удовлетворять технологическим, конструктивным, эксплуатационным и экономическим требованиям.

На основе экспериментальных данных, приведенных в главе 4, получена зависимость действительной быстроты действия от расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости и давления разряжения на входе в ЖВН в безразмерном виде

$$\bar{s}(\bar{p},\bar{q})=\left(Ce^{-k_1\bar{p}}+\frac{\bar{s}_{\Gamma}}{1-e^{-k_2\bar{q}_0}}\right)\left(1-e^{-k_2\bar{q}}\right) \qquad (33)$$

Данное уравнение позволяет уточнить значение коэффициента быстроты действия, что сокращает объем и стоимость экспериментальных работ и повышает точность работы ЖВН на стадии проектирования

$$\eta=\frac{\bar{s}_{\text{г}}-\bar{s}}{\bar{s}_{\text{г}}},\ 0\le\eta\le 1. \qquad (34)$$

По результатам, приведенных в главах 2,4, были получены уравнения определения удельной мощности одноступенчатого ЖВН с неподвижным корпусом и двухступенчатого ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней соответственно

$$N_{\text{уд}}=\frac{N_{\text{сж}}+N_{\text{бл}}+N_{\text{к}}+N_{\text{тр}}}{S_{\text{г}}\cdot(1-\eta)}\to\min \qquad (35)$$

(36)

$$N_{\text{уд}}=\frac{(N_{e1}+N_{e2})_{\min}}{S_{\text{Т1}}\cdot k_{\lambda}\cdot\lambda_{II1}^2}=\frac{N_{\text{сж1}}+N_{\text{бл1}}+N_{\text{к1}}+N_{\text{тр1}}+N_{\text{сж2}}+N_{\text{бл2}}+N_{\text{к2}}+N_{\text{тр2}}}{S_{\text{Т1}}\cdot k_{\lambda}\cdot\lambda_{II1}^2}\to\min$$

Исходными данными для оптимизации являются: y_4 - быстрота действия, y_5 - давление всасывания в первую ступень и y_6 - давление нагнетания второй ступени, а также в зависимости от физических свойств рабочей жидкости: y_1 - удельная вязкость, y_2 - плотность жидкости и y_3 - удельный вес.

Введя вектор-функцию нормированных параметров $\vec{x}\{x_1,...,x_n\}$ и задав исходные данные y_1 - y_5, получим искомые параметры, используемые в функции цели, которые варьируются в пределах ограничений вида:

- для одноступенчатых ЖВН с неподвижным корпусом

$$q_i\le x_i\le l_i;\qquad i=0,\ldots,8 \qquad (37)$$

- для двухступенчатых ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней

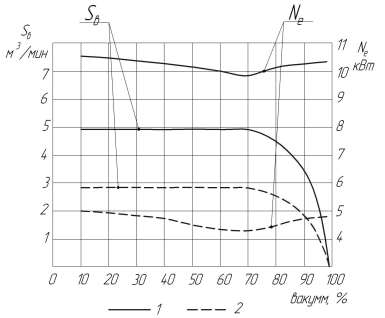
$$q_{\text{i}}\le x_{\text{i}}\le l_{\text{i}},\qquad i=1,\ldots,18,19 \qquad (38)$$

На функцию цели наложены функциональные ограничения в виде условий постоянства быстроты действия и минимально возможной критической скорости рабочего колеса. Задача оптимизации математически определена в виде

$$N_{\text{уд}}=N_{\text{уд}}(\vec{x}(\theta))\to\min \qquad (39)$$

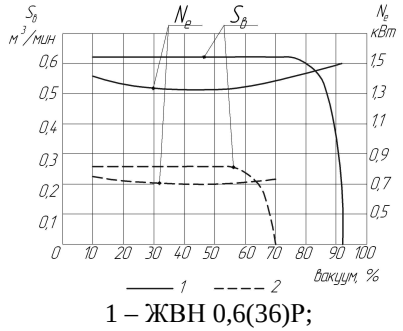
Для получения минимума функции использованы методы штрафных функций и градиента с переменным шагом. Программы оптимизации выполнены на языках программирования C++ в среде программирования CodeGear RAD Studio 2007, Паскаль в среде программирования Delphi. Расчет произведен для опытных образцов ЖВН: одноступенчатого ЖВН 033(20) и двухступенчатого ЖВН ДМ 3(180).

На рисунках 21, 22, 23 приведены технические характеристики разработанных ЖВН с новыми конструктивными изменениями.



1 – ЖВН ДМ 5(300)М;
2 – ЖВН ДМ 3(180)

Рисунок 21 – Зависимости эффективной мощности, приведенной быстроты действия от значения вакуума для двухступенчатых ЖВН.



1 – ЖВН 0,6(36)Р;
2 – ЖВН 0,26(16)Р

Рисунок 22 – Зависимости эффективной мощности и быстроты действия, приведенной к давлению всасывания, от значения вакуума для ЖВН с регулируемым нагнетательным окном.

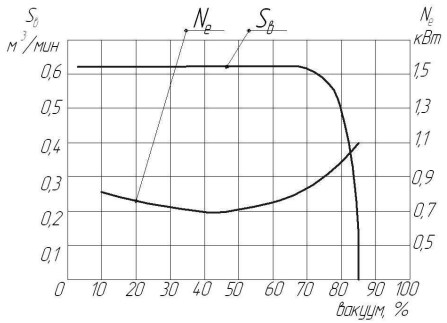
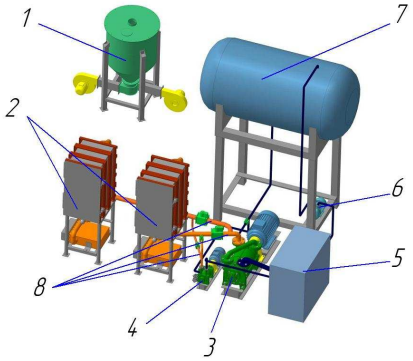


Рисунок 23 – Зависимости эффективной мощности и быстроты действия, приведенной к давлению всасывания, от значения вакуума для ЖВН 0,6(36)КЗ.

Так для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки ЖВН должны иметь диапазон остаточного давления от 10 до 1 кПа в зависимости от вида растительного материала. Это возможно за счет применения двухступенчатого ЖВН модульного типа с одновременным включением ступеней. С целью снижения энергетических затрат в технологический процесс вакуумирования включена новая кон-

струкция ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней и одноступенчатый ЖВН с регулируемым нагнетательным окном (рисунок 24).

Предложена методика расчета энергетических затрат ЖВН для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки (рисунок 25).



1 – конвективная сушилка с закрученным слоем (первая ступень сушки); 2 – сушильный шкаф (вторая ступень сушки); 3 – двухступенчатый ЖВН с последовательным включением ступеней; 4 – одноступенчатый ЖВН с регулируемым нагнетательным окном; 5 – чиллер для охлаждения рабочей жидкости; 6 – водяной насос; 7 – емкость для рециркуляции рабочей жидкости; 8 – система трубопроводов с приборами регулирования и контроля

Рисунок 24 – Двухступенчатая конвективно-вакуум-импульсная сушилка с организацией рециркуляции рабочей жидкости.

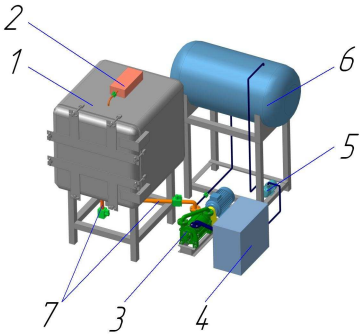
Рисунок 25 – Блок схема методики расчета энергетических затрат ЖВН для конвективной вакуум-импульсной сушки.

Одним из перспективным способом хранения готовой растительной продукции является вакуумное хранение с периодической обработкой озоном (рисунок 26).

В данном процессе в зависимости от объема контейнера наиболее эффективно применять одноступенчатый ЖВН с кинематическим замыканием или одноступенчатый ЖВН с регулируемым нагнетательным окном.

Для процесса доения в зависимости от количества коров с целью снижения пульсации и энергозатрат рационально использовать

одноступенчатый ЖВН с регулируемым нагнетательным окном или одноступенчатый ЖВН с кинематическим замыканием.



1 – контейнер вакуумный; 2 – озонатор; 3 - двухступенчатый ЖВН с последовательным включением ступеней; 4 - чиллер для охлаждения рабочей жидкости; 5 - водяной насос; 6 - емкость для рециркуляции рабочей жидкости; 7 - система трубопроводов с приборами регулирования и контроля.

Рисунок 26 – Установка для вакуумного хранения.

Обобщенный алгоритм проектирования ЖВН для процессов сушки плодоовощного сырья, хранения готовой растительной продукции и доения коров следующий.

На первом этапе выбираются конструкции вакуум-насосов по остаточному давлению, влияющего на качество технологического процесса.

На втором этапе выбирается необходимая быстрота действия (производительность). Для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки действительная быстрота действия определяется по формуле

$$S_o = \sum_{i=1}^{j} F_i \cdot \varepsilon \cdot \nu_{прод.}, \qquad (40)$$

где F_i – площадь i – го лотка, м^2; ε - порозность высушиваемого материала на лотках; $\nu_{прод.}$ - скорость продувки материала, м/с; j – количество лотков, шт.

Действительная быстрота действия дополнительного вакуум-насоса – одноступенчатого с регулируемым нагнетательным окном определяется по формуле:

$$S_o = 1{,}1 \cdot V_П, \qquad (41)$$

где $V_П$ – объемный расход паров, м^3/с.

При хранении быстрота действия насоса рассчитывается в зависимости от размера вакуум-контейнера, предельного остаточного давления и времени вакуумирования. На основании экспериментальных исследований диапазон времени вакуумирования находится в пределах от 15-25с в зависимости от физико-механических свойств сельхозпродукции, тогда действительная быстрота действия определяется как:

$$S_o = \frac{V_{В.К.}}{t} \cdot \ln\frac{p_0}{p_к}, \qquad (42)$$

где $V_{B.K.}$ – объем вакуум-контейнера, м^3; p_0 и $p_к$ – начальное и конечное давление в вакуум-контейнере, из которого откачивается воздух, Па.

Для процесса доения быстрота действия ЖВН определяется по формуле

$$S_o = 1{,}35 \cdot \nu \cdot V_{K.C.} \cdot z \cdot (1 - A), \qquad (43)$$

где 1,35 – коэффициент несовершенства пульсатора и коллектора, допускающих утечки воздуха при переключении клапанов; ν – частота пульсаций, с$^{-1}$; $V_{K.C.}$ – объем камер доильных стаканов и трубок одного доильного аппарата, м^3; A – коэффициент, учитывающий утечки воздуха из вакуумной системы; z – количество доильных аппаратов, шт.

В шестой главе «Оценка эффективности внедрения технологий сушки овощного сырья, хранения готовой продукции и доения коров» в результате экспериментальных исследований установлено, что при сушке двухступенчатым способом время сушки сокращается до 1,5 часа и снижаются потери энергии до 50% (по сравнению с конвективным способом при атмосферном давлении).

Использование жидкостнокольцевого вакуум-насоса с регулируемым нагнетательным окном ЖВН 0,26(16)Р в минидоильной установке приводит к сокращению на 25% энергозатрат на процесс доения. Автоматическое управление предельного остаточного давления позволяет существенно повысить качество дойки.

Применение вакуумного хранения свежих и сушеных овощей с периодическим озонированием увеличивает в 1,5 раза срок хранения без потерь биологически активных веществ, по сравнению с существующими способами. Для хранения 4 т овощей требуется помещение площадью 30 м^2 при высоте 3,5 м. Основным техническим условием является положительная температура внутри помещения.

В приложении представлены материалы, дополняющие выполненную работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что ЖВН нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Вместе с тем они имеют существенные недостатки: высокий расход дополнительной рабочей жидкости, снижение быстроты действия (производительности), непостоянство вакуума, что приводит при их использовании при сушке: к большим затратам электроэнергии и продолжительному времени процесса; при хранении – небольшом сроку хранения продукта, снижению потерь продукта и биологически активных веществ в процессе хранения; при доении - снижению надоя на 10…15 % и заболеванию маститом.

2. Разработаны математические модели движения жидкости, учитывающие конструктивные особенности ЖВН и наличие газовой фазы, позволяющие определять основные гидродинамические параметры жидкостного кольца и использовать при проектировании одноступенчатых ЖВН (с неподвижным корпусом, кинематическим замыканием, регулируемым нагнетательным окном), двухступенчатых ЖВН модульного типа (с последовательным включением ступеней, одновременным включением ступеней), двухступенчатых жидкостно-пластинчатых вакуум-насосов и изготавливать насосы нового поколения различных типоразмеров, обеспечивающих необходимые эксплуатационные характеристики для существующих технологий АПК.

Впервые предложена теория расчета новых двухступенчатого жидкостно-пластинчатого вакуум-насоса и одноступенчатого ЖВН с кинематическим замыканием.

3. Предложены впервые методики: расчета быстроты действия и эффективной мощности двухступенчатого ЖПВН; расчета проектирования эвольвентного профиля кинематического замыкания на долговечность по критериям износа и отсутствия заедания, а также усовершенствованные методики расчета быстроты действия (производительности) и эффективной мощности различных конструкций ЖВН.

4. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния расхода дополнительной подаваемой рабочей жидкости, частоты вращения рабочего колеса, физических свойств рабочей жидкости, давления разряжения на формирование жидкостного кольца, размера нагнетательного окна, на эксплуатационные характеристики ЖВН позволили определить основные направления совершенствования конструкций одноступенчатых ЖВН:

- применение регулируемого расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости на различных режимах работы ЖВН обеспечивает оптимальные параметры (производительность, предельный вакуум, мощность) его работы и позволяет снизить расход потребляемой жидкости на 50 %;

- осуществление подачи дополнительно подаваемой рабочей жидкости непосредственно в зону отхода жидкостного кольца от ступицы рабочего колеса позволяет повысить действительную быстроту действия на 10-15 %, давление разряжения на 15-20 % и коэффициент полезного действия на 12-15 %;

- включение в конструкцию одноступенчатых ЖВН механизма автоматического регулирования нагнетательного окна позволяет снизить энергозатраты на 15-20 %, повысить действительную быстроту действия на 5-10 % и коэффициент полезного действия на 10-15 %.

5. Разработана программа для ЭВМ оптимизации конструктивных параметров (наименьшие зазоры между рабочими колесами и корпуса-

ми, радиусы рабочих колес, углы наклона лопаток рабочих колес, ширины корпусов, эксцентриситет) из условия минимума удельной мощности одноступенчатых и двухступенчатых ЖВН;

6. Созданы новые: экспериментальные установки, для определения кинематических и динамических параметров движения жидкостной и газовой фаз и утечек газовой фазы в шарнирах двухступенчатых жидкостно-пластинчатых вакуум-насосах; экспериментальные стенды для испытаний ЖВН средней и малой быстроты действия всех предложенных конструкций, позволяющие повысить точность измерения и сократить время эксперимента и снять основные эксплуатационные характеристики средней и малой быстроты действия всех предложенных и существующих конструкций ЖВН.

7. Изготовленные и испытанные опытные промышленные установки сушки растительного сырья производительностью 14 и 36 т/год по сухому продукту на базе двухступенчатого ЖВН модульного типа и одноступенчатого ЖВН с регулируемым нагнетательным окном позволяют: снизить энергетические потери на 50%, по сравнению с конвективными сушилками и на 25%, по сравнению с существующими вакуум-импульсными сушилками; повысить производительность в два раза и снизить общую металлоёмкость оборудования.

Применение вакуумной установки, основу которой составляет новые разработанные насосы для хранения с периодическим озонированием позволяет увеличить в 1,5 раза срок хранения плодов и овощей по сравнению с существующими способами и не приводит в течении всего периода хранения к потере биологически активных веществ.

Использование разработанных новых и усовершенствованных вакуум-насосов в минидоильной установке, приводит к сокращению на 25% энергозатрат на процесс доения и снижению заболевания маститом.

Установлено, что в результате использования модернизированной двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки по сравнению с существующими растительные продукты сохраняют биологически активные вещества на 20-30% больше за счет увеличения интенсификации ведения процесса при щадящих режимах.

8. Результаты исследований, предложенные методики расчета используются малым инновационным предприятием ООО «Навакс» для разработки конструкций новых вакуумных насосов и оборудования для технологических процессов АПК с их использованием с общим оборотом 4,6 миллиона рублей (с учетом инвестиционных средств) и выходом к 2015 году на объем реализации продукции в размере 20 миллионов рублей

Изготовление новых и усовершенствованных вакуумных насосов для использования в технологических процессах сушки, хранения и

доения производится на: ООО «Тамбовполимермаш», ОАО "Мичуринский завод "Прогресс", ООО «Навакс».

Изготовленные установки на базе разработанных новых ЖВН внедрены на следующих предприятиях: при сушке – ИП Долгова, ООО «Здоровье и питание»; при хранении – МичГАУ; при доении - ГНУ ВНИИТиН. Общий годовой экономический эффект составил 2 315 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях ВАК России.

1. Определение быстродействия двухступенчатых жидкостно-кольцевых вакуум-насосов модульного типа [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2002, Т.8, № 3. - С.497-505.

2. Родионов Ю.В. К вопросу оптимизации конструктивных параметров двухступенчатых жидкостнокольцевых вакуумных насосов [текст] / Ю.В. Родионов, Ю.В. Воробьев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005,Т.6, №2. - С.274-280.

3. Влияние конфигурации жидкостного кольца на рабочие параметры жидкостнокольцевого вакуум-насоса [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2006, Т.12, № 1А. - С.120-136.

4. Родионов Ю.В. Liquid ring vane vacuum pumps. Trends in development of vacuum technology [текст] / Ю.В. Родионов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2006, Т.12, № 3Б. - С.779-784.

5. Обеспечение длительного хранения плодово-овощной продукции вакуумным способом с предварительной обработкой озоном [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007, Т.13, № 2Б. - С.598-604.

6. Перспективы развития консервной промышленности на предприятиях малого и среднего бизнеса [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007, №2(8). - С.154-159.

7. Родионов Ю.В. Влияние конструктивно-технологических параметров на эффективность работы жидкостнокольцевых вакуум-насосов [текст] / Ю.В. Родионов, М.М. Свиридов, Д.В. Никитин // Изв. высших учеб. заведений. Химия и химическая технология. – 2007. – Т.50, вып. 5. – С.102-104.

8. Условия комбинированной конвективной вакуум-импульсной сушки растительных продуктов [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2008, №4(14). - С.21-25.

9. Родионов Ю.В. Обоснование выбора вакуумных насосов для конвективной вакуумной ступени сушки растительных материалов [текст] / Ю.В. Родионов, И.В. Попова, В.Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009, №6(20). – С.106-111.

10. Определение основных геометрических размеров жидкостно-пластинчатых вакуум-насосов [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009, №9(23). – С.138-144.

11. Определение коэффициента быстроты действия жидкостно-кольцевого вакуум-насоса [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010, Т.16, № 1. – С.164-182.

12. Оптимизация конструктивных параметров жидкостнокольцевых вакуум-насосов [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010, Т.16, № 2. – С.164-182.

13. Исследование влияния расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости на рабочие характеристики жидкостнокольцевого вакуум-насоса [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010, №1-3(28). – С.243-252.

14. Повышение интенсивности процесса конвективной вакуум-импульсной сушки на примере активированного угля [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010, №1-3(28). – С.260-265.

15. Энергоэффективность двухступенчатой сушки растительного сырья [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2011, №3(34). – С.361-365.

16. Особенности расчета двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса модульного типа с последовательным включением ступеней [текст] / Ю.В. Родионов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012, Т.18, № 3. – С. 696-702

17. Calculation of operating speed for two-stage liquid sliding vane vacuum pump [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и

практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012, №2(40). – С.333-338.

18. Инновационные технологии сушки растительного сырья [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012, №3(41). – С.371-376.

19. Родионов Ю.В. Разработка двухступенчатого жидкостно-пластинчатого вакуумного насоса [текст] / Ю.В. Родионов, В.А. Талыков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012, №43. – С.47-50.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

20. Родионов Ю.В. Особенности деформационного поведения легированного поликарбоната при формовании в твердой фазе [текст] // Ю.В. Родионов, Г.С Баронин, Г.Н. Самохвалов // Труды ТГТУ: Сб. науч. статей молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. Вып.3. - С.182-186.

21. Родионов Ю.В. Исследование в области упрочняющей технологии получения торцевых уплотнений водокольцевых вакуумных насосов из сверхвысокомолекулярного полиэтилена [текст] / Ю.В. Родионов, Г.С Баронин // IV научная конференция: Краткие тез. докл. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. - С.105.

22. Родионов Ю.В. Расчет двухступенчатых жидкостнокольцевых вакуум-насосов (ЖВН) по оптимальной удельной мощности [текст] / Ю.В. Родионов, М.М. Свиридов // Актуальные проблемы современной науки: Труды 4-й Международной конференции молодых ученых и студентов. Ч. 12-16. Самара. 2003. - С.22-24.

23. Родионов Ю.В. Разработка конструкции малорасходного двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса [текст] / В. Родионов, Ю.В. Воробьев, В.Е. Шестаков // VIII научная конференция: Пленарные докл. и краткие тез. Ч.1. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. - С.138.

24. Родионов Ю.В. Определение числа лопаток роторов в двухступенчатом жидкостнокольцевом вакуум-насосе модульного типа [текст] / Ю.В. Родионов // VIII научная конференция: Пленарные докл. и краткие тез. Ч.1. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. - С.139.

25. Родионов Ю.В. Передвижная доильная установка на базе двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса [текст] / Ю.В. Родионов, С.М. Ведищев, В.В. Попов // Труды ТГТУ: Сб. науч. статей молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Вып.15. - С.43-28.

26. Родионов Ю.В. К вопросу о размерах нагнетательного окна жидкостнокольцевого вакуум-насоса [текст] / Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин // Международная научно-практическая конференция «Состав-

ляющие научно-технического прогресса». Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. - С.181-183.

27. Родионов Ю.В. Уравнение конфигурации жидкостного кольцевого кольца для жидкостнокольцевых вакуум-насосов [текст] / Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, А.В. Волков // Международная научно-практическая конференция «Глобальный научный потенциал». Сборник научных статей. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. - С.21-22.

28. Двухступенчатый жидкостнокольцевой вакуум-насос с последовательным включением ступеней [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Международная научно-практическая конференция «Достижения ученых XXI века». Сборник научных статей. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. - С.145-148.

29. Обеспечение длительного хранения плодовоовощной продукции вакуумным способом (с использованием жидкостнокольцевого вакуум-насоса) [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Достижения ученых XXI века. Сборник материалов 2-й международной научно-практической конференции. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2006. - С.113-115.

30. Родионов Ю.В. Определение площади ячеек рабочей полости жидкостнокольцевого пластинчатого вакуум-насоса [текст] / Ю.В. Родионов, С.Б. Захаржевский, Л.И. Ткач // Труды ТГТУ, вып. 20. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. - С.97-101.

31. Родионов Ю.В. Основы проектирования жидкостнокольцевых вакуум-насосов с автоматическим регулированием нагнетательного окна [текст] / Ю.В. Родионов, В.В. Попов, М.М. Свиридов // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы технологии производства, хранения, переработки и экспертизы качества сельскохзяйственной продукции». Изд-во ФГОУ ВПО МичГАУ, 2007, том 2. - С.285-291.

32. Родионов Ю.В. Комплексный метод хранения и переработки плодоовощной продукции [текст] / Ю.В. Родионов, Ю.В. Воробьев, И.В. Попова // Глобальный научный потенциал. Сборник материалов 3-й международной научно-практической конференции. Изд-во ТАМБОВПРИНТ., 2007. - С.116-117.

33. Родионов Ю.В. Вакуумное направление в хранении продуктов растениеводства [текст] / Ю.В. Родионов, Ю.В. Воробьев, И.В. Попова // Современные проблемы технологии производства, хранения, переработки и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции. Т.1: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Мичуринск: Изд-во ФГОУ ВПО МичГАУ, 2007. - С.52-57.

34. Комбинированная конвективно-вакуум-импульсная сушка – качественная переработка сельскохозяйственной продукции [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Качество науки - качество жизни: Сборник материалов 4-й междунар. научно-практ. конф. Тамбов: Изд-во ТАМБОВПРИНТ, 2008. - С.156-157.

35. Development of liquid ring vacuum pumps [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // University of Aden Journal Of Natural and Applied Sciences. Aden: Vol. 12 No. 1, 2008. - С.103-108.

36. Математическое моделирование комбинированной конвективной вакуум-импульсной сушки растительных продуктов [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – Мичуринск: Изд-во МичГАУ, 2008, №1. - С.60-65.

37. Жидкостнокольцевой вакуум-насос с изменяющимися размерами нагнетательного окна [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – Мичуринск: Изд-во МичГАУ, 2008, №1. - С.65-72.

38. Родионов Ю.В. Особенности движения жидкости в жидкостнокольцевом вакуум-насосе [текст] / Ю.В. Родионов, А.А. Пасько, Д.В. Никитин // Альманах современной науки и образования. – Тамбов, 2009. –№11, ч. 1. - С.68-73.

39. Родионов Ю.В. Сравнительный анализ эффективности сублимационной и двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки [текст] / Ю.В. Родионов., И.В. Попова, Д.А. Шацкий // Труды международного техническго семинара. К 100-летию А.В. Лыкова. – Воронеж, 2010. - С.160-167.

40. Влияние способа сушки овощного сырья на изменение коэффициента диффузии [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Достижения науки и инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию Засл. работника высшей школы РФ профессора Ю.Г. Скрипникова. – Мичуринск-наукоград, 2011. - С.210-213.

41. Особенности применения жидкостнокольцевых вакуумных насосов в технологических процессах агропромышленного комплекса [текст] / Ю.В. Родионов // Достижения науки и инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию Засл. работника высшей школы РФ профессора Ю.Г. Скрипникова. – Мичуринск-наукоград, 2011. - С.213-217.

42. Энергоэффективность применения жидкостнокольцевых вакуум-насосов в технологических процессах агропромышленного комплекса [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Достижения науки и инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию Засл. работника высшей школы РФ профессора Ю.Г. Скрипникова. – Мичуринск-наукоград, 2011. - С.226-230.

43. Родионов Ю.В. Методика подбора жидкостнокольцевых вакуум-насосов для технологических процессов агропромышленного комплекса [текст] / Ю.В. Родионов, П.С. Платицин, В.А. Преображенский // Альманах современной науки и образования.– Тамбов, 2012. –№8(63).- С.133-137.

44. Современные перспективы совершенствования и использования жидкостнокольцевых вакуум-насосов [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Materiały VIII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Nauka: teoria i praktzka - 2012» Volume 12. Techniczne nauki. – Przemyśl. Nauka i studia, 2012. - С.30-33.

45. Разработка линии двухступенчатой конвективно-импульсной вакуумной сушки растительного сырья [текст] / Ю.В. Родионов [и др.] // Материалы 64-й научно-практической конференции студентов и аспирантов (I раздел): – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2012. – С.62-63.

В описаниях к изобретениям

46. Пат. 2303166 Российская Федерация, МПК F04C 15/00. Жидкостно-кольцевая машина с автоматическим регулированием проходного сечения нагнетательного окна [текст] / Волков А.В., Воробьев Ю.В., Никитин Д.В., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. – № 2005116616/06; заявл. 31.05.2005, опубл. 20.07.2007, Бюл. №20. – 6 с.

47. Пат. 2307261 Российская Федерация, МПК F04C 15/00. Жидкостно-кольцевая машина [текст] / Родионов Ю.В., Букин А.А, Воробьев Ю.В., Дубовицкий Р.А., Однолько В.Г., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №2006105991/06; заявл. 26.02.2006, опубл. 27.09.2007, Бюл. №27. – 5 с.

48. Пат. 2294456 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Жидкостно-кольцевая машина [текст] / Воробьев Ю.В., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №2005117866/06; заявл. 09.06.2005.; опубл. 27.02.07., Бюл. №6. – 7 с.: 2 ил.

49. Пат. 2343316 Российская Федерация, МПК F04C 15/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина [текст] / Родионов Ю.В., Воробьев Ю.В., Максимов В.А., Попов В.В., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №X2007115026/06 ; заявл. 20.04.2007, опубл. 10.01.2009, Бюл. №1. – 5 с.

50. Пат. 2322613 Российская Федерация, МПК F04C 15/00. Жидкостно-кольцевой вакуумный насос [текст] / Родионов Ю.В., Воробьев Ю.В., Максимов М.М., Свиридов М.М., П.И. Селиванова; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №2006122088/06; заявл. 20.06.2006, опубл. 20.04.2008, Бюл. №11. – 9 с.

51. Пат. 2411396 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00 . Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина [текст] / Воробьев Ю.В., Захаржевский С.Б., Родионов Ю.В., Максимов В.А., Никитин Д.В., Букин А.А., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ, ООО «Навакс». - №2009119099/06; 20.05.2009, опубл. 10.02.2011, Бюл. №4. – 6 с.

52. Пат. 2291320 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина [текст] / Воробьев Ю.В., Волков А.В., Максимов В.А., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №2004130045/06; заявл. 11.10.2004.; опубл. 10.01.2007., Бюл. №1. – 5 с.: 1 ил.

53. Пат. 2322615. Российская Федерация, МПК F04C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина [текст] / Родионов Ю.В., Воробьев Ю.В., Максимов В.А., Попов В.В., Свиридов М.М., Захаржевский С.Б., Никитин Д.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №2006126111/06; заявл. 18.07.2006, опубл. 20.04.2008, Бюл. №11. – 5 с.

54. Пат. 2291987 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Жидкостно-кольцевая машина [текст] / Воробьев Ю.В., Максимов В.А., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ. - №2004130046/06; заявл. 11.10.2004.; опубл. 20.01.07. Бюл. №2. – 5 с.: 2 ил.

55. Пат. 2361795 Российская Федерация, МПК B65D81/24. Контейнер для пищевых продуктов со съемной крышкой [текст] / Букин А.А., Воробьев Ю.В., Гутенев М.Д., Митрохин М.А., Мищенко С.В., Однолько В.Г., Попова И.В., Родионов Ю.В., Скрипников Ю.Г., Щербаков С.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГТУ – №20071310624/12; 20.08.2007, опубл. 20.07.2009, Бюл. №20. – 5 с.

Свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ

56. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ. Программа оптимизации конструктивных параметров жидкостнокольцевого вакуум-насоса по удельной мощности / Максимов В.А., Никитин Д.В., Попов В.Ю., Родионов Ю.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тамб. ГТУ и ООО «Навакс». - №2010614414; заявл. 26.03.2010; зарег. 07.07.2010.