

На правах рукописи



ЛЕВИЧЕВА ОКСАНА ИГОРЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРУБОПРОВОДНОГО
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПЛАВЛЕННЫХ СЫРОВ**

Специальность: 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калининград – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Наумов Владимир Аркадьевич
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет», профессор

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Арсеньева Тамара Павловна
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет ИТМО», профессор

кандидат технических наук,
Устинова Юлия Владиславовна
ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева», доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»,
г. Ставрополь

Защита состоится «24» сентября 2026 года в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 37.2.007.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» по адресу: г. Калининград, ул. Профессора Баранова, д. 43, Зал заседаний диссертационных советов (ауд. 101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» по адресу:
https://klgtu.ru/upload/dissertations/levicheva/levicheva_diss.pdf

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, следует направлять по адресу: 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, ФГБОУ ВО «КГТУ», диссертационный совет 37.2.007.03.

Автореферат разослан «__» июля 2026 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук,
37.2.007.03, д.т.н., доцент

 О.В. Агеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие молочной промышленности Российской Федерации является одним из приоритетных направлений обеспечения продовольственной безопасности страны. В структуре молочной отрасли значительную долю занимает производство плавленых сыров (ПС), демонстрирующее устойчивую положительную динамику — выпуск данной продукции за период 2019–2023 годов увеличился на 19%, достигнув 158 тысяч тонн. ПС пользуются стабильно высоким потребительским спросом благодаря своим вкусовым качествам, удобству использования и длительному сроку хранения. Однако производство этого вида продукции сопряжено с комплексом технологических трудностей, связанных с его специфическими физико-химическими и реологическими свойствами.

Важным этапом в производстве ПС является транспортирование готовой сырной массы от плавильных аппаратов к фасовочному оборудованию. Данный процесс осуществляется при высоких температурах (70–90°C) и характеризуется необходимостью перекачивания высоковязкой неньютоновской жидкости, эффективная вязкость которой критически зависит от градиента скорости сдвига и температурного режима. Нарушение реологических параметров продукта на этапе транспортирования приводит к ухудшению его потребительских свойств: расслоению, потере однородности, ухудшению консистенции и способности к плавлению, что в конечном итоге сказывается на качестве готовой продукции и экономических показателях предприятия.

Результаты исследований, посвященных составу, реологии и совершенствованию технологии производства ПС, опубликовали в своих работах многие ученые, в том числе В.А. Арет, С.М. Баркан, А.Ф. Денисенко, Г.П. Забровский, Л.И. Кибкало, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев, О.Ю. Филиппская, А. Т. S. Alves, Н. Attia, T. D. Boylston, F. Buňka, A. G. Cruz, M. Černíková, S. E. Chatziantoniou, O. Cumhur., G. Dimitreli, M. El-Bakry, Z. Erbay, I. Felfoul, M. A. Ferrer, A. Hill, N. Koca, B. M. Mehta, Z. Miloradović, J. Miočinović, M. U. Öztürk, M. Ozturk, G. L. P. A. Ramos, R. N. Salek, A. S. Thomareis. Проведенный анализ научной литературы и практики работы действующих производств выявил существенный пробел в области системного подхода к организации процесса трубопроводного транспортирования ПС. В настоящее время на предприятиях для перекачивания сырной массы применяются насосы различных типов: винтовые, шестеренные, коловратные (кулачковые). Однако их выбор осуществляется эмпирически, без должного научного обоснования, что может привести к целому ряду негативных последствий:

1. Для продукта: чрезмерное механическое и сдвиговое воздействие, вызывающее разрушение структуры, деэмульгирование жира, денатурацию белков и, как следствие, снижение качества.

2. Для оборудования: несоответствие производительности и напора насоса реологическим свойствам продукта, ведущее к повышенному энергопотреблению, частым отказам, повышенному износу и необходимости в частом обслуживании.

3. Для технологии: возникновение застойных зон, нарушение санитарно-гигиенических норм, сложность очистки и обеспечения стабильности технологического процесса.

Проблема усугубляется тем, что ПС представляют собой характерную неньютоновскую среду, поведение которой описывается степенной моделью Оствальда-де Вааля. Ее реологические параметры (коэффициент консистенции K и индекс течения m) нелинейно зависят от температуры, состава продукта и предыстории механических воздействий. Это делает невозможным применение традиционных методов гидравлического расчета, разработанных для ньютоновских жидкостей, и требует разработки специальных методик, учитывающих специфику реологии ПС. Таким образом, существует объективное и явное противоречие между растущими объемами производства с высокими требованиями к качеству ПС и отсутствием научно обоснованной методики выбора и эксплуатации насосного оборудования для их межоперационного транспортирования, учитывающей реологические особенности продукта. Разрешение этого противоречия путем разработки методики

совершенствования процесса трубопроводного транспортирования на основе комплексного анализа реологических свойств ПС и гидравлических характеристик насосного оборудования является актуальной научной задачей. Решение этой задачи позволит снизить энергетические затраты на транспортирование; увеличить надежность и ресурс работы оборудования; минимизировать производственные потери; обеспечить стабильность и воспроизводимость технологического процесса, повысить качество и сохранить потребительские свойства готовой продукции.

Степень разработанности темы исследования. Проблема транспортирования высоковязких пищевых сред, включая ПС, ранее изучалась преимущественно в контексте общих технологических процессов. Исследованием межоперационного транспортирования пищевых сред занимались следующие авторы: Н.Р. Ахмедова, Р.В. Гинойн, А.В. Горбатов, Е.А. Денисюк, А.С. Кулаткова, С.А. Мачихин, Ю.А. Мачихин, В.А. Наумов и др. Однако вопросы, связанные с гидравлическим расчётом систем транспортирования с учётом влияния реологических свойств на характеристики насосного оборудования, оставались малоизученными. Многие производители колесчатых насосов (КН), в частности, немецкий концерн KSB (серия Vitalobe), американская корпорация SPX FLOW Waukesha Cherry-Burrell (серия WCB), голландская Pomac Industries Group (серия PLP), датская компания Dixon Sanitary (серия JRZL) размещают в открытом доступе на Интернет-ресурсах результаты испытаний своих агрегатов. Причем в указанных испытаниях изменялись перепад давления (ПД), частота вращения ротора (ЧВР) КН и динамическая вязкость (ДВ) перекачиваемых сред. Однако непосредственно использовать эти результаты можно только для ньютоновских жидкостей, так как в них не учитывается изменение эффективной вязкости перекачиваемой среды при варьировании ЧВР КН. Тогда как многие пищевые среды, в том числе, ПС, имеют свойства неньютоновских жидкостей. Кроме того, каждая из названных компаний тестировала агрегаты только своего производства. В известной научной литературе отсутствуют систематические сравнения показателей работы КН разных производителей. В литературе отсутствуют методики расчёта гидравлических систем с КН для межоперационного транспортирования ПС, что подтверждает необходимость проведения данного исследования.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методики гидравлического расчёта систем трубопроводного транспортирования ПС КН с учетом реологических свойств продукта и эксплуатационных характеристик оборудования.

Объект исследования: процесс трубопроводного транспортирования ПС.

Предмет исследования: гидравлические и энергетические характеристики системы транспортирования ПС.

Для достижения поставленной цели были сформулированы основные задачи:

1. Провести анализ процесса трубопроводного транспортирования ПС;
2. Выполнить обработку и анализ результатов испытаний КН компаниями-производителями; на основе полученных эмпирических данных разработать математические модели рабочих характеристик;
3. Сравнить производительность и энергетическую эффективность КН разных компаний при перекачивании ПС;
4. Разработать методику и алгоритм гидравлического расчёта системы межоперационного транспортирования ПС;
5. С помощью компьютерного моделирования исследовать влияние различных факторов на производительность и энергетическую эффективность систем транспортирования ПС.

Научные положения, выносимые на защиту:

– комплексная математическая модель процесса межоперационного транспортирования неньютоновских жидкостей КН (на примере ПС), учитывающая реологические свойства продукта, нагрузочные характеристики насоса (производительность, мощность) и гидравлическое сопротивление системы.

– методика и алгоритм расчета системы транспортирования ПС, реализованный в виде компьютерной программы и предусматривающий последовательный расчет реологических

параметров продукта, рабочей точки насосной установки, энергетических показателей и экономических критериев (приведенные годовые затраты) для оптимизации параметров системы с учетом вязкостных свойств продукта и режимов работы.

– с увеличением ДВ ПС показатели энергетической эффективности КН сначала улучшаются, достигают максимума, а затем снижаются.

Научная новизна:

1. Разработана комплексная математическая модель процесса, описывающая рабочие характеристики КН (производительность, мощность, показатели энергетической эффективности) с учётом изменения ЧВР, ПД и ДВ различных ПС. (п. 20 паспорта научной специальности 4.3.3. «Пищевые системы»).

2. Предложена методика и алгоритм гидравлического расчёта системы транспортирования различных ПС, учитывающая реологические свойства продукта, характеристики КН и трубопровода. (п. 21 паспорта научной специальности 4.3.3. «Пищевые системы»).

3. Разработана методика сравнения производительности и показателей энергетической эффективности КН разных компаний. (п. 22 паспорта научной специальности 4.3.3. «Пищевые системы»).

Новизна технических решений подтверждена патентом на полезную модель «Стенд для испытания коловратного насоса» № 237266 Российская Федерация, МПК F04B 51/00/.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке комплексной математической модели процесса транспортирования неньютоновских сред (в частности, ПС), описываемых степенной моделью Оствальда — де Вааля, включая влияние температуры и скорости сдвига на вязкость, а также гидравлического сопротивления трубопровода, для прогнозирования производительности, энергопотребления и определения оптимальных режимов работы насосного оборудования.

Практическая значимость заключается в следующем: на основе проведённых расчётов составлены таблицы и графики, позволяющие инженерам-технологам и проектировщикам повысить эффективность работы систем транспортирования ПС. Предложена методика выбора параметров КН и трубопровода для конкретных условий производства. Разработаны рекомендации по снижению энергозатрат и повышению эффективности транспортирования ПС. В производство Сливочного ПС торговой марки «Витако» ООО «Плавит» (г. Калининград) внедрена расчетная методика и алгоритм гидравлического расчёта системы транспортирования ПС, учитывающая реологические свойства продукта, характеристики КН и трубопровода. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке и выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Насосы и насосные станции», «Компьютерное моделирование в профессиональной деятельности».

Методология и методы исследования.

Для проведения исследования был разработан комплексный методологический подход, включающий как теоретические методы (анализ, обобщение, выделение сущности, структуризация, конструирование модели, подобие и др.), так и эмпирические (замеры, испытания, сопоставление, мониторинг). Теоретическим фундаментом послужили научные работы российских и международных исследователей в сфере инженерной реологии, технической гидромеханики (гидравлики) неньютоновских жидкостей, теории гидравлических машин.

Методология исследования включает:

– анализ научной литературы и технической документации, включая статистический анализ результатов испытаний КН;

– экспериментальное определение реологических параметров образца ПС «Сливочный»; анализ реологических параметров m и K от состава, температуры продукта и других факторов из научных публикаций для образцов ПС «Гауда», «Советский», «Российский», «Городской», «Шоколадный», «С луком», «Дружба», «Угличский»;

- математическое моделирование рабочих характеристик КН KSB (серия Vitalobe), SPX FLOW Waukesha Cherry-Burrell (серия WCB), Pomac Industries Group (серия PLP), Dixon Sanitary (серия JRZL), пищевые КН российского производства серии КНП;
- численные методы расчёта гидравлических систем;
- сравнительный анализ эффективности КН разных производителей.

Личное участие автора. Диссертационная работа обобщает результаты научных исследований, которые автор проводил лично и в соавторстве в период с 2021 по 2026 год, включая статистический анализ данных испытаний КН разных производителей, разработку математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ расчета параметров РТНУ системы межоперационного транспортирования ПС, подготовку к государственной регистрации компьютерной программы и патента на полезную модель.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование соответствует пунктам 20, 21, 22 паспорта научной специальности 4.3.3. «Пищевые системы».

Степень достоверности работы. В диссертационном исследовании научные положения, рекомендации и выводы строятся на основе фундаментальных принципов физики. Данный вывод обосновывается достоверностью как аналитических исследований, так и эмпирических результатов, полученных с использованием проверенных методов научного познания.

Математические модели нагрузочных и энергетических характеристик КН были разработаны на основе анализа результатов большого количества испытаний, выполненных производителями этих агрегатов, размещенных в открытом доступе. При этом были использованы стандартные методы статистического анализа.

Возможность применения модели степенной жидкости для реологических свойств ПС подтверждена результатами экспериментальных исследований многих авторов. Расчет гидравлических потерь при движении плавленого сыра по трубопроводу был выполнен по известному методу, справедливому для степенных жидкостей.

Результаты моделирования процесса трубопроводного транспортирования ПС не противоречат известным теоретическим концепциям, принятыми в рассматриваемой области научного исследования.

Апробация результатов. Материалы и отдельные результаты исследований докладывались на международных, национальных научных, научно-технических и научно-практических конференциях: Международный Балтийский морской форум «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве» (Калининград, 2022, 2023, 2024, 2025 г.); Международная научно-техническая конференция «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» (Петропавловск-Камчатский, 2022 г.); Междисциплинарная научная конференция «Наука и практика» (Астрахань, 2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов» (Керчь, 2025 г.); Международный Косыгинский форум, научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики» (Москва, 2025 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 26 научных трудах, в том числе в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 патенте на полезную модель, 1 свидетельстве Роспатента о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Основной текст диссертации изложен на 180 страницах и включает: введение, 5 глав аналитического и экспериментального материала, заключение, библиографический список из 125 наименований, в том числе 50 - иностранных авторов. Содержит 98 рисунков, 31 таблицу. Приложения к диссертации представлены на 12 страницах и содержат 4 рисунка, 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Анализ процесса трубопроводного транспортирования жидких пищевых продуктов и систем для его осуществления» проведён анализ современных процессов трубопроводного транспортирования жидких пищевых продуктов, применительно к ПС. Проанализированы типы насосов, применяемых в пищевой промышленности для перекачивания вязких сред: центробежные, винтовые, шестерённые и КН. Отмечены их ключевые преимущества и недостатки.

Показано, что для процесса транспортирования ПС целесообразно применять КН так как они не нарушают структуру продукта. К недостаткам КН относятся невозможность работы с жидкостями, содержащими абразивные частицы, чувствительность к гидроударам. Преимущество КН заключается в аккуратном транспортировании пищевых сред (включая ПС, мед, пасты, замороженные десерты, желе с цельными плодами, шоколад с добавлением орехов или изюма, а также майонез с овощами и так далее), сохраняя целостность их структуры. Помимо этого, КН обладают высокой производительностью и надёжностью, что позволяет оптимизировать производственные процессы и снизить затраты на обслуживание оборудования.

Особое внимание уделено влиянию вязкости ПС на процесс транспортирования. ПС являются неньютоновскими жидкостями. По мнению многих авторов, их вязкость описывается степенным законом (модель Оствальда — де Вааля):

$$\tau = K \cdot \omega^m, \quad \mu_E = K \cdot \omega^{m-1}, \quad (1)$$

Для математического моделирования процесса трубопроводного транспортирования ПС необходимы зависимости реологических параметров m и K от состава, температуры продукта и других факторов. Результаты таких экспериментальных исследований приведены в целом ряде публикаций. Они были использованы в диссертационном исследовании. Рассматривались следующие ПС: Советский, Российский, Городской, Шоколадный, С луком, Сливочный, Гауда с широким диапазоном вязкости (от низкой вязкости до высокой вязкости).

В диссертационной работе методом наименьших квадратов (МНК) были найдены значения реологических параметров для каждого значения температуры. Рассчитанные значения этих параметров для ПС «Городской» показаны точками на рисунке 1. Из графика видно, что значение K уменьшается с увеличением температуры. Это связано с тем, что повышение температуры снижает вязкость ПС. При этом показатель m возрастает, значит, ПС становится более чувствительным к изменениям сдвига скорости при высоких температурах.

По рисунку 1 зависимость реологических параметров ПС «Городской» от температуры может быть аппроксимирована следующими формулами:

$$K = K_0 / T^0, \quad m = m_0 + m_1 \cdot T. \quad (2)$$

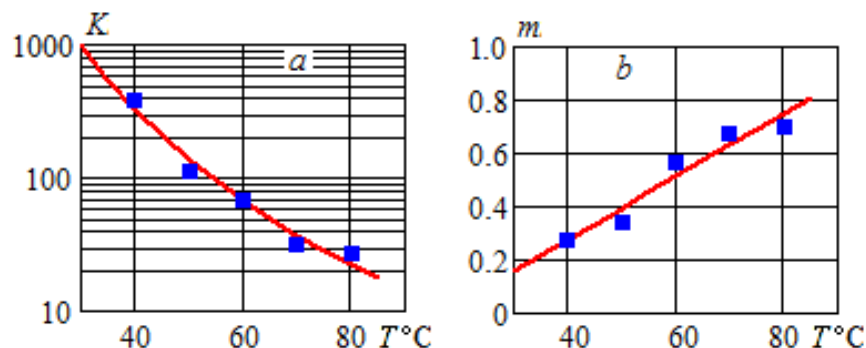


Рисунок 1 – Зависимость реологических параметров ПС «Городской» от температуры. Точки получены по экспериментальным данным из учебного пособия (В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Г.П. Забровский «Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов»); линии – расчет по (2)

Внедрение полученных результатов планировалось на производстве, выпускающем в том числе «Сливочный» ПС «Витако». Так как по этому ПС данные по реологическим параметрам в открытых источниках отсутствуют, то для проверки полученных теоретических расчетов были выполнены свои испытания в лаборатории КГТУ с помощью ротационного вискозиметра. Результаты диссертационного исследования внедрены в производство ООО «Плавит» и в учебный процесс университета.

Во второй главе «Анализ и аппроксимация рабочих характеристик колесных насосов» разработаны аналитические модели для описания рабочих характеристик КН – производительности и энергетической эффективности – с учётом влияния ЧВР, ПД и вязкости перекачиваемой среды. На основе результатов испытаний насосов различных производителей получены эмпирические зависимости и аппроксимирующие функции. Показано, что рост вязкости продукта приводит к увеличению производительности насоса, но одновременно вызывает значительный рост потребляемой мощности. Обоснован показатель удельных энергетических затрат (ПУЭЗ) как наиболее объективный критерий оценки КН.

Производительность КН зависит от ЧВР n , ДВ μ перекачиваемой среды, ПД P . Рассмотрены два подхода к математическому описанию этой зависимости. В первом подходе в качестве базовых были применены характеристики, полученные в испытаниях КН на воде в форме зависимостей Q от n при различных значениях ПД.

Так результаты испытаний насосов компании Waukesha Cherry-Burrell серии LP WCB на воде при 20°C могут быть описаны линейной зависимостью подачи Q_w от n :

$$Q_w \equiv f_w(n, p) = V \cdot [n - n_{w0}(p)], \quad (3)$$

где n_{w0} – минимально необходимая (МН) ЧВР. Причем наибольшая (теоретическая) производительность Q_T достигается при отсутствии ПД ($p = 0$), когда МН ЧВР равна нулю.

Увеличение ПД приводит к падению производительности. Рабочий объем насоса V в формуле (3) не зависит от ПД. Этот параметр КН указывается в технической документации. Например, у насоса LP WCB RF-024 $V = 0,10 \text{ дм}^3$.

На рисунке 2 представлена зависимость МН ЧВР от безразмерного перепада давления (БПД). Видно, что эта зависимость нелинейная, она может быть аппроксимирована формулой:

$$n_{w0} = B \cdot p^\beta, \quad (4)$$

где эмпирические константы, найденные с помощью метода наименьших квадратов (МНК) для LP WCB RF-024, такие: $\beta = 0,619$; $B = 1,246 \text{ с}^{-1}$. Индекс детерминации, даже скорректированный с учетом малого числа экспериментальных точек, весьма высок, равен 0,998.

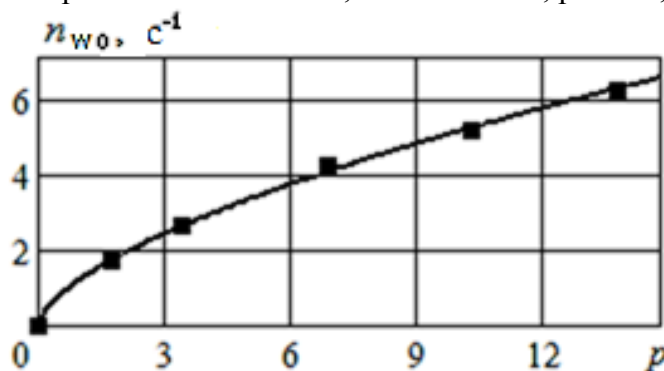


Рисунок 2 – Минимальная ЧВР LP WCB RF-024, необходимая для начала подачи воды. Точки – данные опытов (компания Waukesha Cherry-Burrell); линия – расчет по формуле (4)

На рисунке 3 точками показаны результаты испытаний КН компании Waukesha Cherry-Burrell при изменении ПД и вязкости перекачиваемой жидкости. Увеличение вязкости транспортируемой среды приводит к снижению утечек через зазоры между кулачками и повышению производительности КН. Причем $Q \rightarrow Q_T$ при росте БПД $\bar{\mu} = \mu/\mu_0$, где μ , μ_0 – ДВ перекачиваемой жидкости и воды при 20°C, соответственно.

Указанный эффект может быть описан следующей формулой:

$$Q = f(n, 0) - (f(n, 0) - f(n, p)) \cdot \varphi(\bar{\mu}), \quad (5)$$

где $\varphi(\bar{\mu})$ – некоторая убывающая функция, обладающая следующими свойствами:

$$\varphi(1) = 1; \bar{\mu} \rightarrow \infty \Rightarrow \varphi(\bar{\mu}) \rightarrow 0$$

Идея (5) заключается в следующем: с одной стороны, при $\bar{\mu} = 1$ (вода) после раскрытия скобок получим $Q = f_w(n, p)$; с другой стороны, при очень большой величине безразмерной динамической вязкости (БДВ) ($\bar{\mu} \rightarrow \infty$) $f(n, p, \bar{\mu}) = V \cdot n$. Указанными свойствами обладают, в частности, функции $\varphi(\bar{\mu}) = 1/\bar{\mu}^\gamma$. Подставляя $\varphi(\bar{\mu})$ в формулу (5), получим

$$Q \equiv f(n, p, \bar{\mu}) = f_w(n, 0) - [f_w(n, 0) - f_w(n, p)]/\bar{\mu}^\gamma, \quad (6)$$

где γ – эмпирический показатель влияния вязкости жидкости на производительность КН.

Наибольший индекс детерминации для LP WCB RF-024 (0,978) был получен при значении $\gamma = 0,50$. По рисунку 3 видно, что результаты расчета по формуле (6) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для гидравлического расчета системы транспортирования жидких пищевых продуктов необходимы графики производительности в координатах ($Q-p$). Они строятся по формуле (6). При анализе результатов испытаний выявлено, что при $\bar{\mu} > 300$ производительность LP WCB, практически, не зависит от перепада давления. Она равна теоретической производительности Q_T .

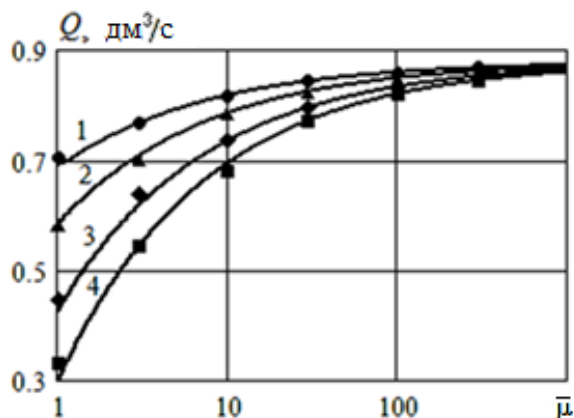


Рисунок 3 – Зависимость производительности LP WCB RF-024 от БДВ жидкости при $n=8 \text{ с}^{-1}$ и различных ПД: 1 – $P = 172,4 \text{ кПа}$; 2 – $P = 345,7 \text{ кПа}$; 3 – $P = 689,5 \text{ кПа}$; 4 – $P = 1034 \text{ кПа}$. Точки – данные испытаний (компания Waukesha Cherry-Burrell); линии – расчет по формуле (6)

Во втором подходе при моделировании подачи КН в качестве основы принимается нагрузочная характеристика высоковязких сред:

$$Q = F(n, p, \bar{\mu}) = V \cdot (n - n_0), \quad (7)$$

где n_0 – МН ЧВР для начала подачи произвольной жидкости, а не $n_{и0}$ для воды, как в формуле (3).

Была выдвинута гипотеза, что функция для n_0 может быть представлена, как и $n_{и0}$:

$$n_0 \equiv \Psi(p, \bar{\mu}) = B \cdot p^\alpha. \quad (8)$$

Для определенности воспользуемся данными испытаний насоса компании Romac Pumps - Vitalobe-100. Было проведено сравнение экспериментальных данных МН ЧВР и результатов расчетов по формуле (8). Оказалось, что величину α можно считать константой C при $\bar{\mu} > 10$; до этого α является возрастающей линейной функцией от логарифма БДВ: $\bar{\mu}$.

Величина B в исследованном диапазоне БДВ оказалась убывающей линейной функцией от логарифма $\bar{\mu}$, как показано на рисунке 4, б:

$$B \equiv \psi(\bar{\mu}) = B_0 - B_1 \lg \bar{\mu}, \quad (9)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-100 равны: $B_0 = 12,364 \text{ с}^{-1}$; $B_1 = 4,538 \text{ с}^{-1}$.

По рисунку 4 согласие результатов расчетов по формуле (9) с экспериментальными точками вполне удовлетворительное.

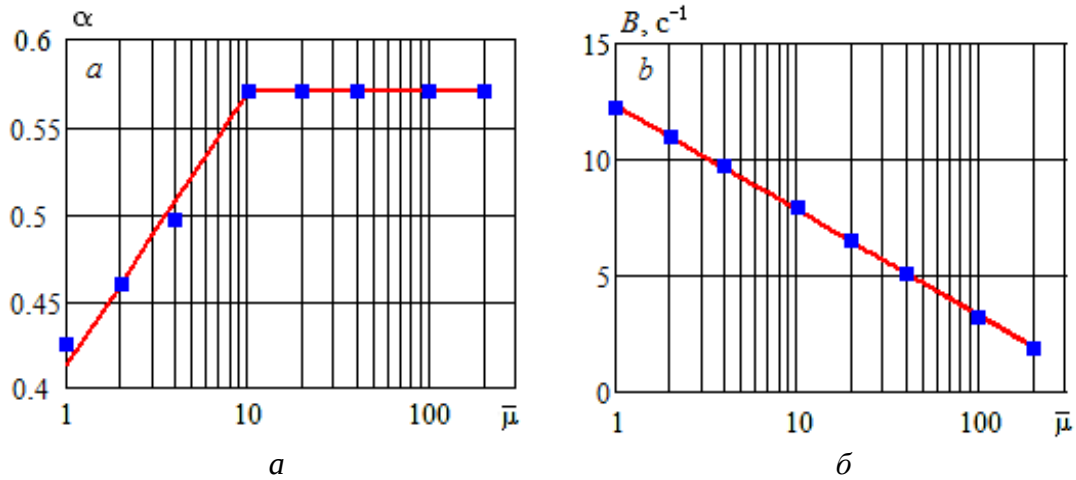


Рисунок 4 – Эмпирические функции к формуле (9) для Vitalobe-100: a – показатель степени; b – коэффициент. Точки получены на основе экспериментальных данных (компания Romac Pumps), линии – аппроксимация

На рисунке 5 представлено сравнение результатов расчета подачи КН Vitalobe-100 с экспериментальными данными. Некоторое отклонение экспериментальных точек от расчетных линий наблюдается лишь при сравнительно небольших значениях БДВ (линия 1).

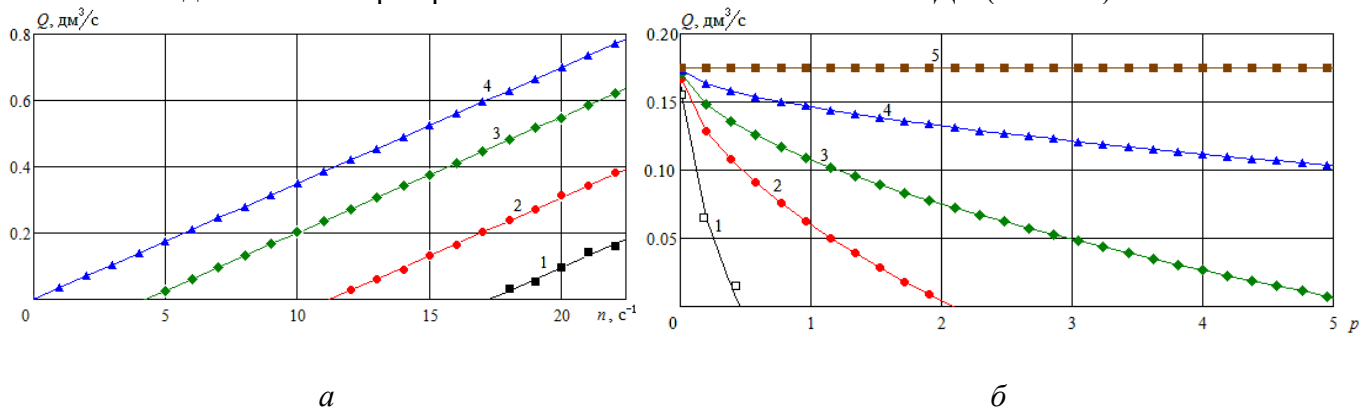


Рисунок 5 – Подача КН Vitalobe-100: a – зависимость от ЧВР при $p=4$ и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu}=10$; 2 – $\bar{\mu}=40$; 3 – $\bar{\mu}=200$; 4 – $\bar{\mu}=600$; b – зависимость от БПД при $n=5 \text{ с}^{-1}$ и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu}=10$; 2 – $\bar{\mu}=40$; 3 – $\bar{\mu}=200$; 4 – $\bar{\mu}=350$; 5 – $\bar{\mu}=600$. Точки – экспериментальные данные (компания Romac Pumps); линии – результаты расчета

Таким образом, второй подход позволяет рассчитывать подачу КН высоковязких сред с меньшей погрешностью, чем первый. Заметная погрешность проявляется лишь для пищевой жидкости (ПЖ) со сравнительно небольшой вязкостью. Поэтому для моделирования производительности КН при перекачивании высоковязких сред, в том числе ПС, предпочтительнее использовать второй подход, а сравнительно маловязких – первый.

К моделированию энергетических характеристик КН также существует два подхода, связанных с разным представлением результатов заводских испытаний. В отличие от производительности оба подхода основываются на энергетической характеристике, полученной для воды $N_{\text{в}}(p, n)$. На рисунке 6 такая зависимость показана для одного из насосов серии WCB.

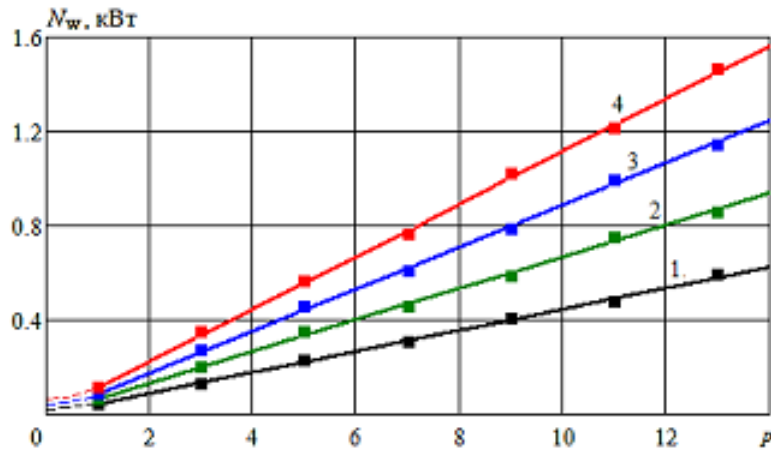


Рисунок 6 – Энергетические характеристики КН Зависимость затраченной мощности 034-WCB от БПД при перекачивании воды: 1 – $n=2 \text{ c}^{-1}$; 2 – $n=3 \text{ c}^{-1}$; 3 – $n=4 \text{ c}^{-1}$; 4 – $n=5 \text{ c}^{-1}$. Точки – экспериментальные данные (компания WCB); сплошные линии – результат расчета

В первом подходе влияние вязкости учитывается дополнительным слагаемым N_F , как в формуле (10), во втором – дополнительным множителем F , как в (11).

$$N = N_W + N_F, \quad N_F = A_F \cdot n \cdot (\bar{\mu} - 1)^0, \quad (10)$$

$$N = N_W(n, p) \cdot F(\bar{\mu}), \quad F(\bar{\mu}) = b_0 + b_1 \cdot \lg(\bar{\mu}) + b_2 \cdot \lg^2(\bar{\mu}) + b_3 \cdot \lg^3(\bar{\mu}) + b_4 \cdot \lg^4(\bar{\mu}). \quad (11)$$

Оба подхода позволяют описывать зависимость затраченной мощности КН от БПД, ЧВР и БДВ. Результаты расчетов неплохо согласуются с опытными данными (например, рисунок 7). Однако более предпочтительным является второй подход, так как зависимость $F(\bar{\mu})$ оказалась универсальной для всех КН исследованной серии. Тогда как величина механической работы за один оборот A_F разная у насосов даже одной серии. Ее величину приходится устанавливать для каждой марки КН.

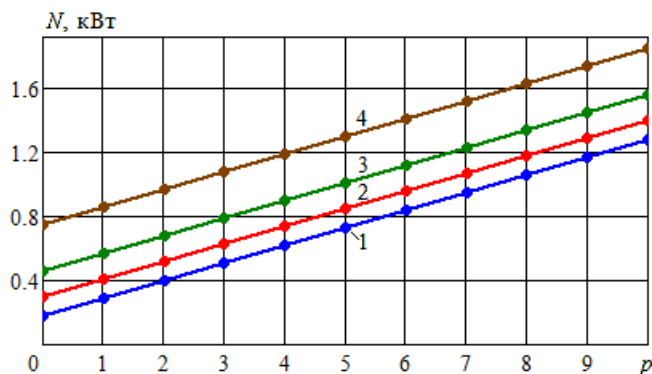


Рисунок 7 – Зависимость полной затраченной мощности КН PLP 2-1,5 БПД при $n = 5 \text{ c}^{-1}$ и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu} = 1$ (вода); 2 – $\bar{\mu} = 100$; 3 – $\bar{\mu} = 500$; 4 – $\bar{\mu} = 2000$. Точки – данные испытаний (компания Romac Pumps); линии – расчет по формуле (11)

Производители КН публикуют результаты испытаний, содержащие технические характеристики оборудования. Тем не менее, они обычно не указывают коэффициент полезного действия (КПД) насосов, ограничиваясь информацией о требуемой мощности электродвигателя. Хотя данные о потребляемой мощности доступны, отсутствуют сведения об энергетической эффективности насоса. Приведенные результаты испытаний позволяют рассчитать гидравлический КПД (ГКПД, %) η и ПУЭЗ, кДж/дм^3 E по известным формулам:

$$\eta = 100 \cdot P \cdot Q / N, \quad E = N / Q. \quad (12)$$

На рисунке 8 показаны рассчитанные по формулам (3), (10) зависимости производительности и затраченной мощности КН PLP2-1,5 от БДВ при $n = 3 \text{ c}^{-1}$ и различных

значениях БПД. Увеличение БДВ приводит к росту как Q , так и N . Но при больших значениях $\bar{\mu}$ влияние БДВ на Q снижается (при БДВ больше некоторого значения $\bar{\mu}_1$ можно считать $Q=Q_T = \text{const}$), а на N остается существенным (по рисунку 8, б усиливается). В результате зависимость показателей энергетической эффективности КН от БДВ получится немонотонной.

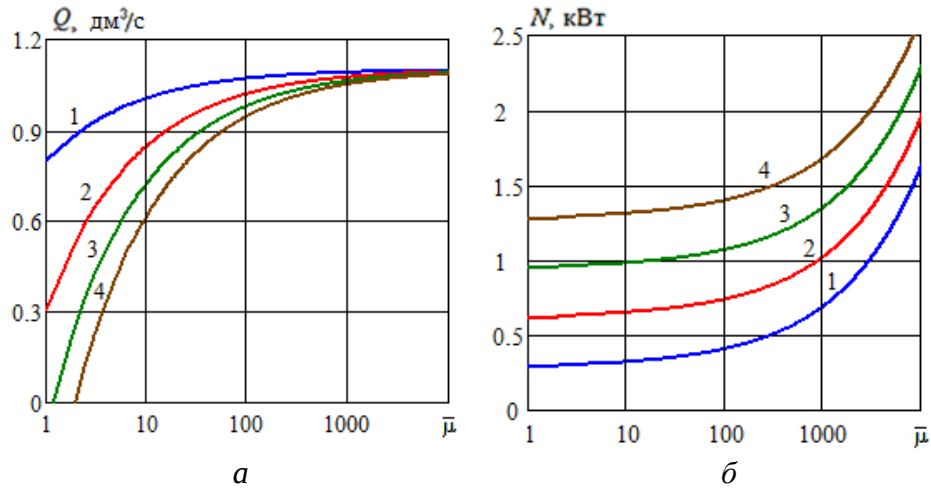


Рисунок 8 – Зависимость производительности (а) и затраченной мощности (б) КН РLP2-1,5 от БДВ при $n = 3 \text{ с}^{-1}$ и различных значениях БПД:
1 – $p = 1$; 2 – $p = 4$; 3 – $p = 7$; 4 – $p = 10$

По рисунку 9 видно, что с увеличением БДВ значение ГКПД сначала возрастает, достигает максимума, затем снижается; ПУЭЗ сначала возрастает, достигает минимума, затем повышается. Причем и положение, и величина экстремума возрастают с увеличением БПД: для $p = 4$ минимум ПУЭЗ равен $E_{\min} = 0,752 \text{ кДж/дм}^3$, при $\bar{\mu}_m = 57$; для $p = 7$ $E_{\min} = 1,168 \text{ кДж/дм}^3$ при $\bar{\mu}_m = 143$; для $p = 10$ $E_{\min} = 1,581 \text{ кДж/дм}^3$ при $\bar{\mu}_m = 263$.

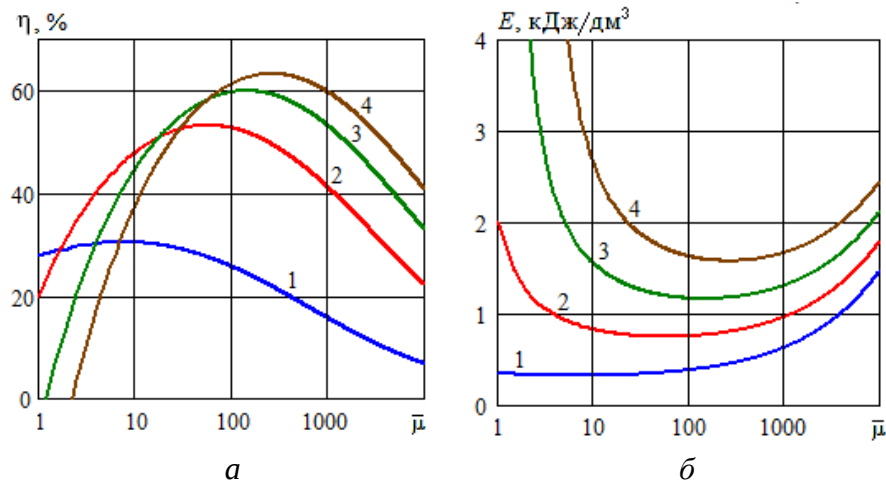


Рисунок 9 – Зависимость ГКПД (а) и ПУЭЗ (б) КН РLP2-1,5 от БДВ.
Условия и обозначения, как на рисунке 8

Было выявлено, что с увеличением ЧВР примерно до $n=6 \text{ с}^{-1}$ минимальное значение ПУЭЗ снижается, а при больших n – перестает меняться. При этом величина БДВ $\bar{\mu}_m$, при которой достигается экстремум, продолжает уменьшаться. С увеличением БДВ оба показателя одинаково характеризуют изменение энергетической эффективности КН: возрастание, максимальная энергоэффективность, снижение. Обнаруженный эффект наблюдается у всех КН разных производителей, но значения экстремумов показателей и величины БДВ, при которых они достигаются, могут заметно отличаться.

В третьей главе «Сравнительный анализ рабочих характеристик колесных насосов разных производителей» проведён сравнительный анализ производительности и энергетической эффективности КН ведущих компаний производителей КН: Waukesha Cherry-Burrell, Pomac Industries Group, KSB Aktiengesellschaft, Dixon Sanitary при транспортировании ПС. На основе разработанных в предыдущей главе моделей выполнены расчёты для широкого диапазона вязкостей, температур и перепадов давления.

Для сравнения по производительности выбраны двухкулачковые насосы с близким рабочим объемом: 034-WCB (Waukesha Cherry-Burrell), PLP 2-1.5 (Pomac Industries Group), Vitalobe-215 (KSB) и JRZL-120 (Dixon Sanitary).

Формула расчета производительности КН для высоковязких сред следует из (7), (8). Для сравнения производительности введем безразмерную подачу КН q :

$$q = Q/(V \cdot n_{max}) \quad (13)$$

Ее зависимость от безразмерной частоты вращения и перепада давления можно преобразовать к следующему виду:

$$q = \bar{n} - b \cdot p^{\varphi(\bar{n}, T)}, \bar{n} = n/n_{max}, b = \varphi(\bar{n}, T)/n_{max} \quad (14)$$

На рисунке 10 представлены результаты расчета по формуле (13) зависимости безразмерной производительности КН 4-х компаний от перепада давления при различных значениях БДВ перекачиваемой жидкости. Видно, что безразмерная производительность всех КН снижается с увеличением ПД и уменьшением БДВ. Однако имеется заметное количественное различие.

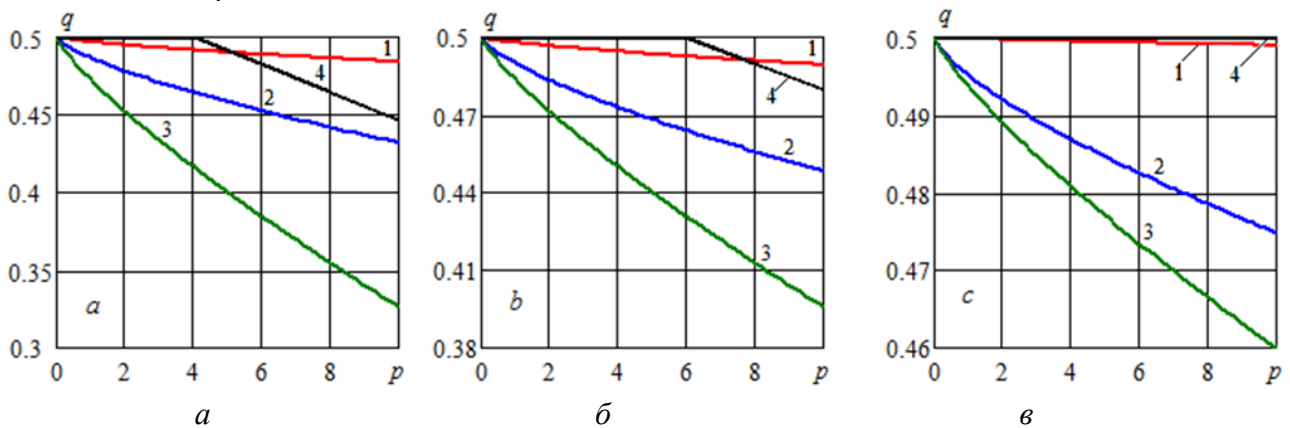


Рисунок 10 – Зависимость безразмерной производительности КН 4-х компаний от БПД при разных БДВ: $a - \bar{\mu} = 100$; $b - \bar{\mu} = 200$; $c - \bar{\mu} = 380$; 1 – 034-WCB; 2 – PLP 2-1.5; 3 – Vitalobe-215; 4 – JRZL-120

Наибольшее значение безразмерной производительности при небольших значениях БПД у КН JRZL-120, а при больших – у 034-WCB. Так, при $p=8$, $\bar{\mu} = 100$ рисунок 10, a у КН PLP 2-1.5 она меньше на 9,1%, у КН Vitalobe-215 – на 27%; при $p=8$, $\bar{\mu} = 200$ рисунок 10, b – меньше на 7,1% и 15,9%, соответственно; при $p=8$, $\bar{\mu} = 380$ рисунок 10, c – меньше на 4,1% и 6,5%, соответственно. Однако, при $\bar{\mu} = 600$ и более разница между значениями безразмерной производительности трех указанных КН становится менее 1%.

На рисунке 11 показано, как различаются зависимости безразмерной подачи от ЧВР у КН при высокой температуре ПС-1 (95°C) и большом перепаде давления ($p=10$). Видно, что при указанных условиях производительность КН 034-WCB и JRZL-120 достигает максимально возможных значений ($n_0=0$). Подача КН PLP 2-1,5 ниже, например, при $n = 5 \text{ с}^{-1}$ – на 15,4%, а КН Vitalobe-215 – на 41,2%.

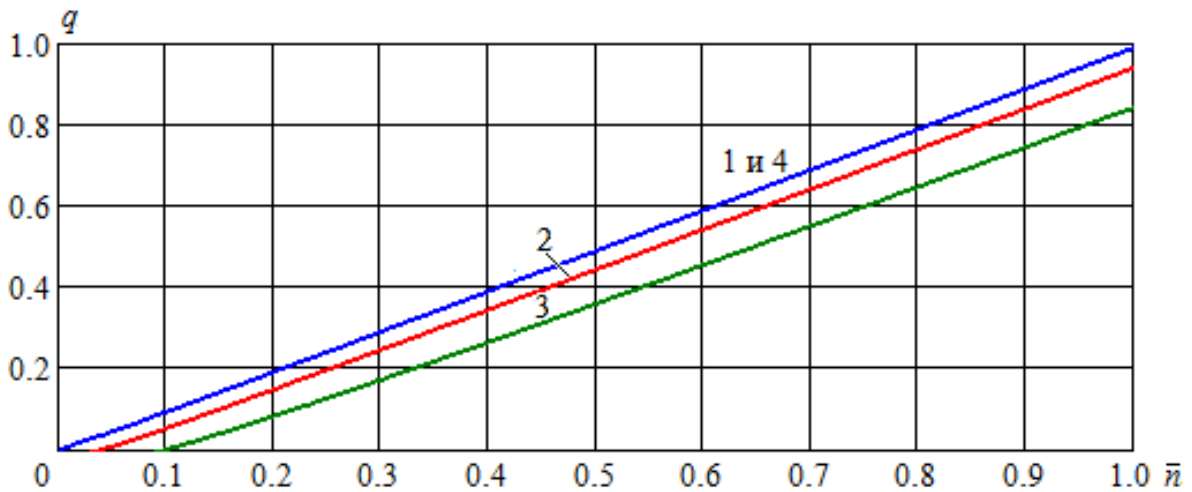


Рисунок 11 – Зависимость безразмерной подачи КН 4-х компаний от ЧВР при транспортировании ПС-1 при 95°C, $p=10$: 1 – 034-WCB; 2 – PLP 2-1,5; 3 – Vitalobe-215; 4 – JRZL-120

Для сравнения по энергетической эффективности основным показателем выбран показатель удельных энергетических затрат (ПУЭЗ).

На воде $p=5$ наименьшие затраты мощности и ПУЭЗ у 034-WCB, наибольшие – у Vitalobe-215 и PLP 2-1.5 (Рисунок 12, а, б). Для маловязких жидкостей наименьшие энергетические затраты у насоса 034-WCB.

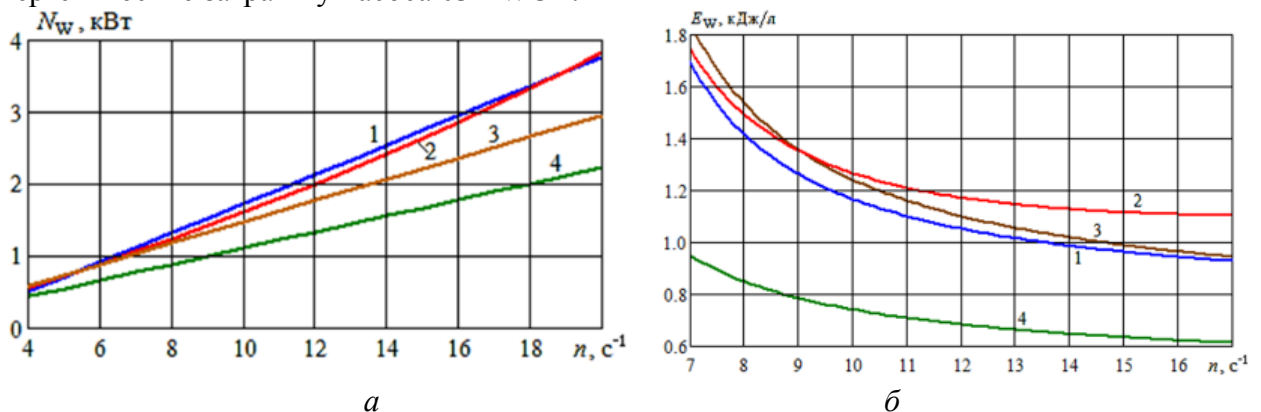


Рисунок 12 – Зависимость затраченной мощности от ЧВР при перекачивании воды ($p=5$) четырех КН: а – 1 – Vitalobe-215, 2 – PLP 2-1.5, 3 – JRZL-120, 4 – 034-WCB; б – Зависимость ПУЭЗ от ЧВР при перекачивании воды ($p=5$) четырех КН

Для учета вязкости используются поправочные коэффициенты к мощности на воде.

Зависимость ПУЭЗ от вязкости при $p=5$ и $n=2 \text{ с}^{-1}$ (Рисунок 13) показывает, что для высоковязких сред наименьшие энергозатраты у Vitalobe-215. Зависимость имеет минимум для каждого насоса.

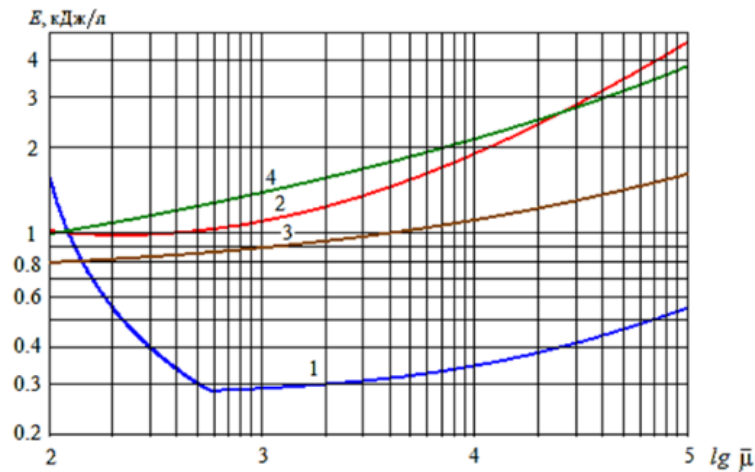


Рисунок 13 – Зависимость ПУЭЗ от БКДВ четырех КН при $p=5$, $n = 2 \text{ с}^{-1}$:
1 – Vitalobe-215, 2 – PLP 2-1.5, 3 – JRZL-120, 4 – 034-WCB

Для высоковязкого ПС-4(5) (85°C , $n=2 \text{ с}^{-1}$) (Рисунок 14): Vitalobe-215 имеет заметно лучшие (меньшие) показатели ПУЭЗ во всем диапазоне давлений. Худшие показатели у 034-WCB.

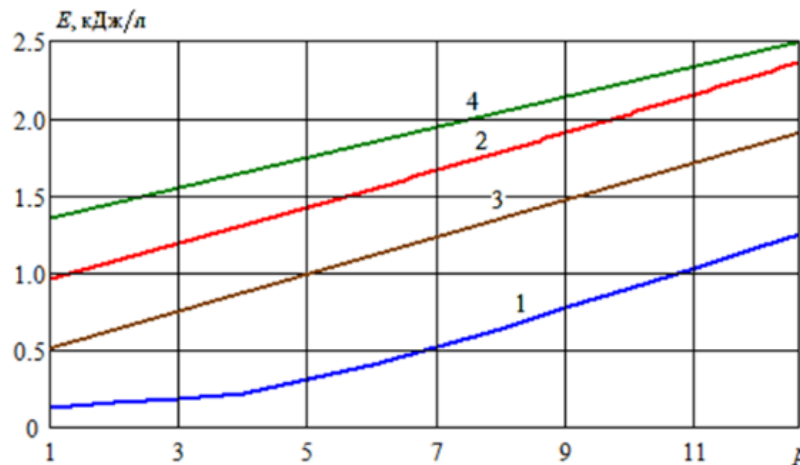


Рисунок 14 – Зависимость ПУЭЗ четырех КН от БПД для ПС-4 при 85°C , $n = 2 \text{ с}^{-1}$.
Обозначения, как на рисунке 13

Выявлено, что насос Vitalobe-215 обладает наилучшей энергоэффективностью для высоковязких сред, в то время как для средних вязкостей конкурентным может быть насос JRZL-120, а для низких – 034-WCB.

Установлено, что не существует универсального насоса для всех условий. Выбор наиболее энергоэффективного насоса зависит от реологических свойств продукта и параметров технологического процесса: для низковязких сред при высоких ЧВР предпочтительны одни модели, а для высоковязких ПС при низких ЧВР – другие.

В четвертой главе «Гидравлический расчет системы межоперационного транспортирования плавленых сыров» разработан комплексный алгоритм гидравлического расчета системы транспортирования ПС с использованием КН. В алгоритме учитываются реологические свойства ПС (вязкость, зависимость от температуры и скорости сдвига), нагрузочные характеристики КН (производительность, мощность, КПД) и параметры трубопровода (диаметр, длина, местные сопротивления). Центральное место занимает методика определения рабочей точки насосной установки – режима, при котором характеристики насоса согласованы с гидравлическим сопротивлением системы. Принципиальная схема алгоритма расчета представлена на рисунке 15.

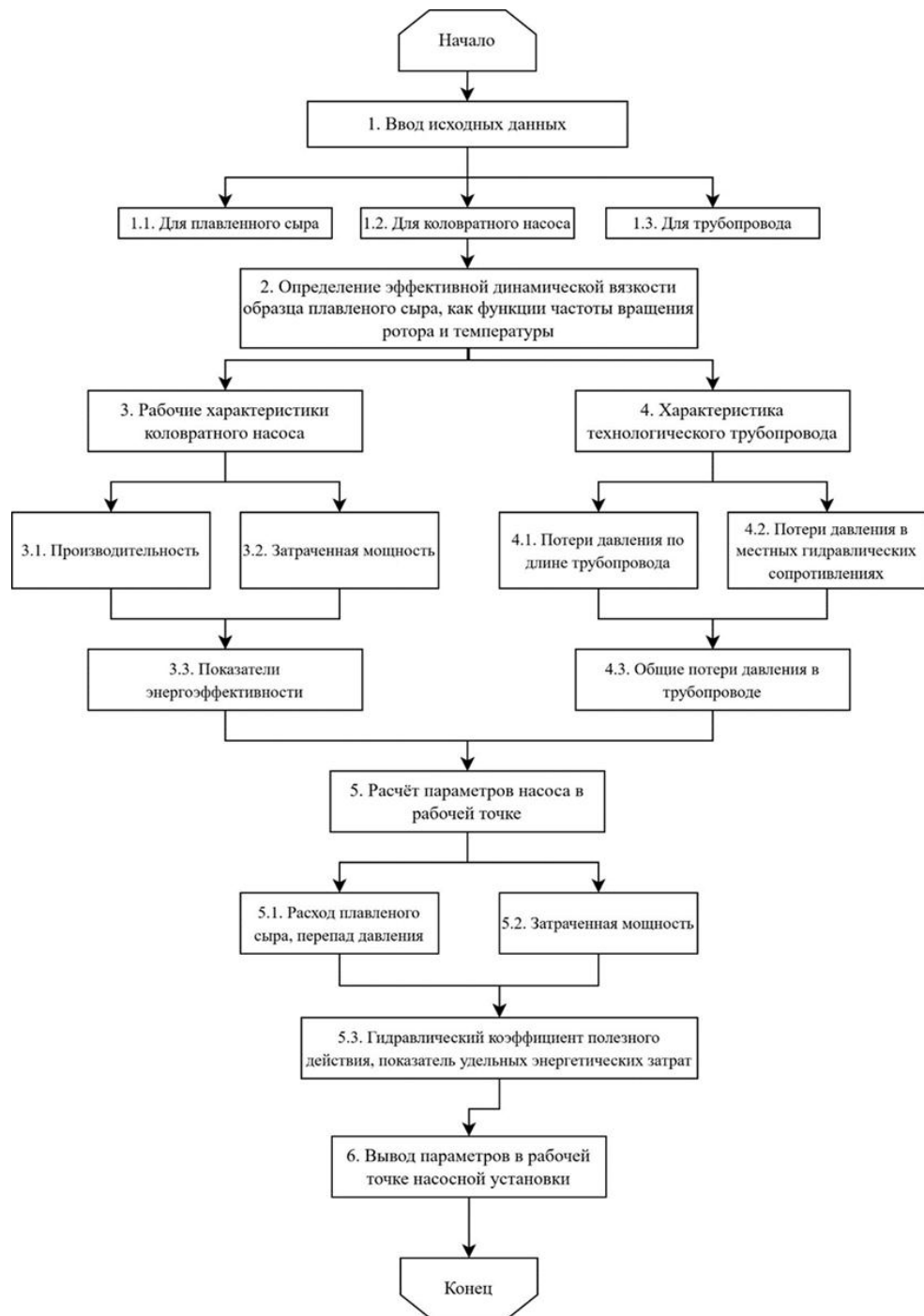


Рисунок 15 – Принципиальная схема алгоритма расчета гидравлической системы транспортирования плавленного сыра по трубопроводу

На основе алгоритма проведены расчеты для двух типов плавленного сыра со сравнительно невысокой и высокой вязкостью. Выполнен анализ параметров, оценивающий влияние ключевых факторов: диаметра и длины трубопровода, ЧВР, температуры и вида ПС. Установлено, что в некоторых случаях рост ГКПД насоса не свидетельствует об улучшении общей энергоэффективности системы, что подтверждает целесообразность использования ПУЭЗ как основного критерия оптимизации.

Например, на рисунке 16 показано определение параметров гидравлической системы в рабочей точке насосной установки (РТНУ) при транспортировании ПС «Советский» ($T=80^{\circ}\text{C}$) с помощью КН РЛР-2-1.5 $L=15$ м, $d=55$ мм и различных значениях ЧВР.

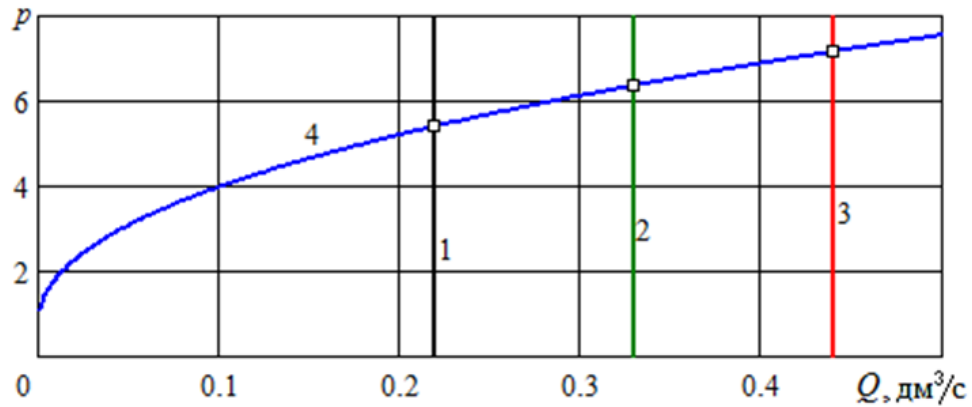


Рисунок 16 – Определение параметров в РТНУ ПС «Советский» при $d = 55$ мм и различных значениях ЧВР: 1 – нагрузочная характеристика PLP-2-1.5 $n = 60$ об/мин; 2 – 90 об/мин; 3 – 120 об/мин; 4 – характеристика трубопровода

Таблица 1 – Параметры гидравлической системы в РТНУ транспортирования ПС «Советский» с помощью КН PLP-2-1.5 при $T=80^{\circ}\text{C}$ и изменении ЧВР

n , об/мин	Q , дм³/с	p	N , кВт	η , %	E , кДж/дм³
60	0,22	5,409	0,668	17,8	3,036
90	0,33	6,366	0,951	22,1	2,882
120	0,44	7,161	1,233	25,6	2,803

По таблице 1 видно, что при увеличении ЧВР наблюдается рост расхода в РТНУ, что соответствует формуле (7). Перепад давления в РТНУ увеличивается из-за роста гидравлического сопротивления при высоких расходах. Затраченная мощность растёт с увеличением ЧВР, что характерно для КН. ГКПД и ПУЭЗ изменяются не столь значительно, имея тенденцию к улучшению показателей.

В пятой главе «Практическая реализация разработанных моделей и алгоритмов для оптимизации работы коловратных насосов» проанализировано применение разработанных математических моделей и алгоритмов для оптимизации работы КН при транспортировании высоковязких пищевых продуктов, в частности ПС. Предложен метод определения допустимой ЧВР в зависимости от вязкости продукта и характеристик насоса.

Например, графики для определения допустимой ЧВР КН Vitalobe-215 компании KSB Aktiengesellschaft построены в соответствии с рисунком 17. Нанесены точки с координатами $(n, \bar{\mu})$, соответствующие насосу Vitalobe-215. По указанным точкам находим линейную сплайн-интерполяцию 1. Далее строим графики зависимостей БЭДВ от ЧВР для каждого образца ПС (линии 2, 3, 4 на рисунке 17). Точки пересечения соответствуют наибольшему допустимому значению ЧВР насоса Vitalobe-215 при подаче определенного образца ПС. Например, для ПС-3 это точка А с ЧВР $n_A = 11,67 \text{ с}^{-1}$ или 700 об/мин. Следовательно, допустимая ЧВР КН Vitalobe-215 при подаче ПС-3 $n \leq 700$ об/мин. Аналогично определяем по рисунку 17 при использовании названного КН для подачи ПС-2 – $n \leq 795$ об/мин; ПС-4 – $n \leq 500$.

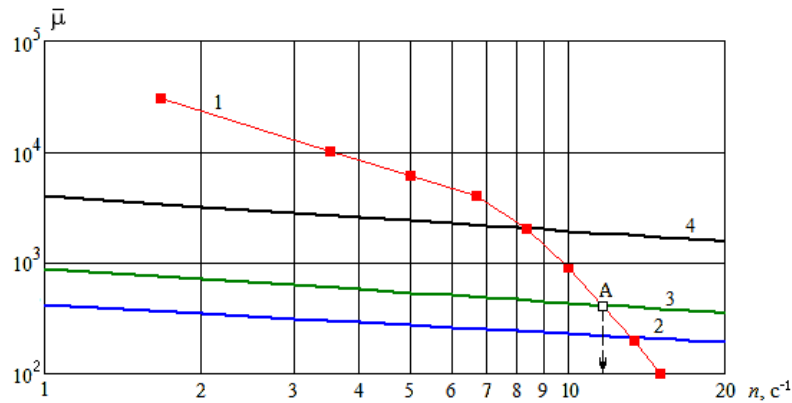


Рисунок 17 – Графики для определения допустимой ЧВР КН Vitalobe-215 при перекачивании трех образцов ПС (85°C): 1 – ограничения ЧВР КН Vitalobe-215; 2 – безразмерная эффективная динамическая вязкость (БЭДВ) ПС-2, 3 – ПС-3, 4 – ПС-4

Для разных образцов ПС и температур рассчитаны допустимые ЧВР и соответствующие им производительности, как например, для насосов Vitalobe-215 в таблице 2. Также, по таблице 2 видно: с увеличением температуры и частоты вращения ротора происходит существенное снижение вязкости ПС.

Таблица 2 – Допустимые ЧВР и соответствующие им подачи КН Vitalobe-215 для ПС-5

$t^{\circ}\text{C}$	$n_{\text{доп}}, \text{об/мин}$	$\bar{\mu}$	$Q_P=Q_T, \text{дм}^3/\text{с}$
65	196	12503	0,785
75	284	6723	1,13
85	468	2637	1,87
95	546	1492	2,18

Предложенный метод позволяет выбрать модель КН и ЧВР, обеспечивающие требуемую подачу, с учетом вязкости продукта и ограничений производителя.

Разработан метод выбора оптимального диаметра трубопровода с учётом вязкости продукта, характеристик насоса и экономических факторов (стоимость оборудования, электроэнергии, труб).

Была установлена линейная зависимость стоимости труб из нержавеющей стали от внутреннего диаметра:

$$C_{\text{pipe}} = B_0 \cdot d \cdot L = \Psi(d) \cdot L, \quad (15)$$

где коэффициент в $B_0 = 19$ тыс. руб/м².

Формула приведенных годовых затрат:

$$C_j = F(r, k) \cdot (CP_j + B_0 \cdot d \cdot L + z \cdot N_j \cdot t_0 \cdot Y)$$

Задачу оптимизации решаем следующим образом. Для заданного расхода и ряда диаметров вычисляется ЧВР, обеспечивающая этот расход в РТНУ:

$$\psi_1(n_0, \varphi(Q_0, d_i)/P_A, \mu b(n_0, T)) = Q_0$$

Для найденных n и d вычисляется потребляемая мощность N

$$N_i = \psi_2(n_{0i}, \varphi(Q_0)/P_A, \mu b(n_{0i}, T))$$

Рассчитываются приведенные годовые затраты по

$$C_j = F(r, k) \cdot (CP_j + B_0 \cdot d \cdot L + z \cdot N_j \cdot t_0 \cdot Y)$$

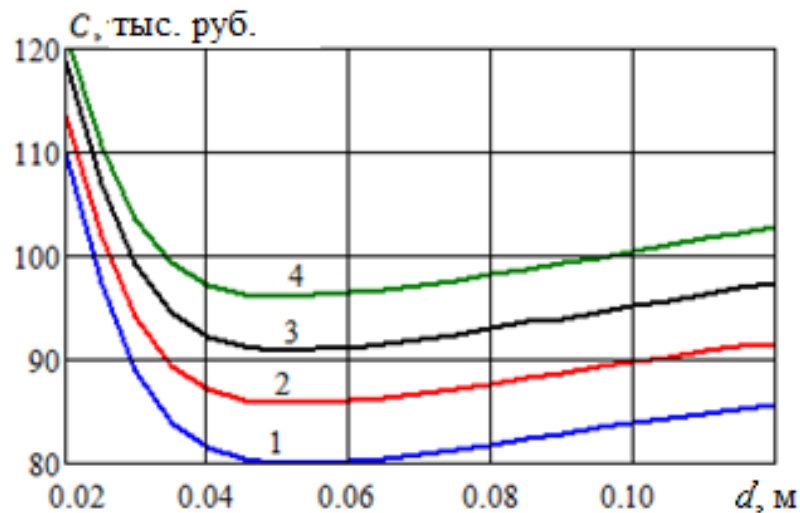


Рисунок 18 – Зависимость приведенных годовых затрат от диаметра трубопровода при $Q_0=1,2 \text{ дм}^3/\text{с}$, $t_0=8$ час и различных КН: 1 – КНП-20, 2 – КНП-30, 3 – КНП-36, 4 – КНП-52

Оптимальный диаметр d находится как точка минимума функции затрат C . При этом необходимо учитывать ограничения, накладываемые на ЧВР для ПС с большой вязкостью. Одновременно подбирается насос, обеспечивающий наименьшее значение стоимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее диссертационное исследование посвящено повышению эффективности межоперационного трубопроводного транспортирования ПС. Это достигается путем разработки методики гидравлического расчета систем с КН, в которой комплексно учитываются реологические свойства продукта и рабочие характеристики оборудования.

В результате выполненной работы поставленная цель достигнута, задачи исследования решены:

1. В ходе выполнения анализа выявлен дефицит исследований, посвященных повышению эффективности эксплуатации существующих КН, в отличие от работ по конструированию новых агрегатов. Систематизирована и научно обоснована проблема недостаточной изученности гидравлического расчета систем транспортирования неньютоновских пищевых сред (на примере ПС) с учетом реологии продукта и характеристик выпускаемого насосного оборудования. Показано, что большинство существующих методик ориентированы на ньютоновские жидкости и не учитывают специфику псевдопластичного поведения ПС, что приводит к существенным погрешностям при проектировании систем транспортирования.

2. Разработаны и научно обоснованы математические модели, описывающие рабочие характеристики КН при перекачивании вязких неньютоновских сред, в которых учтены зависимости эффективной вязкости степенной жидкости (к которой относится ПС) от скорости сдвига (частоты вращения ротора КН), что принципиально отличает их от существующих моделей, применимых лишь к ньютоновским жидкостям. Адекватность разработанных моделей подтверждена высокими значениями коэффициента детерминации (не менее 0,97) при сравнении с экспериментальными данными производителей. Модели могут быть использованы для расчета производительности и энергопотребления КН различных марок при условии наличия базовых характеристик на воде и ограниченного числа экспериментальных точек для учета влияния вязкости.

3. Установлена и исследована зависимость энергетической эффективности КН от вязкости перекачиваемой среды. Обнаружено, что с ростом вязкости показатели эффективности (η и E) проходят через экстремум, что позволило обосновать задачу оптимизации параметров по критерию энергоэффективности. Выявлено, что для маловязких сред (молоко, соки) при ЧВР

~1000 об/мин наилучший показатель удельных энергозатрат демонстрируют насосы серии WCB, тогда как для вязких сред с вязкостью ≥ 3 Па·с наиболее эффективны агрегаты линейки Vitalobe. Разработан метод приведения нагрузочных характеристик КН различных производителей к безразмерному виду, позволивший провести их корректное сравнение. Установлено, что при безразмерном параметре вязкости более 600 разница в производительности между исследованными моделями становится менее 1%. Также определено, что минимально необходимая ЧВР снижается при увеличении безразмерной динамической вязкости и уменьшении безразмерного перепада давления. Для российских КН серии КНП, по которым отсутствуют подробные испытания, предложен метод аналогий, позволяющий оценить их рабочие характеристики на основе данных зарубежных аналогов с близким рабочим объемом.

4. Создана комплексная методика и алгоритм гидравлического расчета системы трубопроводного транспортирования ПС с КН, реализованные в виде специализированного программного обеспечения. Методика позволяет количественно оценивать влияние комплекса взаимосвязанных факторов: реологических параметров ПС (зависящих от состава и температуры), конструктивных особенностей КН, геометрии трубопровода и ЧВР на производительность, затрачиваемую мощность и ПУЭЗ. Научно обосновано, что для оценки энергоэффективности системы транспортирования ПС в рабочей точке насосной установки необходимо использовать критерий ПУЭЗ, а не гидравлический КПД. Доказано, что рост гидравлического КПД в данной системе может свидетельствовать об увеличении бесполезных потерь на трение, в то время как ПУЭЗ однозначно отражает реальные удельные затраты энергии на перемещение продукта. На основе разработанного алгоритма проведены численные исследования влияния решающих параметров: установлено, что изменение диаметра трубопровода с 36 до 50 мм при прочих равных условиях снижает ПУЭЗ на 21 %, а повышение температуры ПС с 75 до 95 °С снижает ПУЭЗ на 41 %.

5. На основе разработанных моделей получены и систематизированы практические рекомендации по ограничению частоты вращения ротора КН при перекачивании конкретных образцов ПС в зависимости от их температуры и реологических свойств, например, при использовании насоса Vitalobe-220 для подачи ПС-1 при температуре 85°С ЧВР не должна превышать 912 об/мин, а при подаче ПС-5 при той же температуре ограничение составляет 502 об/мин. Сформулированы критерии выбора конкретных серий насосов: для вязких сред (например, ПС-4 или ПС «Советский») наиболее энергоэффективными являются насосы серии Vitalobe, в то время как для маловязких сред при высоком безразмерном перепаде давления ($p > 10$) целесообразно использование КН WCB, JRZL или PLP. Предложен метод определения оптимального диаметра трубопровода по критерию минимума приведенных затрат. Установлено, что при высоких тарифах на электроэнергию экономически оправдано увеличение диаметра для снижения гидравлических потерь, а использование теплоизоляции позволяет сохранять температуру продукта и снижать затрачиваемую мощность КН.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс при подготовке и выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Насосы и насосные станции», «Компьютерное моделирование в профессиональной деятельности» и в производство ПС (ООО «Плавит»).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

τ – касательное напряжение, Па; μ_e – эффективная динамическая вязкость (ЭДВ), Па·с; K – коэффициент консистенции жидкости, Па·с^m; ω – сдвиг (градиент) скорости, с⁻¹; n – частота вращения ротора, с⁻¹ или об/мин; n_{wo} – минимально необходимая частота вращения ротора для начала перекачивания воды, с⁻¹; n_0 – минимально необходимая частота вращения ротора для начала подачи произвольной жидкости, с⁻¹; V – рабочий объем коловратного насоса, объем жидкости, перекачиваемой за один оборот ротора при нулевом перепаде давления, дм³; Q –

объемный расход (подача, производительность) насоса, л/с, л/мин или м³/час; Q_T – теоретическая производительность, м³/час; N – затраченная мощность насоса, кВт; E – показатель удельных энергетических затрат, кДж/дм³; L – длина трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; C_j – приведенные годовые затраты.

Безразмерные величины. t – индекс течения (безразмерный показатель неньютоновского поведения жидкости); $\bar{\mu}$ – безразмерная эффективная динамическая вязкость; $\bar{n}$ – безразмерная частота вращения ротора; p – безразмерный перепад давления; q – безразмерная подача насоса; α , B_0 , B_1 , β – эмпирические коэффициенты, найденные с помощью метода наименьших квадратов; θ – эмпирический показатель степени; Θ – безразмерный коэффициент, зависящий от типа местного гидравлического сопротивления и его безразмерных параметров.

Основные положения диссертации опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Наумов В.А., Левичева О.И. Оценка энергетической эффективности центробежных насосов для пищевой промышленности // Известия КГТУ. 2021. № 63. С. 89-100.
2. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Критерии подобия установок для перекачивания маловязких пищевых жидкостей вихревыми насосами // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 78-88.
3. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Гидравлический расчет технологического трубопровода для перекачивания молочных продуктов центробежным насосом // Вестник КрасГАУ. 2022. № 5(182). С. 216-225.
4. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на производительность кулачковых насосов (на примере перекачивания рыбного жира) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 3. С. 74-81.
5. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на энергетическую эффективность кулачковых насосов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. № 5-6 (394). С. 83-93.
6. Левичева О.И. Анализ рабочих характеристик коловратного насоса при перекачивании пищевых жидкостей с высокой вязкостью // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т. 10. С. 24-32.
7. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Оценка рабочих характеристик установок для подачи высоковязких пищевых масс с помощью кулачковых насосов российского производства // Известия КГТУ. 2024. № 72. С. 41-56.
8. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Гидравлический расчет системы подачи плавленого сыра кулачковым насосом // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6 (207). С. 146-156.
9. Наумов В.А., Левичева О.И. Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 67-80.
10. Левичева О.И. Усовершенствование аналитической модели нагрузочных характеристик пищевых коловратных насосов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т.11. № 1. С. 18–27.
11. Наумов В.А., Левичева О.И. Допустимая частота вращения ротора коловратного насоса при транспортировании плавленых сыров // Сыроделие и маслоделие. 2025. № 3. С. 30-35.

Патент на полезную модель:

12. Стенд для испытания коловратного насоса: пат. 237266 Российская Федерация, МПК F04B 51/00 / О.И. Левичева, В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова; заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет. – № 2025109367; заявл. 15.04.2025; опубл. 17.09.2025. – Бюл. № 26.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

13. Программа расчета гидравлической системы транспортирования плавленого сыра по трубопроводу с помощью коловратного насоса: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2024684276 РФ / В.А. Наумов, **О.И. Левичева** заявитель и правообладатель Калининградский государственный технический университет. – № 2024682516; заявл. 30.09.2024; зарегистр. 16.10.2024, опубл. 16.10.2024.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

14. Наумов В.А., **Левичева О.И.** Особенности рабочих характеристик вихревых насосов, применяемых в пищевой промышленности // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2021. Т. 7. № 4. С. 26-32.

15. Akhmedova N.R., **Levicheva O.I.**, Naumov V.A. Calculation algorithm for non-stationary pumping of liquid foodstuffs by a centrifugal pump with an open impeller // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2373, ID 072001. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/7/072001.

16. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., **Левичева О.И.** Расчет гидравлических потерь при транспортировке плавленого сыра по трубопроводу // X Балтийский морской форум (Калининград, 26 сентября – 1 октября 2022 г). Национальная научная конференция с международным участием: тезисы докладов. Т. I. Калининград: Изд-во БГА РФ, 2022. С. 131-137.

17. **Левичева О.И.** Гидравлическая схема технологического трубопровода и характеристики кулачкового насоса для транспортировки плавленого сыра // X Балтийский морской форум (Калининград, 26 сентября – 1 октября 2022 г). Национальная научная конференция с международным участием: тезисы докладов. Т. VII. Калининград: Изд-во БГА РФ, 2022. С. 143-148.

18. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., **Левичева О.И.** Энергетические затраты кулачкового насоса на перекачивание плавленого сыра // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы V Международной научно-технической конференции (18-21 октября 2022 г.). Секция 2. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчат ГТУ, 2022. С. 41-44.

19. Наумов В.А., **Левичева О.И.** Некоторые проблемы исследования и подбора оборудования для производства плавленых сыров: краткий обзор // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9. №3. С. 27–42.

20. **Левичева О.И.** Изменение вязкости плавленого сыра при лабораторном моделировании условий производственного процесса // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9, № 1. С.18-26.

21. Akhmedova N.R., **Levicheva O.I.**, Naumov V.A. Performance characteristics of rotary lobe pumps for high viscosity food medium. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1420. Iss. 1. ID 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/1420/1/012013.

22. Наумов В.А., **Левичева О.И.** Изменение рабочих характеристик коловратных насосов при перекачивании пищевых сред с большой вязкостью // Наука и практика – 2024: материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции (Астрахань, 18-23 ноября 2024 г.). Астрахань: Изд-во АГТУ, 2024. С. 471-474.

23. **Левичева О.И.** Алгоритм расчета гидравлической системы транспортирования плавленого сыра по трубопроводу с помощью коловратного насоса // XII Балтийский морской форум (Калининград, 30 сентября – 4 октября 2024 г). Национальная научная конференция с международным участием: тезисы докладов. Т. I. Калининград: Изд-во БГА РФ, 2024. С. 187-194.

24. Наумов В.А., **Левичева О.И.** Влияние вязкости пищевых масс на подачу коловратных насосов китайского производства // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современные процессы в пищевых производствах и

инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов» (Сочи, 4-8 января 2025 г.). Керчь: Изд-во Керченского ГМТУ, 2025. С. 255-260.

25. Наумов В.А., **Левичева О.И.** Нагрузочная характеристика пищевых коловратных насосов большой производительности // Материалы V Международного Косыгинского форума, научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики» (Москва, 15-16 октября 2025 г.). Москва: Изд-во РГУ им. А.Н. Косыгина, 2025. С.52-56.

26. Наумов В.А., **Левичева О.И.** Сравнительная оценка производительности коловратных насосов разных компаний для технологии молочной продукции // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Сборник статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции (Краснодар, 13 мая 2025 г.). Краснодар: Изд-во Кубанского ГАУ, 2025. С. 122-127.

Подписано в печать 06.07.2026 г. Формат 60 x 84 1/16

Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № 114

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»). Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «КГТУ»

236022, г. Калининград, Малый переулок, д. 32