

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ПОРТНОВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ
ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА СВИНЬИ

Специальность: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного
комплекса (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор РАН, профессор
Д.В. Рудой

Ростов-на-Дону – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Современные проблемы развития отечественного животноводства	12
1.2 Анализ существующих конструктивно-технологических схем систем иЖКТ животных.....	18
1.3 Анализ способов и технических средств перемешивания гетерогенных сред в биореакторах иЖКТ	35
1.4 Выводы по первой главе. Цель и задачи исследования	56
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ХИМУСА	58
2.1 Реологическое обоснование и математическая модель течения химуса свиньи в реакционном объеме биореактора.....	58
2.2 Теоретический расчет крутящего момента гидродинамического сопротивления перемешивающего устройства.....	67
2.3 Математическая модель силового взаимодействия магнитной системы и условие устойчивости вращения без срыва момента.....	74
2.4 Выводы по второй главе.....	81
3 ПРОГРАММА, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	83
3.1 Цель и программа лабораторных исследований.....	83
3.2 Техническое задание и общая концепция экспериментальной установки	84
3.3 Конструкция магнитно-лопастного перемешивающего устройства.....	98
3.3 Методика проведения валидации установки при длительном культивировании микробиоты.....	100
3.4 Методика лабораторной вискозиметрии и калибровка модели химуса методом сглаженных частиц.....	101

3.5 Методика многофакторного вычислительного эксперимента и постановка задачи оптимизации.....	107
3.6 Выводы по третьей главе	112
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЖКТ СВИНЕЙ.....	113
4.1 Конструкция реакционной емкости и герметичного магнитно-лопастного перемешивателя	113
4.2 Результаты численного моделирования гидродинамических полей и крутящего момента методом сглаженных частиц.....	114
4.3 Опыт применения лабораторного прототипа системы имитации ЖКТ свиньи в экспериментальных исследованиях (валидация установки)	120
4.4 Статистическая обработка результатов моделирования методом сглаженных частиц и аналитическая оптимизация.....	124
4.5 Валидация однородности перемешивания.....	128
4.6 Оценка перевариваемости и усваиваемости комбикормов с помощью экспериментального образца системы ИЖКТ.....	132
4.7 Выводы по четвертой главе	142
5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЖКТ СВИНЕЙ	145
5.1 Общие положения и методология экономического обоснования	145
5.2 Расчет капитальных затрат на создание автоматизированной системы ИЖКТ	146
5.3 Сравнительный расчет себестоимости проведения испытаний.....	149
5.4 Расчет годового экономического эффекта и срока окупаемости.....	153
5.5 Выводы по пятой главе.....	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	159
Приложение А. Акты внедрения, патенты.....	172
Приложение Б. Дипломы и сертификаты участия в конференциях, выставках и форумах	182

Приложение В. Фрагмент программы.....	184
Приложение Г. Фрагмент программы	187
Приложение Д. Параметры модели гидродинамики перемешивания	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Свиноводство является стратегически значимым сектором животноводческого комплекса Российской Федерации, обеспечивающим продовольственную безопасность страны и самообеспеченность высококачественным белком животного происхождения [3, 31]. В условиях санкционных ограничений, роста стоимости кормового сырья на 50–60% и высокой доли кормовых затрат в структуре себестоимости продукции (до 70–80%) [3, 19, 67] значение приобретает оперативная и воспроизводимая оценка качества комбикормов, премиксов и перспективных кормовых добавок.

При этом химический состав комбикорма не всегда позволяет оценить, насколько эффективно организм животного использует содержащиеся в нем питательные вещества. Для этого учитывают их переваримость, то есть долю компонентов рациона, которая становится доступной для всасывания и обменных процессов. Этот показатель связан с фактической кормовой ценностью рациона и влияет на продуктивность свиней, конверсию корма и экономическую эффективность производства [76, 98, 91, 102].

Традиционные методы оценки переваримости и питательности кормов *in vivo* (опыты на живых свиньях) требуют значительных финансовых затрат, длительных сроков проведения (от 3 до 12 месяцев), а также связаны с рисками нарушения биобезопасности (вспышки АЧС) и несоблюдением международных этических норм (концепция 3R: замены животных альтернативными методами (Replacement), сокращения числа используемых животных (Reduction) и совершенствования методик проведения исследований для минимизации боли и стресса (Refinement) [20, 22, 92, 94]. Перспективным решением данной проблемы является внедрение в лабораторную практику автоматизированных систем имитации пищеварительного тракта свиней *in vitro*, позволяющих моделировать pH,

температуру, ферментативную активность и микробиоту в контролируемых условиях [77, 80, 99].

Международная практика подтверждает возможность применения искусственных систем желудочно-кишечного тракта животных для первичного скрининга кормовых компонентов и добавок. Так, на платформе CJ BIO для оценки кормов и здоровья животных (CJ BIO Animal Nutrition and Health Application Platform, Республика Корея), проведена оценка переваримости кормового сырья, действия ксиланазы и фитазы, а также доступности питательных веществ в многоступенчатой *in vitro*-системе, имитирующей пищеварение свиньи. Авторы рассматривают такие системы как инструмент отбора перспективных кормовых компонентов и добавок до проведения исследований *in vivo* [93]. Аналогичные задачи решаются в динамической модели Baby-SPIME (Бельгия) [86] для оценки кормовых стратегий поросят в период отъема и в модели MPigut-IVM (Франция) [87], использованной для исследования влияния кормовых ингредиентов на микробиоту и образование скатола у взрослых свиней.

Исследования соответствуют Указу Президента РФ от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий» [39], целям национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», стратегии научно-технологического развития РФ (Указ №145 от 28.02.2024) [55] и федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства до 2030 г. Исследования также соответствуют задачам национального проекта «Технологическое обеспечение биоэкономики», ориентированного на развитие биотехнологий и их внедрение в сельское хозяйство и пищевую индустрию [58]. Полученные результаты вносят вклад в решение этих задач за счет разработки отечественной автоматизированной *in vitro*-системы для моделирования процессов пищеварения и оценки кормовых компонентов и добавок.

Степень разработанности темы. Вклад в развитие *in vitro*-методик оценки переваримости кормов, созданию и совершенствованию искусственных моделей желудочно-кишечного тракта животных и их применению в ветеринарной медицине, свиноводстве, аквакультуре и птицеводстве внесли отечественные и зарубежные ученые: Чикиндас М.Л., Фролов В.Ю. Ермаков А.М., Шебеко С.К., Рудой Д.В., Ханукаев М.М., Дускаев Г.К., Левахин Г.И., Нуржанов Б.С., Мещеряков А.Г., Todorov S.D., Venema K., Czerkawski J., Duysburgh C., Marzorati M. и др. [60, 73, 77, 80, 96, 97, 99, 107]. Вклад в исследование вопроса производства кормов для животных, птиц и рыб, подбора оборудования и обоснования технологий приготовления комбикормов внесли зарубежные и отечественные ученые: Брагинец С.В., Бурмага А.В., Глобин А.Н., Иванов Ю.А., Груздев И.Э., Доценко С.М., Кичигин В.П., Коновалов В.В., Кошевой Е.П., Класнер Г.Г., Мальцева Т.А., Масликов В.А., Мельник Г.Е., Морозов В.С., Пахомов В.И., Пономарев С.В., Пономарева Е.Н., Рудой Д.В., Садов В.В., Скрипин А.И., Толчинский А.М., Фролов В.Ю., Хозяев И.А., Шенкель Г., Яковлев Д.А., Anderson R.T., Mrema G.C., Shook C.A., Shirato M.T. и другие [97, 98].

Цель работы – обоснование конструктивно-технологических параметров автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи с магнитно-лопастным перемешивающим устройством.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

1. Изучить существующие конструкции систем *in vitro*-моделирования желудочно-кишечного тракта и используемые в них способы перемешивания содержимого биореакторов.

2. Разработать математическую модель перемешивания вязкой неоднородной среды в автоматизированной системе имитации желудочно-кишечного тракта свиньи.

3. Провести численное моделирование на основе метода сглаженных частиц процесса перемешивания и определить конструктивно-

технологические параметры магнитно-лопастного перемешивающего устройства.

4. Провести экспериментальные исследования автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи для оценки однородности содержимого в биореакторе.

5. Оценить экономическую эффективность применения разработанной автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи в сравнении с традиционными испытаниями *in vivo*.

Рабочая гипотеза. Обоснование конструктивно-технологических параметров автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи обеспечит получение результатов *in vitro*-перевариваемости кормов, сопоставимых с данными *in vivo* при снижении затрат и сроков исследований.

Научная гипотеза. Существуют рациональные конструктивно-технологические параметры автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи, обеспечивающие получение результатов *in vitro*-перевариваемости кормов, сопоставимых с данными *in vivo*.

Объект исследования – технологический процесс имитации пищеварения в желудочно-кишечном тракте свиньи с помощью автоматизированной системы.

Предмет исследования – конструктивно-технологические зависимости процесса имитации пищеварения в желудочно-кишечном тракте свиньи с помощью автоматизированной системы.

Научная новизна заключается: в разработке принципиальной схемы экспериментального образца автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи; в разработке математической модели процесса перемешивания вязкой неоднородной среды в биореакторе, связывающей параметры лопастей, реологические свойства вязкой неоднородной среды и крутящим моментом; в установлении параметрических

зависимостей и конструктивных особенностей работы автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели перемешивания вязкой неоднородной среды магнитно-лопастным перемешивающим устройством в биореакторе автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи, устанавливающей аналитическую зависимость между конструктивно-технологическими параметрами перемешивающего устройства, реологическими свойствами среды и гидродинамическими характеристиками процесса.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке новой принципиальной схемы автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи;
- в разработке экспериментального образца автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи;
- в валидации работы автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи;
- в создании комплекса программного обеспечения для автоматического регулирования pH, температуры (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025693481);
- в создании программного модуля управления режимами перемешивания (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2026617349).

Методология и методы исследования. Теоретические исследования основаны на законах гидродинамики неньютоновских жидкостей, теоретической механики, теоретических основах магнетизма, методах математической статистики и многофакторного планирования экспериментов. Численное моделирование выполнено на основе метода сглаженных частиц. Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде с использованием ротационной вискозиметрии, оптической микроскопии

микропрепаратов. Обработка данных осуществлялась в программах STATISTICA 13.3, Microsoft Excel и КОМПАС-3D.

Положения, выносимые на защиту:

- принципиальная схема экспериментального образца автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи со специализированным программным обеспечением управления;
- математическая модель процесса перемешивания вязкой неоднородной среды в биореакторе, связывающая параметры лопастей, реологические свойства среды и крутящий момент магнитно-лопастного перемешивающего устройства;
- принципиальные конструктивно-технологические параметры магнитно-лопастного перемешивающего устройства;
- валидированная система имитации желудочно-кишечного тракта свиньи, обеспечивающая воспроизводимость процессов пищеварения и позволяющая проводить оценку перевариваемости кормов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность исследований подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных данных, внедрением результатов исследований в АО «Батайское», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский ветеринарный институт патологии, фармакологии и терапии» и ФБУН «Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора. Материалы исследований используются в учебном процессе кафедры «Техника и технологии пищевых производств» факультета «Агропромышленный»; кафедр «Биология и общая патология» и «Биотехнические и медицинские системы и технологии» Института живых систем Донского государственного технического университета.

Результаты исследования представлены на международных научно-практических конференциях, молодежных форумах и выставках: «Инновационные технологии в науке и образовании» (с. Дивноморское, 2025-2026 г.); «Методы, средства и технологии получения и обработки

информации» (г. Пенза, 2025 г.); «Молодежь в АПК» (г. Ростов-на-Дону, 2025 г.); «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса» (г. Ростов-на-Дону, 2026 г.); «Фундаментальные научно-практические исследования: теоретические и практические аспекты» (г. Анапа, 2026 г.); «Русская наука в современном мире» (г. Москва, 2026 г.) (Приложение Б).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, получено 2 свидетельства на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка использованной литературы, включающего 112 наименований и приложений на 20 страницах. Диссертация изложена на 191 странице, содержит 16 таблиц и 40 рисунков.

Ряд научных исследований по теме диссертации выполнены в рамках реализации государственного задания по проекту «Молекулярные механизмы взаимодействия сообществ кишечных микроорганизмов *in vivo* и *in vitro* на базе автоматизированной системы имитации ЖКТ свиньи» (номер ЕГИСУ НИОКР 124111200008-4).

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Современные проблемы развития отечественного животноводства

Современный этап функционирования свиноводческого комплекса Российской Федерации характеризуется масштабированием промышленного производства при одновременном возрастании ресурсной нагрузки на предприятия [3, 31]. В этих условиях кормовая база выступает определяющей статьей затрат, формируя от 70 до 80 % совокупной себестоимости свинины [3, 19, 67]. Как подчеркивает Г. М. Бажов [3], «в условиях промышленной технологии полноценное кормление свиней является главным фактором, определяющим не только продуктивность животных, но и оплату корма продукцией, сохранность поголовья и общую рентабельность отрасли». Нарушение сбалансированности рационов по макро- и микронутриентам приводит к росту удельного расхода кормов на единицу привеса и падению продуктивности поголовья [24, 61].

Высокая экономическая значимость кормов обусловлена масштабами их использования в промышленном животноводстве. По данным Росстата (рисунок 1.1), в 2025 году общий объем производства комбикормов составил 36,8 млн т, увеличившись на 1,2% по сравнению с предыдущим годом. Наибольшие объемы пришлось на корма для сельскохозяйственной птицы — 17,1 млн т, и свиней — 16,2 млн т. Производство комбикормов для крупного рогатого скота составило 3,2 млн т [21].

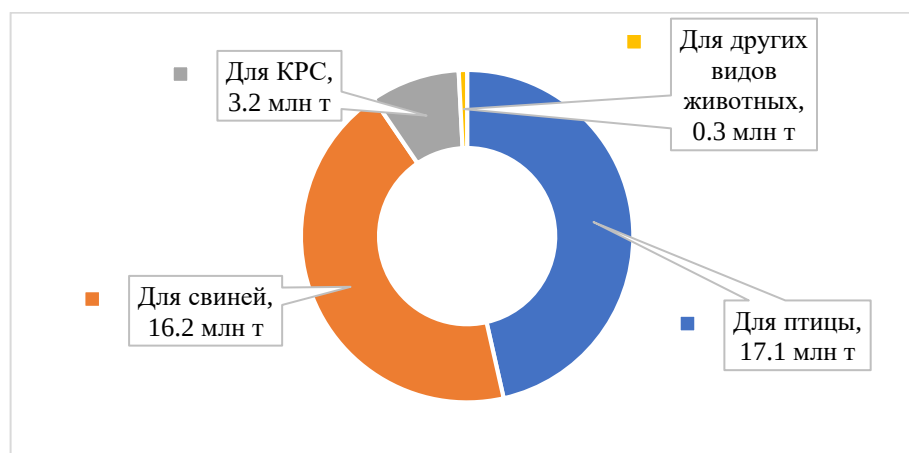


Рисунок 1.1 – Объем производства комбикормов в Российской Федерации по видам сельскохозяйственных животных в 2025 г.

Таким образом, свиноводство формирует один из крупнейших сегментов российского рынка комбикормов – около 44% производства основных видов комбикормов, при этом прирост данного сегмента в 2025 году составил лишь 0,6%. Замедление темпов роста отрасли повышает требования не столько к дальнейшему увеличению объемов производства кормов, сколько к эффективности их использования, точности балансирования рационов и объективности оценки питательной ценности.

Дополнительную экономическую значимость этой проблемы определяет рост стоимости основных компонентов рационов. Удорожание зерновых и белковых компонентов на 50–60% обусловило повышение себестоимости выращивания свиней на 20–50% [19, 59]. В исследовании Ф. И. Чечеля и А. Т. Стадника [67] отмечается: «рост затрат на кормовую базу при опережающей динамике цен на белковые компоненты формирует ключевой барьер для обеспечения плановой рентабельности свиноводческих комплексов». В связи с этим возникает необходимость непрерывной оптимизации рецептур полнорационных комбикормов за счет ввода альтернативных источников протеина и биологически активных веществ [17, 26].

Вместе с тем сопоставление объемов производства кормов недостаточно для оценки реальной нагрузки кормовой составляющей на животноводческие предприятия. Важное значение имеет потребление комбикорма в расчете на одну голову, которое характеризует масштабы использования кормов и позволяет учитывать видовые различия в организации кормления. Как показывает рисунок 1.2, потребление комбикорма в расчете на одну голову существенно различается у свиней, птицы и крупного рогатого.

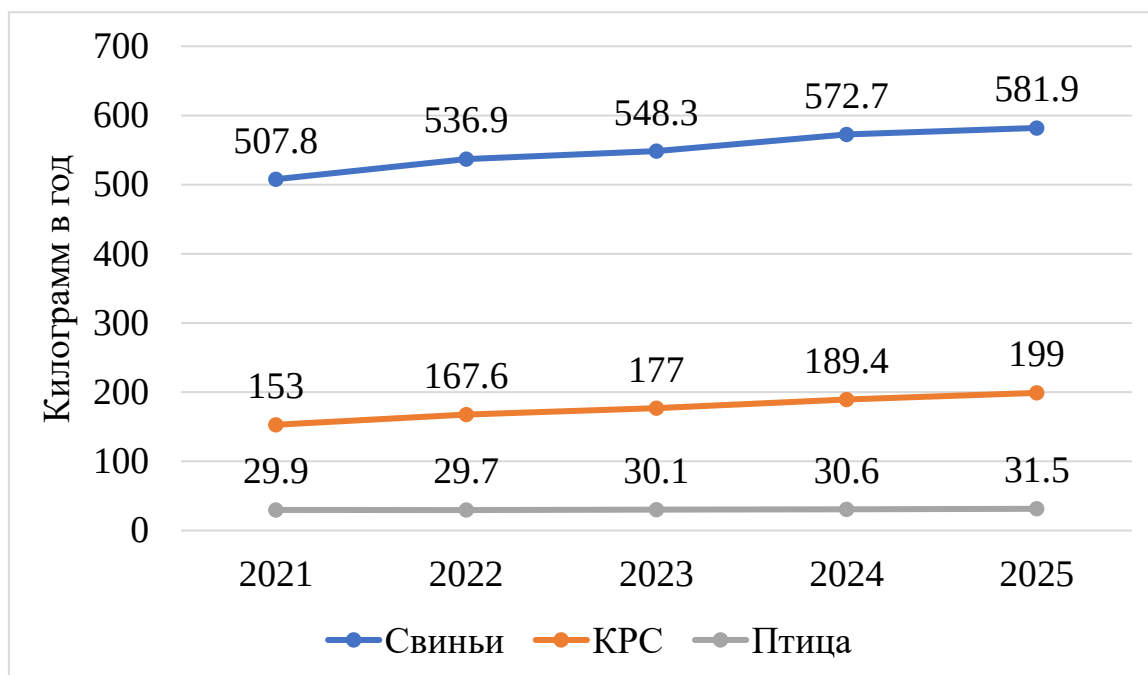


Рисунок 1.2 – Потребление комбикормов в расчете на одну голову сельскохозяйственных животных

Эти различия связаны с видовой спецификой пищеварения, живой массой животных, продолжительностью производственного цикла, структурой рационов и уровнем продуктивности. Следовательно, оценка питательной ценности и переваримости комбикормов должна проводиться с учетом особенностей конкретного вида животных. Результаты, полученные для птицы или крупного рогатого скота, не могут автоматически переноситься на свиней.

В связи с этим возникает необходимость не только оптимизации рецептов полнорационных комбикормов, но и экспериментальной оценки

доступности и переваримости питательных веществ в условиях, максимально приближенных к пищеварению свиней.

Особую актуальность данное положение приобретает при разработке и внедрении новых кормовых компонентов и добавок. Отрасль сохраняет зависимость от импорта ряда критических микроингредиентов, включая ферменты, витаминные комплексы и синтетические аминокислоты — лизин, метионин и треонин. Как указывает С. В. Соляник [54], «премиксы и белково-витаминно-минеральные концентраты выступают базовыми элементами балансирования рационов, дефицит которых непосредственно ведет к перерасходу зернового сырья и снижению продуктивности молодняка». Ускоренная разработка и вывод на рынок отечественных аналогов кормовых добавок требуют систематической оценки их переваримости, доступности питательных веществ и влияния на метаболические процессы [23, 52].

Таким образом, современная кормовая проблема свиноводства включает одновременно экономический и научно-методический аспекты: с одной стороны, необходимо оптимизировать расходы на дорогостоящие кормовые компоненты, а с другой — достоверно определить, насколько полно питательные вещества усваиваются организмом животного. Традиционная апробация новых рационов базируется на проведении зоотехнических и физиологических опытов *in vivo* на свиньях.

Проведение таких исследований сопряжено с существенными финансовыми и организационными затратами. Опыт на группах животных численностью 50–100 голов продолжительностью от 1 до 6 месяцев требует значительных расходов на содержание и кормление животных, оплату труда персонала и выполнение лабораторных анализов [36, 41]. По оценке О. Е. Самсоновой [31], «основным фактором, определяющим уровень мясности после генотипа, является качество кормов», однако получение достоверных статистических данных в натурных экспериментах затруднено высокой вариабельностью физиологических реакций животных.

Существенным ограничением для крупномасштабных испытаний *in vivo* являются риски биологической безопасности [52]. Циркуляция возбудителей инфекционных болезней, в первую очередь африканской чумы свиней (АЧС), создает угрозу распространения эпизоотий при перемещении и содержании опытного поголовья, что может приводить к вынужденному уничтожению животных и срыву исследовательских программ [41, 52].

Дополнительным ограничением выступают международные и отечественные нормы биоэтики [20, 22]. В соответствии с принципами 3R (замены животных альтернативными методами (Replacement), сокращения числа используемых животных (Reduction) и совершенствования методик проведения исследований для минимизации боли и стресса (Refinement)), закрепленными в этических стандартах, требуется минимизировать привлечение живых объектов в эксперименты [92]. Как отмечает J. Koper [94], «концепция 3R предписывает последовательное замещение классических испытаний на животных стандартизированными лабораторными тест-системами, воспроизводящими ключевые физиологические параметры желудочно-кишечного тракта».

Необходимостью ускоренного тестирования новых кормовых компонентов и ограничениями натурных испытаний обуславливает потребность в развитии методов оценки *in vitro* [77, 80]. Внедрение автоматизированных систем имитации искусственных желудочно-кишечных трактов (иЖКТ), воспроизводящих ферментативные, температурные, кислотно-основные и гидродинамические условия естественного пищеварения, позволяет сократить продолжительность исследований до нескольких суток при обеспечении контролируемости и воспроизводимости экспериментальных условий [77, 84, 99].

Вместе с тем разработка отечественных автоматизированных систем иЖКТ животных, особенно предназначенных для моделирования пищеварения моногастричных животных, сталкивается с рядом инженерно-технических ограничений. Одной из ключевых проблем является создание

реакционных емкостей, способных длительное время воспроизводить физиологические параметры пищеварения при перемешивании высоковязких неньютоновских сред и сохранении герметичности рабочего объема.

Основное техническое противоречие заключается в необходимости одновременно обеспечить эффективную циркуляцию свиного химуса и исключить поступление кислорода в анаэробную среду. Использование традиционных лабораторных магнитных мешалок с донным якорем может приводить к срыву магнитной связи, образованию застойных зон и прекращению перемешивания. Применение погружных лопастных мешалок с проходным валом, напротив, требует динамического уплотнения, которое усложняет конструкцию реактора и создает риск нарушения его герметичности. Использование внешних циркуляционных насосов также ограничивается возможностью засорения коммуникаций твердыми частицами корма и снижением физиологического подобия моделируемого процесса.

Таким образом, возникает необходимость разработки отечественной модульной автоматизированной системы иЖКТ свиней, обеспечивающей устойчивое перемешивание высоковязкого химуса при сохранении герметичности анаэробного объёма. Достижение этого требует решения комплекса конструктивно-технологических задач, связанных с выбором схемы системы, способа перемешивания и обеспечения герметичности реакционного объёма. Для обоснованного выбора таких решений необходимо проанализировать существующие конструктивно-технологические схемы систем иЖКТ животных и применяемые в них технические средства перемешивания гетерогенных сред.

1.2 Анализ существующих конструктивно-технологических схем систем иЖКТ животных

Методы *in vitro*-моделирования пищеварения развивались от простых лабораторных инкубаторов до многокамерных автоматизированных систем непрерывного и полунепрерывного действия. Современные установки такого типа предназначены для воспроизведения в контролируемых условиях ключевых параметров пищеварения: движения среды, кинетики ферментативного расщепления, переноса питательных веществ, уровня pH и окислительно-восстановительного потенциала.

Существующие системы иЖКТ классифицируют по конструктивной сложности, способу воздействия на рабочую среду и степени соответствия анатомическим отделам пищеварительного тракта:

1. Полунепрерывные проточные аппараты моделирования рубцовой и толстокишечной ферментации (RUSITEC, ECSIM) [73, 105];
2. Многокамерные динамические каскадные комплексы с роторно-магнитным перемешиванием (SHIME, Baby-SPIME, SalmoSim) [73, 83, 85, 107];
3. Динамические реакторные платформы с иммобилизацией биомассы и моделированием мукозального слоя (PolyFermS, MPigut-IVM) [73, 96];
4. Динамические анатомо-механические и перистальтические комплексы с мембранной деформацией стенок и диализным массообменом (DIDGI, SIMGI, TIM-1, TIM-2, CALIMERO-2) [77, 80, 107, 110].

Ниже приведен инженерно-технический анализ конструкций и принципов функционирования основных мировых моделей иЖКТ с оценкой возможности их адаптации для воспроизведения процессов пищеварения свиней.

Полунепрерывные проточные аппараты моделирования рубцовой и толстокишечной ферментации

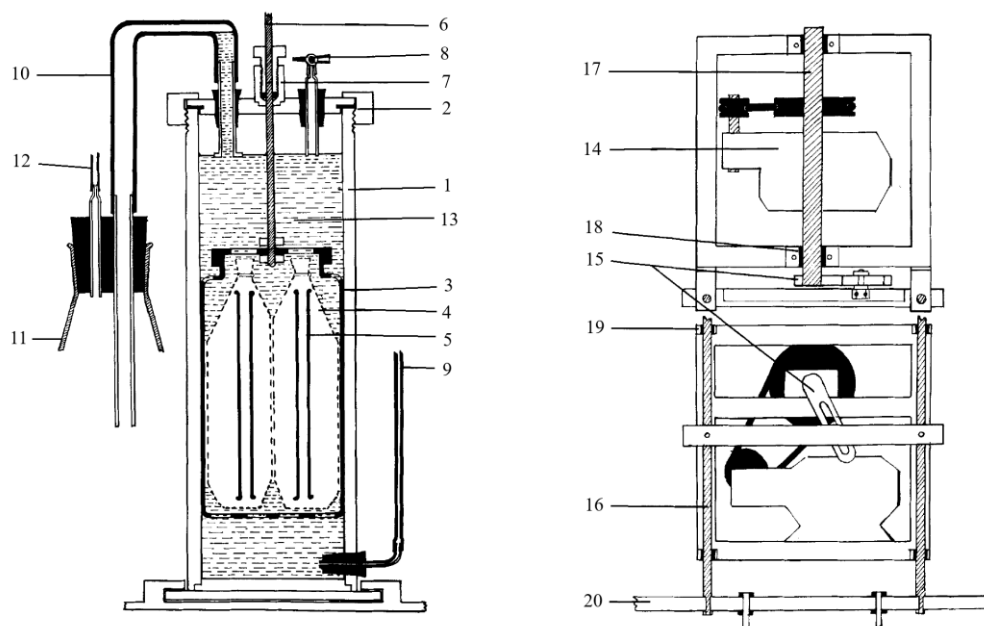
Модель RUSITEC (Rumen Simulation Technique – установка для моделирования рубцовой ферментации)

Общее описание и назначение. Аппаратный комплекс *RUSITEC* (рисунок 1.3) спроектирован для длительного воспроизведения анаэробных процессов микробного сбраживания растительных кормов в преджелудках жвачных животных при непрерывной подаче буферного электролита [105].

Принцип работы. В корпус 1 заливается культуральная жидкость 13, а в перфорированный контейнер 3 закладываются мешочки 4 с навесками исследуемого корма. После герметизации крышки фланцем 2 система продувается смесью газов (95 % N₂ + 5 % CO₂) через кран 8 для формирования анаэробной среды. Мотор-редуктор 14 через кривошип 15 сообщает возвратно-поступательное движение тягам 16 и траверсе 17, перемещая шток 6 с контейнером 3 вверх-вниз с амплитудой 50-80 мм и частотой 6-8 циклов/мин. При ходе контейнера 3 вниз жидкость 13 продавливается через перфорации трубок 5, омывая частицы корма 4. По магистрали 9 перистальтический насос непрерывно подает буферный раствор со скоростью разбавления 0,5-0,8 сут⁻¹. Избыток суспензии самотеком переливается через патрубок 10 в колбу 11, а образующийся биогаз по линии 12 отводится в газгольдер.

Преимущества. Стабильность рубцовой микробиоты.

Недостатки. Отсутствие анатомических компартментов, низкая частота циклов, непригодность для плотного свиного химуса.



1 – цилиндрический корпус реактора; 2 – верхняя крышка с резьбовым фланцевым зажимом; 3 – перфорированный контейнер для корма; 4 – сетчатые мешочки с образцами кормового субстрата; 5 – перфорированные распределительные трубки; 6 – приводной шток возвратно-поступательного перемещения; 7 – сальниковое уплотнение штока; 8 – трехходовой кран отбора проб газа и продувки; 9 – магистраль непрерывной подачи буферного раствора (искусственной слюны); 10 – переливной патрубок отвода эфлюента; 11 – приемная колба сбора эфлюента; 12 – газоотводная магистраль к газгольдеру; 13 – культуральная среда (рубцовая жидкость); 14 – электродвигатель с редуктором; 15 – кривошипно-кулисный механизм; 16 – вертикальные возвратно-поступательные тяги; 17 – распределительная траверса подвески штоков; 18 – опорные подшипники; 19 – направляющие втулки; 20 – распределительная траверса повестки штоков.

Рисунок 1.3 – Схема установки для моделирования рубцовой ферментации
RUSITEC

Многокамерные динамические каскадные комплексы с роторно-магнитным перемешиванием

Модель SHIME® (Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem – симулятор микробной экосистемы кишечника человека)

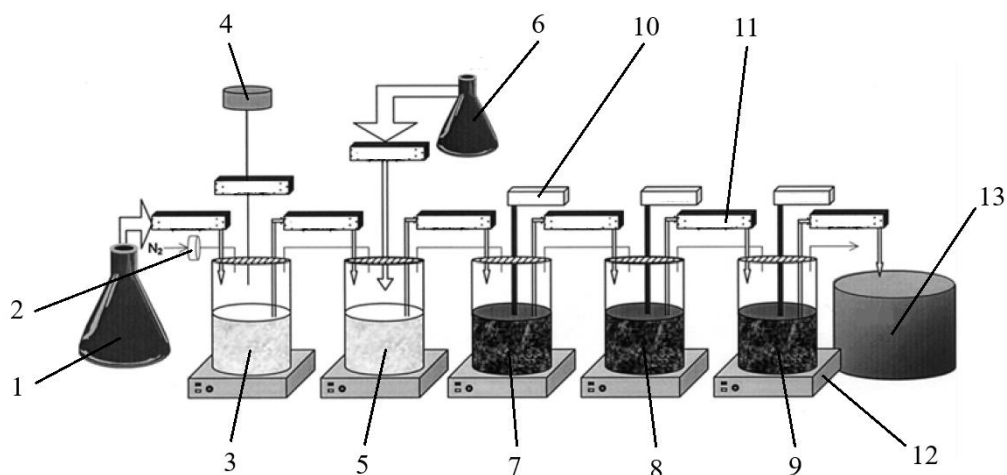
Общее описание и назначение. Автоматизированная пятимодульная каскадная система проточного типа SHIME (рисунок 1.4) предназначена для сквозного воспроизведения ферментативного гидролиза и микробиологической ферментации по всей длине пищеварительного тракта [83, 107].

Принцип работы. Питательная среда из емкости 1 насосом 11 подается в желудочный модуль 3, куда одновременно дозируется кислота из емкости 4 для достижения pH 2,0. После цикла гидролиза масса перекачивается в реактор 5 с одновременным вводом панкреатического сока и солей желчи из емкости 6 (нейтрализация до pH 6,5–7,0).

Далее суспензия поступает в каскад толстокишечных реакторов 7, 8 и 9, где поддерживается дифференцированный градиент активной кислотности: pH 5,6–5,9 в реакторе 7, pH 6,1–6,4 в реакторе 8 и pH 6,6–6,9 в реакторе 9. Титрование ведут насосы 11 по командам блоков 10. Перемешивание суспензий во всех объемах реализуется вращением магнитных якорей от магнитных мешалок 12. Удаление отработанного потока производится в сборник 13.

Преимущества. Полная имитация пяти отделов желудочно-кишечного тракта, воспроизведение градиента pH.

Недостатки. Срыв магнитного сцепления в вязких средах, образование гидродинамической воронки, истирание нерастворимых частиц корма.



1 – емкость с исходной питательной средой; 2 – магистраль подачи азота (N_2) со стерилизующим мембранным фильтром; 3 – реактор моделирования процессов желудочного пищеварения; 4 – емкость с раствором соляной кислоты (HCl); 5 – реактор тонкого кишечника; 6 – емкость со смесью панкреатического сока и желчи; 7 – реактор восходящей ободочной кишки; 8 – реактор поперечной ободочной кишки; 9 – реактор нисходящей ободочной кишки; 10 – автоматические блоки контроля и регулирования pH с измерительными электродами; 11 – дозирующие перистальтические насосы; 12 – лабораторные магнитные мешалки с донными якорями; 13 – емкость для сбора эффлюента (отходов).

Рисунок 1.4 – Принципиальная схема пятикамерного динамического симулятора желудочно-кишечного тракта *SHIME®*

Модель SalmoSim

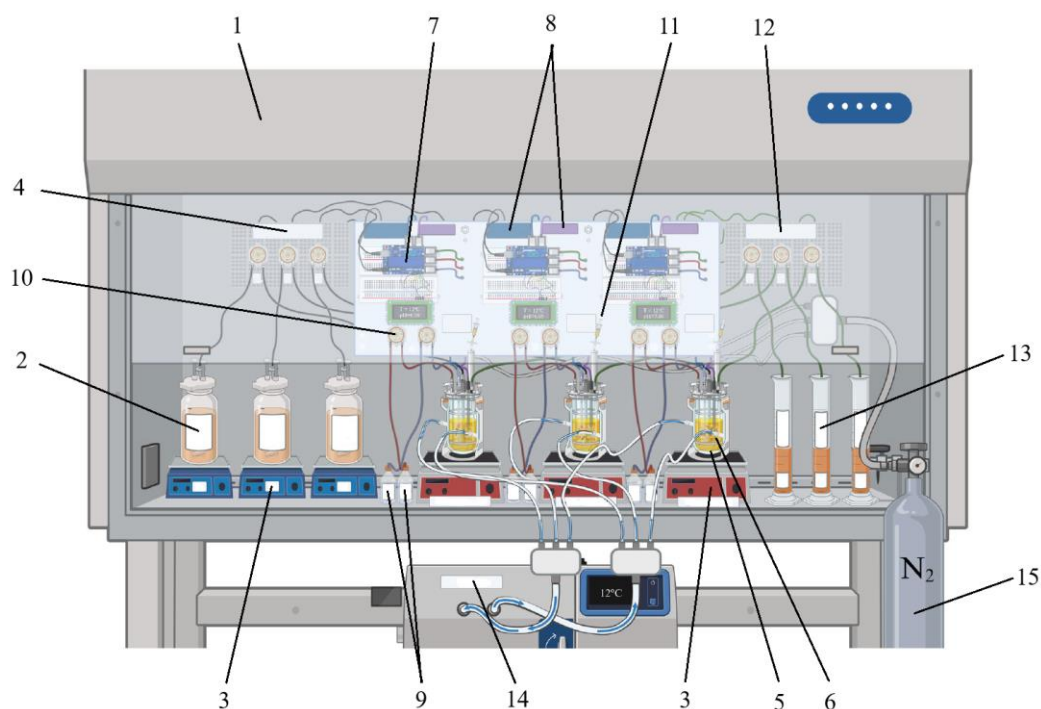
Общее описание и назначение. Автоматизированная трехкамерная динамическая система SalmoSim (рисунок 1.5) разработана для исследования микробиологических и гидродинамических процессов в пищеварительном тракте холодноводных рыб (атлантического лосося) [73].

Принцип работы. Кормовая смесь из емкостей 2 непрерывно перемешивается мешалками 3 и насосами 4 подается в реакторы 5 с объемным расходом 200 мл/сутки. Магнитные мешалки 3 поддерживают циркуляцию

суспензии через пористые элементы 6. Микроконтроллер 7 считывает сигналы датчиков 8 и включает микронасосы 10 для импульсного дозирования 0,1 М растворов HCl или NaOH из емкостей 9. Чиллер 14 прокачивает охлаждающую жидкость через рубашки реакторов 5, поддерживая температуру 12 °С. Эфлюент откачивается насосами 12 в цилиндры 13 для стабилизации рабочего объема на уровне 400 мл.

Преимущества. Охлаждение до 12°C, пористые матрицы для фиксации биопленок.

Недостатки. Неприменимость температурных режимов для теплокровных, срыв якоря в густых средах, кольматация пор полиуретановых губок.



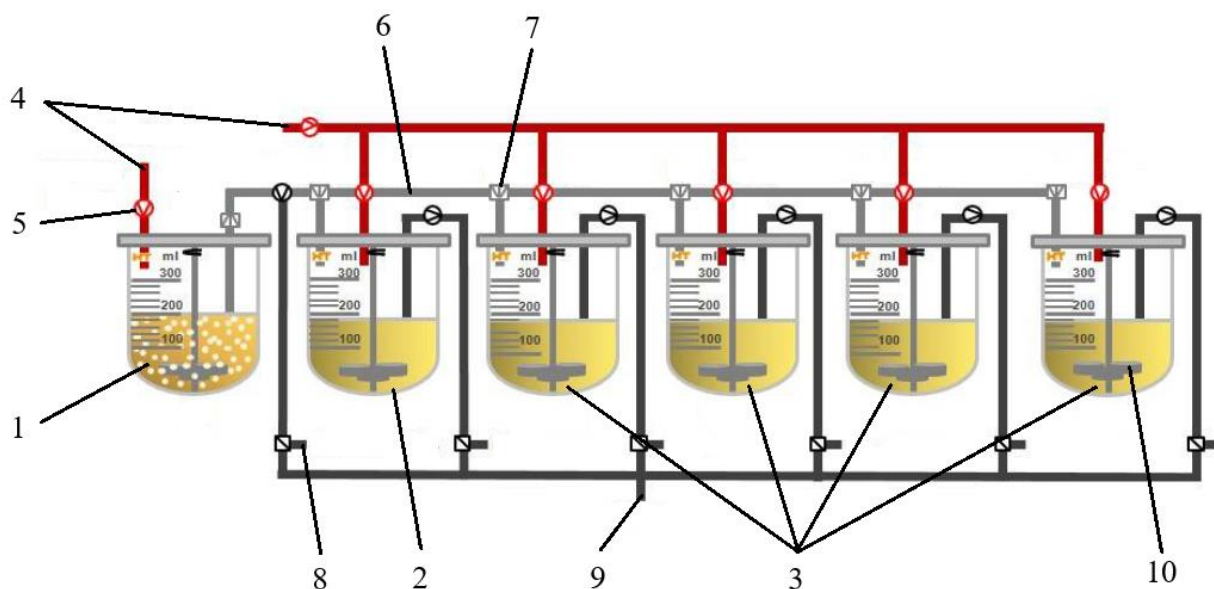
1 – ламинарный бокс биологической безопасности; 2 – емкости с питательной средой (суспензией корма); 3 – магнитные мешалки; 4 – перистальтические насосы подачи питательной среды; 5 – двухстенные стеклянные биореакторы; 6 – пористые полиуретановые матричные носители биопленок; 7 – микроконтроллерный блок автоматического управления и индикации; 8 – первичные измерительные датчики температуры и pH; 9 – емкости с корректирующими растворами кислоты (HCl) и щелочи ($NaOH$); 10 – перистальтические микронасосы автоматического дозирования титрантов; 11 – шприцевые порты отбора проб; 12 – насосы эвакуации эффлюента; 13 – мерные цилиндры сбора отходов; 14 – жидкостной циркуляционный охладитель (чиллер); 15 – баллон со сжатым азотом (N_2) с редуктором.

Рисунок 1.5 – Принципиальная схема экспериментального стенда искусственного кишечника *SalmoSim*

Реакторные платформы с иммобилизацией биомассы и мукозальными носителями

Модель PolyFermS (Polyfermentor Intestinal Model – многореакторная модель кишечника)

Общее описание и назначение. Многореакторная динамическая платформа PolyFermS (рисунок 1.6) разработана для длительного непрерывного анаэробного культивирования микробиоты с предотвращением вымывания медленно растущих микробных популяций за счет иммобилизации биомассы в пористые полимерные гелевые матрицы [73].



1 – инокуляторный биореактор первой ступени с иммобилизованной в гелевых гранулах микробиотой; 2 – контрольный биореактор второй ступени; 3 – параллельные опытные биореакторы второй ступени; 4 – магистраль подачи свежей питательной среды; 5 – дозирующие перистальтические насосы подачи питательной среды; 6 – межустановочная линия непрерывного дозирования инокулята; 7 – перистальтические насосы перекачки суспензии инокулята; 8 – сервисные порты отбора проб; 9 – магистраль сброса эффлюента в сборник отходов; 10 – механические перемешивающие устройства биореакторов с верхнеприводными лопастными импеллерами.

Рисунок 1.6 – Технологическая схема ферментационной платформы PolyFermS с иммобилизацией биомассы

Принцип работы. В инокулятор 1 непрерывно подается 100 % свежей питательной среды по линии 4. Вращение лопастного импеллера 10 обеспечивает интенсивный гидродинамический массообмен между жидкой

фазой и иммобилизационными гранулами. Размножающиеся бактерии слущиваются с поверхности гранул в объем жидкости, формируя стабильную суспензию инокулята. Насосы 7 по линии 6 непрерывно подают инокулят в реакторы 2 и 3 в объеме 10 % от общего расхода, куда одновременно насосы 5 подают 90 % свежей среды. Это формирует одинаковые стартовые условия во всех параллельных емкостях для одновременного тестирования различных рационов. Отработанный поток выводится по магистрали 9.

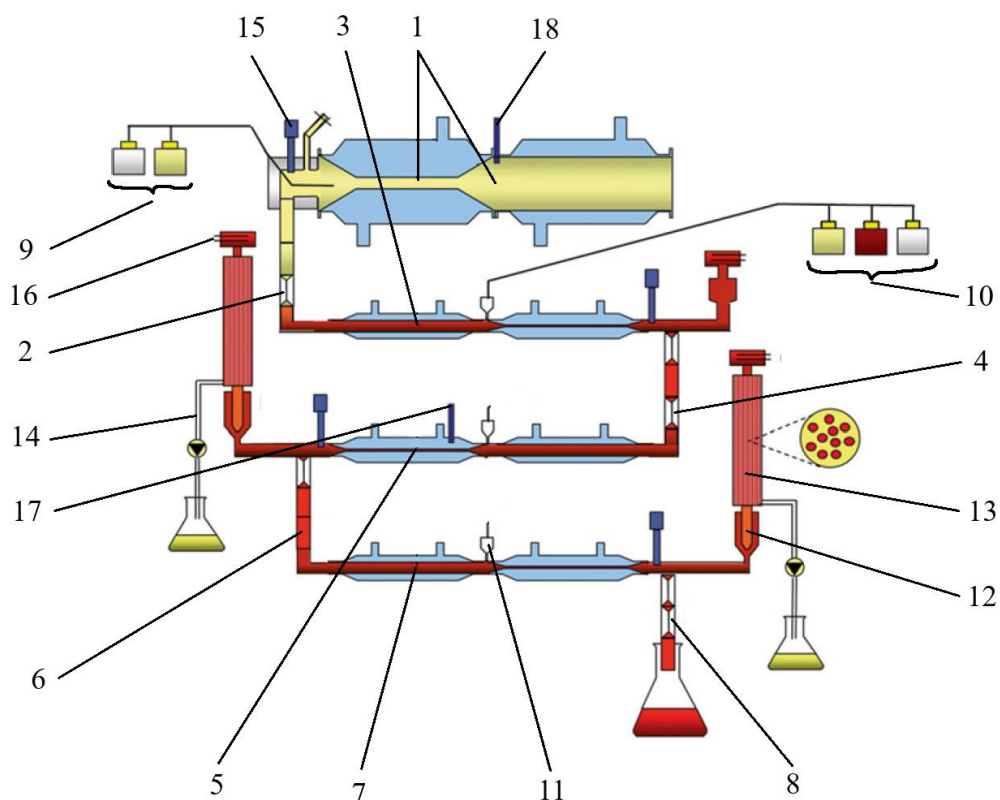
Преимущества. Длительная стабильность за счет иммобилизации, параллельный скрининг.

Недостатки. Механическое разрушение гелевых гранул лопастями, нарушение герметичности через узлы динамических уплотнений валов.

Динамические анатомо-механические и перистальтические комплексы

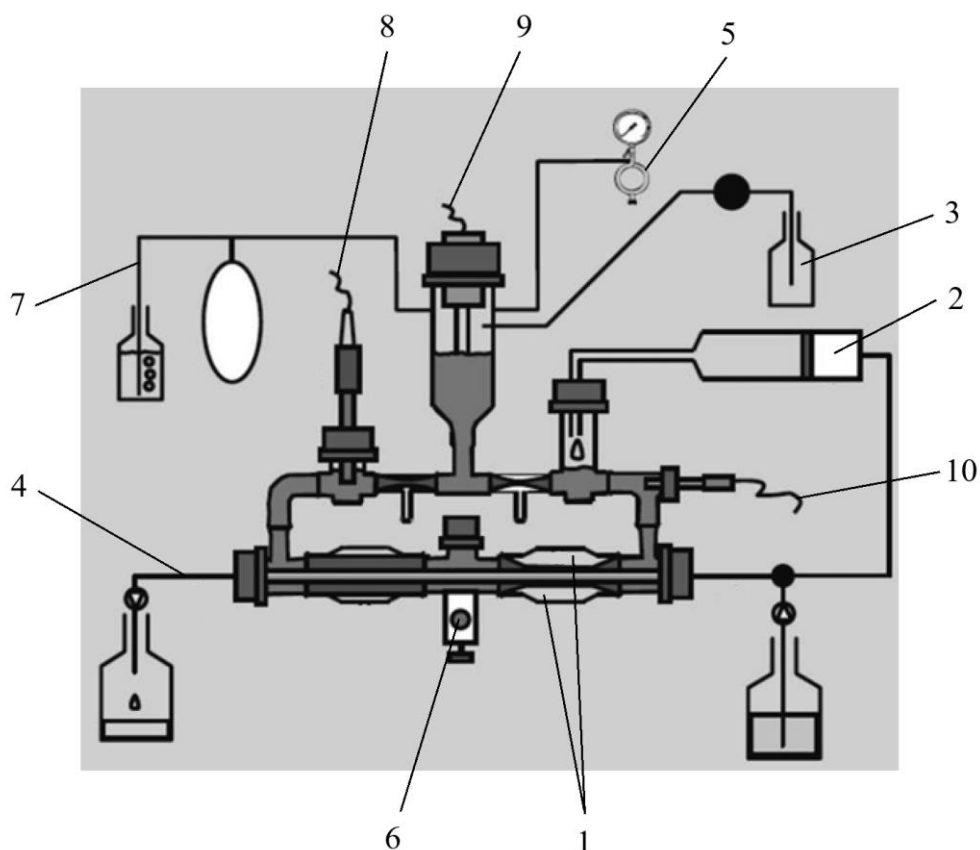
Платформа TIM (TNO Gastro-Intestinal Models: TIM-1 и TIM-2)

Общее описание и назначение. Компьютерно-управляемая динамическая платформа TIM (рисунки 1.7 и 1.8) представляет собой биотехнический комплекс высшего уровня сложности, моделирующий кинетику пищеварения, моторику желудочно-кишечного тракта и мембранное всасывание продуктов расщепления кормов [77, 80, 107].



1 – двухсекционный желудочный модуль с эластичными стенками; 2 – пилорический сфинктер (перистальтический клапанный насос); 3 – дуоденальная камера (секция двенадцатиперстной кишки); 4 – перистальтический клапан межкамерного переноса; 5 – еюнальная камера (секция тонкой кишки); 6 – перистальтический клапан; 7 – илеальная камера (секция подвздошной кишки); 8 – илеоцекальный клапан выгрузки химуса (переход из подвздошной кишки в слепую); 9 – блок желудочной секреции (емкости и линии дозирования HCl , пепсина, липазы и электролитов); 10 – блок дуоденальной секреции (емкости и линии дозирования желчи, панкреатина и электролитов); 11 – линии титрования бикарбоната натрия ($NaHCO_3$); 12 – защитные предфильтры грубой очистки; 13 – полволоконные фильтрационно-диализные блоки; 14 – магистрали отбора фильтрата (биодоступной фракции); 15 – первичные преобразователи pH (pH-электроды); 16 – датчики уровня жидкости; 17 – датчик температуры водяной рубашки ($37^{\circ}C$); 18 – датчик давления контура гидродинамического сжатия.

Рисунок 1.7 – Принципиальная схема четырехкамерной модели верхних отделов ЖКТ TIM-1



1 – перистальтические реакционные камеры с эластичными мембранами и водяной рубашкой; 2 – автоматический шприцевой дозатор кормового субстрата (среды SIEM); 3 – блок нейтрализации (емкость и микронасос подачи $NaOH$); 4 – гидравлический контур диализата с полуволоконной мембраной, насосами и емкостями; 5 – магистраль подачи азота (N_2) с редуктором давления; 6 – сервисный порт отбора проб и внесения инокулята; 7 – газоотводная магистраль с гидрозатвором; 8 – измерительный pH-электрод; 9 – кондуктометрический датчик уровня рабочей среды; 10 – датчик температуры (термопара).

Рисунок 1.8 – Схема динамической модели толстого кишечника *TIM-2*

Принцип работы. Во всех рабочих камерах *TIM-1* и *TIM-2* перемешивание реализуется за счет циклического изменения давления воды, циркулирующей между стеклянным корпусом и эластичным силиконовым рукавом 1. Синхронное сокращение рукавов формирует физиологические перистальтические волны. Межкамерный транспорт химуса выполняется

перистальтическими клапанными насосами (PVP) 2, 4, 6, 8. В TIM-1 через половолоконные фильтры 13 непрерывно выводятся мономеры сахаров и пептиды (линия 14), а в TIM-2 через мембрану контура 4 удаляются короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК), предотвращая закисление среды и ингибирование микробиоты.

Преимущества. Высокое физиологическое подобие моторики, непрерывный отвод КЦЖК через диализ.

Недостатки. Высокая стоимость и сложность аппаратуры, быстрый износ мембран при трении о зерно, необратимая кольматация пор диализатора.

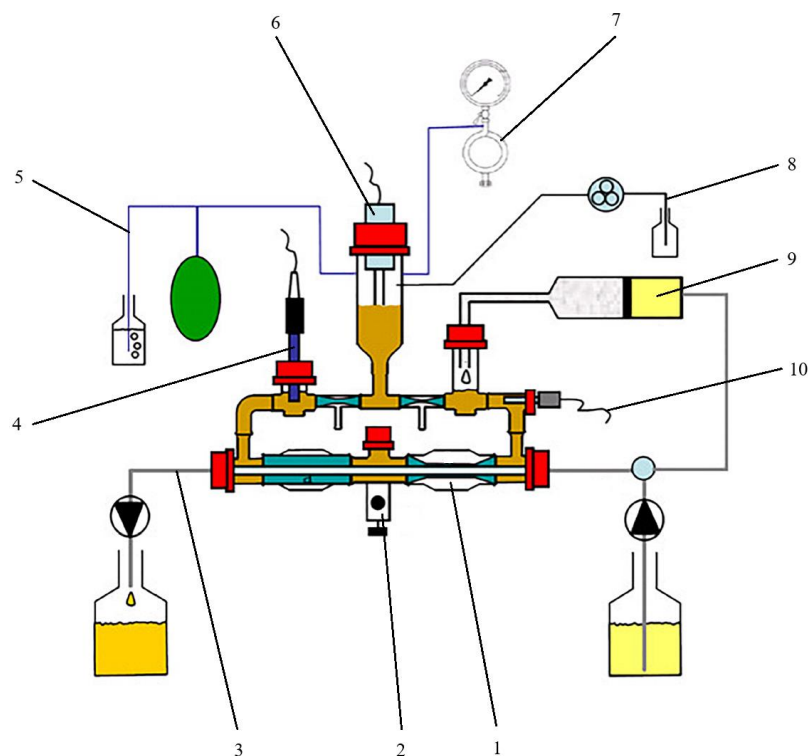
Модель CALIMERO-2 (Chicken ALIMEntary tRact mOdel-2)

Общее описание и назначение. Автоматизированная динамическая установка CALIMERO-2 (рисунок 1.9) создана на конструктивной основе платформы TIM-2 для исследования анаэробной микробной ферментации в слепых отростках кишечника птицы при температуре 41 °C [110].

Принцип работы. Перед пуском система инокулируется через порт 2 и продувается азотом по линии 7. Шприцевой дозатор 9 подает питательную среду со скоростью 60 мл/сутки. Пульсирующая подача воды в рубашку камер 1 вызывает периодическую деформацию эластичных мембран, создавая мягкое перистальтическое перемешивание массы при 41 °C. Метаболиты (КЦЖК) непрерывно удаляются через половолоконную мембрану в контур диализата 3. При падении pH микронасос линии 8 дозирует раствор NaOH по показаниям электрода 4. Датчик уровня 6 контролирует объем среды (150 мл), активируя сброс избытка жидкости. Биогаз отводится через линию 5.

Преимущества. Воспроизведение условий слепой кишки кур (41°C).

Недостатки. Ограниченность одним отсеком слепой кишки, сложность гидропривода, износ мембран.



1 – перистальтические реакционные камеры с эластичными мембранами и внешней водяной рубашкой; 2 – нижний сервисный порт отбора проб и внесения инокулята; 3 – гидравлический контур диализата с полуволоконной мембраной, насосами и сборными емкостями; 4 – измерительный комбинированный рН-электрод; 5 – газоотводная магистраль с расширительной емкостью и гидрозатвором; 6 – кондуктометрический датчик уровня жидкости; 7 – магистраль подачи азота (N_2) с манометром и регулятором давления; 8 – линия автоматического титрования и дозирования раствора щелочи ($NaOH$) с микронасосом; 9 – автоматический шприцевой дозатор питательной среды; 10 – датчик температуры рабочей зоны ($41^\circ C$).

Рисунок 1.9 – Принципиальная схема динамической модели слепой кишки птицы CALIMERO-2

Сравнительный анализ технических характеристик систем иЖКТ

Результаты сопоставительного инженерно-технологического анализа рассмотренных мировых моделей иЖКТ сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ конструктивно-технологических схем существующих систем имитации ЖКТ

№	Модель иЖКТ	Моделируемы й биологически й объект	Количество о камер	Способ перемешивани я реакционной среды	Система массообмена/ диализа	Конструктивн ые преимущества	Выявленные инженерные недостатки при работе с кормами свиней
1.	RUSITEC	Крупный рогатый скот, овцы	1	Возвратно- поступательно е вертикальное перемещение контейнера (6- 8 мин ⁻¹)	Проточный перелив	Стабильность рубцовой микробиоты ($r = 0,80-0,90$)	Отсутствие анатомических комpartментов, низкая частота циклов, непригодность для плотного свиного химуса
2.	ECSIM	Человек, свинья	1-3	Верхнепривод ной механический вал с турбиной Руштона и пропеллером (40-400 об/мин)	Проточный перелив	Модульность конструкции, независимый контроль ОВП и pH	Застойные зоны при оседании клетчатки, локальные высокие напряжения сдвига, износ уплотнений сквозного вала
3.	SHIME	Человек, свинья	5	Погружной тефлоновый магнитный якорь на дне каждой колбы	Проточный каскад	Полная имитация пяти отделов ЖКТ, воспроизведен	Срыв магнитного сцепления в вязких средах, образование гидродинамической воронки, истирание

				(200-300 об/мин)		ие градиента pH	нерастворимых частиц корма
4.	Baby-SPIME	Поросята- отъемыши	3	Погружной магнитный якорь (300 об/мин)	Полунепрерывн ый насосный каскад	Сдвоенная конфигурация, калибровка под рационы отъема (39,5°C)	Невозможность подъема осевших тяжелых зерновых фракций со дна, блокировка якоря плотным осадком клетчатки
5.	SalmoSim	Атлантически й лосось	3	Магнитная мешалка с донным якорем	Проточный каскад	Охлаждение до 12°C, пористые матрицы для фиксации био пленок	Неприменимость температурных режимов для теплокровных, срыв якоря в густых средах, закупоривание пор полиуретановых губок
6.	PolyFermS	Человек, свинья, птица	2-6	Верхнепривод ной механический вал с лопастным импеллером (120-180 об/мин)	Двухстадийный непрерывный проток	Длительная стабильность за счет иммобилизации, параллельный скрининг	Механическое разрушение гелевых гранул лопастями, нарушение герметичности через узлы динамических уплотнений валов

7.	MPigut-IVM	Взрослая свинья	1 + внешний контур	Верхнепривод ной импеллер + внешняя насосная рециркуляция (5 мл/мин)	Проточный контур	Разделение ламинарной и мукозальной фаз	Забивание внешнего циркуляционного насоса частицами корма, закупоривание сеток 1 мм, деструкция клеток роликами насоса
8.	DIDGI	Поросята, младенцы	2	Вращательны й лопастной импеллер от верхнего электропривод а (50–60 об/мин)	Насосный транспорт	Симуляция сита пилоруса (мембрана 2 мм)	Отсутствие модулей толстого кишечника, износ уплотнений вала, забивание пор мембраны клапана между желудочной секцией и тонкокишечной волоконками корма
9.	SIMGI	Человек	5	Перистальтич еское сжатие стенок в желудке (10 мин ⁻¹); мешалки в кишечных модулях	Каскадный поток	Имитация моторики антральной зоны желудка переменным гидравлическ им давлением	Абразивный износ и разрывы силиконовой мембраны твердыми частицами зерна, срыв магнитных якорей в толстокишечных реакторах

10.	TIM-1/ TIM-2	Человек, свинья (<i>TIM-2</i>)	4 (TIM-1)/ 1 (TIM-2)	Компьютерно- управляемое сжатие силиконовых рукавов импульсами давления воды	Проволоконный диализный модуль	Высокое физиологическое подобие моторики, непрерывный отвод КЦЖК через диализ	Высокая стоимость и сложность аппаратуры, быстрый износ мембран при трении о зерно, необратимая закупоривание пор диализатора
11.	CALIMERO- 2	Птица (куры)	1	Перистальтич еское сжатие стенок силиконовой камеры водой	Проволоконный диализ	Воспроизведе ние условий слепой кишки кур (41°C)	Ограниченность одним отсеком слепой кишки, сложность гидропривода, износ мембран

Выполненный анализ показывает, что большинство мировых установок искусственного пищеварения ориентировано на физиологию человека или жвачных животных, имеет высокую стоимость и не приспособлено для надёжного моделирования пищеварения свиней из-за несовершенства реакторных модулей и способов перемешивания. Применяемые способы воздействия на среду (погружные магнитные якоря, механические валы, насосные контуры, деформируемые силиконовые камеры) имеют существенные недостатки при работе с концентрированными вязкими неньютоновскими средами (кормовыми суспензиями свиней): срыв вращения, разрушение рабочих органов или разгерметизация анаэробного объёма. Это обуславливает необходимость разработки отечественной модульной автоматизированной системы иЖКТ свиньи и нового герметичного перемешивающего устройства, обеспечивающего устойчивую передачу крутящего момента в высоковязких средах без нарушения анаэробных условий.

1.3 Анализ способов и технических средств перемешивания гетерогенных сред в биореакторах иЖКТ

Эффективность работы иЖКТ определяется тем, как рабочие органы взаимодействуют со средой. Химус моногастричных животных (свиней) представляет собой гетерогенную неньютоновскую суспензию с высокой вязкостью (до 0,1-1,5 Па·с) и полидисперсными включениями растительной клетчатки, зерновой дерти и отрубей размером от 0,1 до 3,0 мм. Перемешивание такой среды сопряжено с решением противоречивых инженерных задач: обеспечением равномерного распределения твердых частиц по объёму сосуда без образования застойных зон при сохранении полной герметичности рабочего пространства для поддержания анаэробных условий жизнедеятельности микробиоты.

Анализ применяемых в биотехнологии технических средств перемешивания позволяет выделить четыре основные группы устройств, обладающих конструктивными и технологическими ограничениями применительно к иЖКТ свиней:

1. Магнитные мешалки с донным якорем. Вращающий момент передается от внешнего магнита на свободно лежащий на дне сосуда цилиндрический или крестообразный якорь в полимерной оболочке. В средах с низкой вязкостью (вода, солевые растворы) якорь создает устойчивую циркуляцию. Однако при введении свиного комбикорма возрастающее гидродинамическое сопротивление превышает удерживающую силу магнитной связи, что приводит к срыву магнитного зацепления, эксцентрическому биению и полной остановке якоря. Кроме того, придонное вращение якоря формирует локальную воронку, не обеспечивающую подъем тяжелых фракций корма в средние и верхние слои биореактора.

2. Механические верхнеприводные мешалки со сквозным валом. Передача крутящего момента от электродвигателя к лопастному импеллеру осуществляется через сквозной вал, проходящий через крышку реактора. Главным ограничением выступает наличие динамического уплотнения (сальникового или торцевого). При длительном непрерывном культивировании (от нескольких суток до месяцев) абразивные микрочастицы корма и агрессивные пары соляной кислоты вызывают износ уплотнительных элементов. Это приводит к разгерметизации объема, неконтролируемому подосу кислорода воздуха и гибели анаэробных микроорганизмов.

3. Насосные циркуляционные системы. Перемешивание достигается путем непрерывной рециркуляции содержимого реактора по внешнему контуру с помощью перистальтических, плунжерных или центробежных насосов. Данный способ непригоден для полидисперсного химуса свиней: неизмельченные частицы клетчатки оседают в поворотах трубопроводов, клапанах и патрубках, вызывая их закупоривание и механическое заклинивание рабочих органов. Кроме того, повышенное гидродинамическое

напряжение сдвига в проточной части насоса разрушает иммобилизованные микробные консорциумы и биопленки.

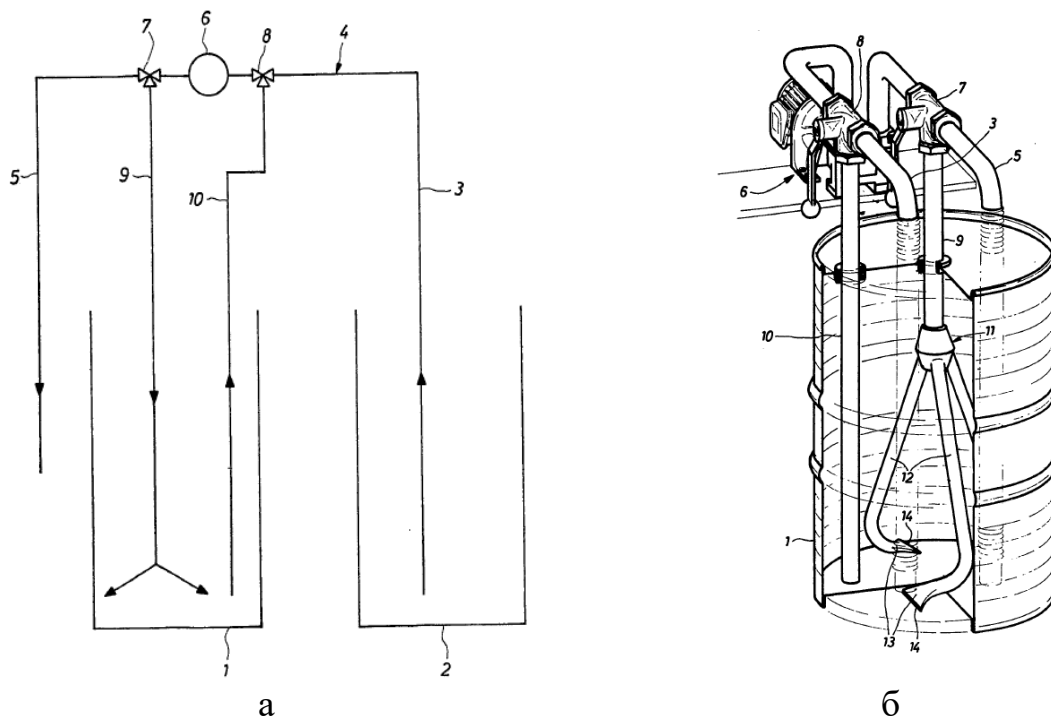
4. Мембранные деформируемые системы (перистальтические камеры). Перемешивание осуществляется за счет волнообразного сжатия эластичных силиконовых стенок рабочей камеры давлением жидкости или сжатого воздуха. Данные системы обеспечивают высокую степень биомеханического подобия моторике кишечника, однако острые грани частиц зерновой дерти вызывают поверхностную эрозию, усталостные микротрещины и механические проколы тонкостенных мембран при циклическом нагружении.

Выявленные недостатки обуславливают необходимость поиска альтернативных бесконтактных схем перемешивания, способных передавать высокий крутящий момент через сплошную немагнитную стенку реактора. Для этого выполнен патентно-технический анализ специализированных устройств перемешивания в закрытых сосудах.

Ученый Н. Fischer разработал устройство для одновременного транспортирования и перемешивания текучих и гетерогенных сред в технологических емкостях без использования отдельного электромеханического привода мешалки. Техническое решение защищено патентом СН 579418 А5 (Швейцария). [46].

Установка (рисунок 1.10) содержит технологический резервуар 1 для смешивания и промежуточного хранения жидкости, связанный через питающую линию 9 и возвратную линию 10 с насосом 6. Насос 6 включен в общую линию подачи и выгрузки 4 между двумя трехходовыми распределительными вентилями: вентилем 7 на напорной стороне и вентилем 8 на всасывающей стороне. От трехходового вентиля 7 отходит питающая линия 9, заведенная в резервуар 1, а от вентиля 8 – возвратная линия 10 из резервуара 1 (при этом исходная жидкость поступает из внешнего транспортного или складского резервуара 2 через подводящую ветвь 3, а готовый продукт отводится через отводящую ветвь 5). На погруженном конце питающей линии 9 соосно смонтирован вращающийся устьевой насадок 11,

снабженный изогнутыми патрубками (перемешивающими рычагами) 12. Патрубки 12 имеют выпускные концы 13 с щелевидными выпускными отверстиями 14, ориентированными тангенциально.



а – общая схема технологической установки; б – конструкция реактивной перемешивающей головки: 1 – технологический резервуар для смешивания и промежуточного хранения жидкости; 2 – внешний транспортный или складской резервуар; 3 – подводящая ветвь; 4 – общая линия подачи и выгрузки; 5 – отводящая ветвь; 6 – насос; 7 – трехходовой распределительный вентиль на напорной стороне; 8 – трехходовой распределительный вентиль на всасывающей стороне; 9 – питающая линия; 10 – возвратная линия; 11 – вращающийся устьевой насадок; 12 – изогнутые патрубки (перемешивающие рычаги); 13 – выпускные концы; 14 – щелевидные выпускные отверстия (сопла).

Рисунок 1.10 – Устройство для одновременного перекачивания и гидродинамического перемешивания среды по патенту СН 579418 А5

Перекачивание и перемешивание осуществляются насосом 6 при соответствующем переключении трехходовых вентилях 7 и 8. В режиме перемешивания вентиль 7 перекрывает отводящую ветвь 5, а вентиль 8

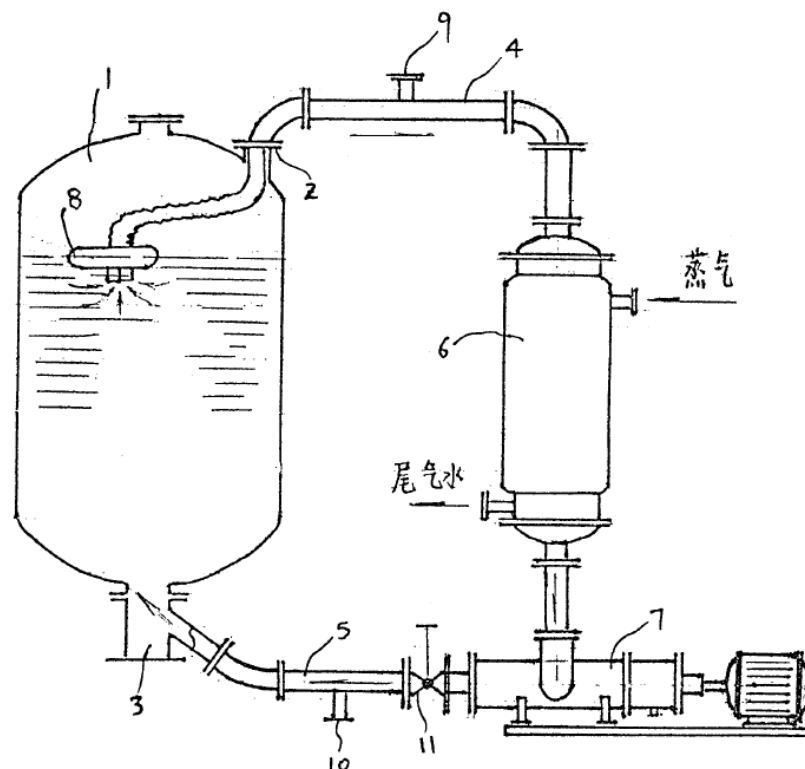
открывает возвратную линию 10. При работе насоса 6 жидкость циркулирует по замкнутому контуру из резервуара 1 по линии 10, через вентиль 8, насос 6, вентиль 7 и линию 9 поступает во вращающийся насадок 11 и истекает через щелевидные отверстия 14 патрубков 12. За счет реактивной силы истекающих струй насадок 11 приводится во вращение, обеспечивая перемешивание массы в резервуаре 1.

Применение схемы для разрабатываемого иЖКТ сви́ньи ограничено высокой вязкостью и гетерогенностью химуса. Наличие растительных волокон и частиц зерна размером до 3,0 мм приводит к засорению щелевидных сопел 14 и каналов патрубков 12, прекращению вращения насадка 11 и росту гидравлического сопротивления. Преимущества схемы: отсутствие отдельного механического привода мешалки и вращающихся валов, проходящих через крышку резервуара 1, совмещение функций перемешивания и перекачивания одним насосом 6. Недостатками являются: уязвимость сопел 14 к забиванию волокнистыми компонентами, невозможность отдельной регулировки интенсивности перемешивания независимо от подачи насоса 6, гидродинамическая деструкция биологических структур в проточной части насоса 6.

Ученый W. Zhang разработал аппарат внешней циркуляции, предназначенный для интенсификации теплообмена, перемешивания и химического взаимодействия в реакторных емкостях. Техническое решение представлено в патенте CN 2522163 Y (Китай) [45].

Устройство (рисунок 1.11) включает реакционный сосуд (реактор) 1, на верхней и нижней частях которого выполнены соединительные патрубки 2 и 3. Верхний патрубок 2 соединен трубопроводом 4 с теплообменником 6, который последовательно соединен с материальным циркуляционным насосом 7. Насос 7 через трубопровод 5 подключен к нижнему патрубку 3 реактора 1, образуя замкнутый циркуляционный контур. Внутри реактора 1 на конце трубопровода 4 установлен плавающий всасывающий патрубок 8. На трубопроводах 4 и 5 смонтированы технологические резервные штуцеры 9 и

10, а на трубопроводе 5 между насосом 7 и реактором 1 установлен запорный клапан 11. Внутренние поверхности элементов снабжены защитным фторопластовым покрытием.



1 – реакционный сосуд (реактор); 2 – соединительный патрубок на верхней части; 3 – соединительный патрубок на нижней части; 4 – соединительный трубопровод от верхнего патрубка к теплообменнику; 5 – соединительный трубопровод от насоса к нижнему патрубку; 6 – теплообменник; 7 – материальный циркуляционный насос; 8 – плавающий всасывающий патрубок; 9, 10 – технологические резервные штуцеры; 11 – запорный клапан.

Рисунок 1.11 – Схема аппарата внешней циркуляции для теплообмена и перемешивания по патенту CN 2522163 Y

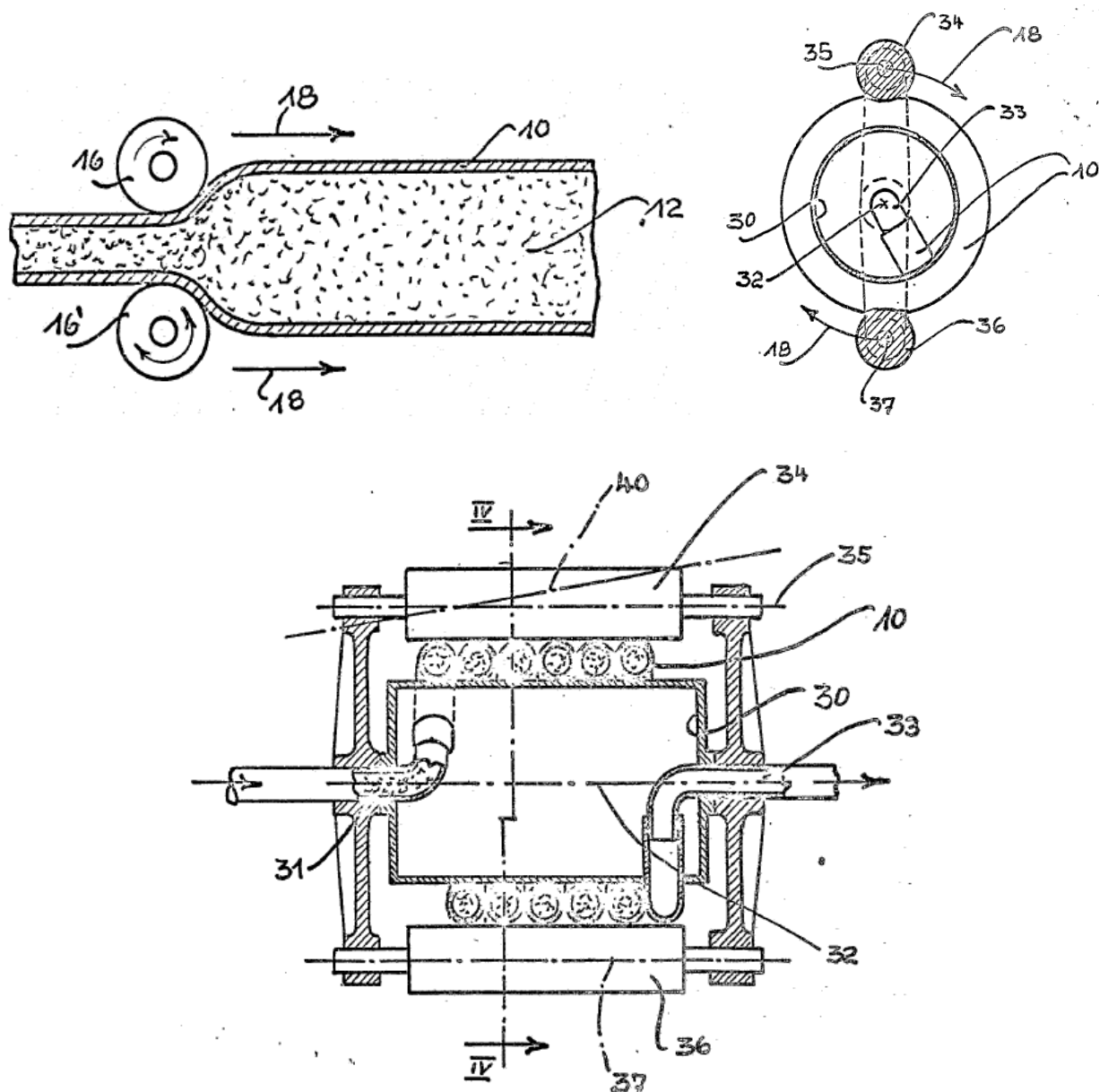
Плавающий всасывающий патрубок 8 обеспечивает непрерывный забор массы из верхних слоев реактора 1. Под действием насоса 7 среда прокачивается через теплообменник 6, подвергаясь термостатированию.

После этого поток поступает через нижний патрубок 3 в донную зону реактора 1, взрыхляя и поднимая тяжелые осаждающиеся фракции. Штуцеры 9 и 10 используются для дозирования реагентов, сброса давления и промывки.

Наличие нерастворимых волокон и частиц зерновой дерти приводит к кольматации плавающего заборника 8 и проходных сечений циркуляционного насоса 7. Высокие напряжения сдвига в насосе 7 разрушают микробные консорциумы. Преимущества схемы: вынос теплообменных и перемешивающих элементов за пределы сосуда 1, исключение погружных мешалок с уплотнениями валов. Недостатками являются: высокая уязвимость к засорению волокнистыми кормами, риск деструкции биомассы в рабочем колесе насоса 7, громоздкость внешних коммуникаций.

К. Becker разработал устройство для бесконтактного перемешивания и циркуляции высоковязких, пастообразных или сыпучих сред в герметичных емкостях. Техническое решение защищено патентом *DE 2025011 A1* (Германия) [44].

Система (рисунок 1.12) включает эластичный трубчатый контейнер (шланг) 10, заполненный обрабатываемой массой 12 и намотанный по винтовой линии на неподвижную цилиндрическую барабанную основу 30 (в промышленном исполнении). Для деформации шланга снаружи барабана 30 установлены по меньшей мере один или два циклично перемещающихся обжимных валка 34 и 36 (или давящие тела 16, 16' на фигуре 2), вращающиеся вокруг осей 35 и 37. Подача и отвод массы осуществляются через полые цапфовые валы 31 и 33, соединенные с концами шланга 10. Установка валков может выполняться с небольшим углом наклона (линия 40) относительно оси барабана 32.



10 – эластичный трубчатый контейнер (шланг); 12 – обрабатываемая масса;
 16, 16' – давящие тела; 30 – неподвижная цилиндрическая барабанная основа;
 31, 33 – полые цапфовые валы; 34, 36 – обжимные валки; 35, 37 – оси валков;
 40 – линия наклона валков.

Рисунок 1.12 – Устройство для гомогенизации высоковязких сред по патенту
DE 2025011 A1

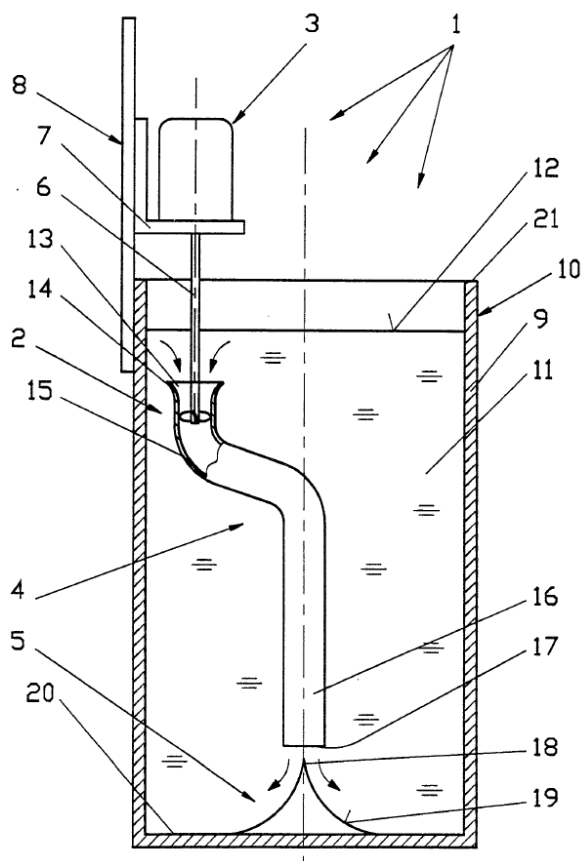
Принудительное перемещение валков 34, 36 (или тел 16, 16') по внешней поверхности эластичного шланга 10 создает локальный обжим (вмятину) 20. Перед зоной обжима формируется волна перемещаемой массы

22, которая под воздействием движущейся силы выдавливается вперед по ходу движения вала, обеспечивая ламинарное сдвиговое смешивание слоев без разрушения структуры.

Принцип перистальтического выдавливания обеспечивает бережное отношение к структуре среды, однако циклическое механическое обжатие шланга 10 твердыми частицами комбикорма приводит к быстрому истиранию и повреждению эластичных стенок. Преимущества схемы: полная герметичность рабочего объема, отсутствие внутренних подвижных механических элементов и уплотнений в зоне реакции. Недостатками являются: интенсивный износ эластичного шланга 10 при циклическом обжатии абразивными частицами химуса, сложность организации равномерного температурного режима по всей длине винтового канала.

Н. Müller разработал устройство для перемешивания и предотвращения осаждения твердых частиц в высоковязких суспензиях биотехнологических и реакторных емкостей. Конструктивное решение представлено в патенте DE 19503132 A1 (Германия) [43].

Установка 1 (рисунок 1.13) включает вертикальный реакционный сосуд 10 со стенкой 9, заполненный жидкостью 11 до уровня 12. Внутри сосуда 10 соосно смонтирован стационарный центральный обтекатель 5 с вершиной 18 и вогнутой направляющей поверхностью 19, достигающей до днища 20. Рядом со стенкой 9 размещен внутренний перепускной трубопровод 4 с входным раструбом 13, 14, в первом вертикальном участке 15 которого на валу 6 фланцево закреплена осевая насосная установка 2. Приводной мотор 3 установлен на кронштейне 7 и соединен с направляющей штангой 8 для вертикального подъема. Нисходящий конечный участок трубы 16 оканчивается устьем 17, расположенным строго над вершиной 18 обтекателя 5.



1 – установка в сборе; 2 – осевая насосная установка; 3 – приводной мотор; 4 – внутренний перепускной трубопровод; 5 – стационарный центральный обтекатель (лейткорпус); 6 – вал насоса; 7 – кронштейн; 8 – направляющая штанга; 9 – стенка сосуда; 10 – реакционный сосуд; 11 – жидкость; 12 – уровень жидкости; 13 – входное отверстие; 14 – входной раструб (эжектор); 15 – первый вертикальный участок трубы; 16 – конечный нисходящий участок трубы; 17 – устье (выходное отверстие); 18 – вершина обтекателя; 19 – вогнутая направляющая поверхность; 20 – днище сосуда.

Рисунок 1.13 – Схема смесительно-циркуляционной установки по патенту

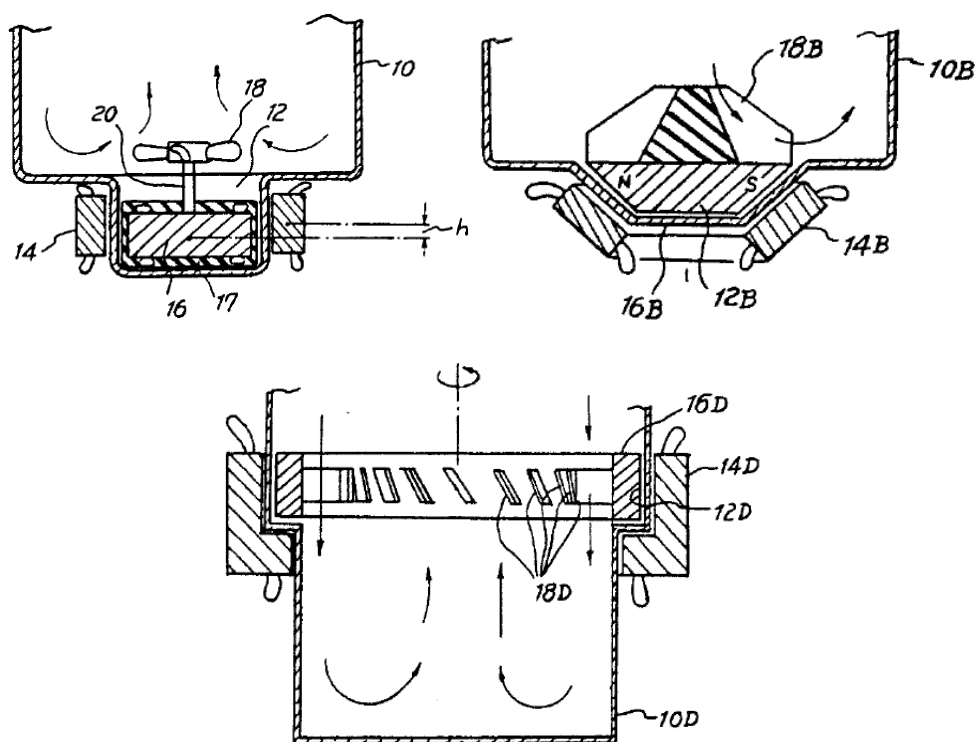
DE 19503132 A1

Осевой насос 2 забирает жидкость 11 через входной раструб 13, 14 из верхнего слоя реактора 10 и направляет ее по трубе 4 вниз. Нисходящий поток через устье 17 ударяется в вершину 18 обтекателя 5 и плавно распределяется по вогнутой поверхности 19, преобразуясь в мощную придонную радиальную струю, которая предотвращает оседание взвешенных частиц.

Наличие погружного осевого насоса 2 и сужение в проточной части трубопровода 4 вызывают заклинивание волокнистых включений комбикорма и деструкцию микробных клеток. Преимущества схемы: эффективное предотвращение застойных зон у дна 20, размещение привода 3 вне жидкости с возможностью подъема по штанге 8 для обслуживания. Недостатками являются: наличие погружного насосного узла 2 непосредственно в перепускном канале, риск кольматации трубы 4 нерастворимыми фракциями химуса.

Т. Такака разработал биореактор с интегрированным электромагнитным приводом для культивирования микроорганизмов в замкнутом стерильном объеме. Разработка представлена в патенте JP S61-212275 A (Япония) [104].

Аппарат (рисунок 1.14) содержит герметичный сосуд 10, 10B, 10D, выполненный из немагнитного и непроводящего материала. В донной или боковой части сосуда сформирована углубленная роторная камера 12, 12B, 12D, снаружи которой установлен электромагнитный статор 14, 14B, 14D. Внутри камеры размещен ведомый ротор 16, 16B, 16D со встроенными постоянными магнитами, покрытый защитной фторопластовой оболочкой 17 и несущий перемешивающие лопасти 18, 18B, 18D. Центрирование ротора осуществляется центральной осью 20.



10, 10B, 10D – герметичный сосуд (контейнер) из немагнитного и непроводящего материала; 12, 12B, 12D – углубленная роторная камера; 14, 14B, 14D – электромагнитный статор; 16, 16B, 16D – ведомый ротор; 17 – защитная фторопластовая оболочка; 18, 18B, 18D – перемешивающие лопасти; 20 – центральная ось (опорный стержень).

Рисунок 1.14 – Биореактор с бесконтактным электромагнитным приводом по патенту JP S61-212275 A

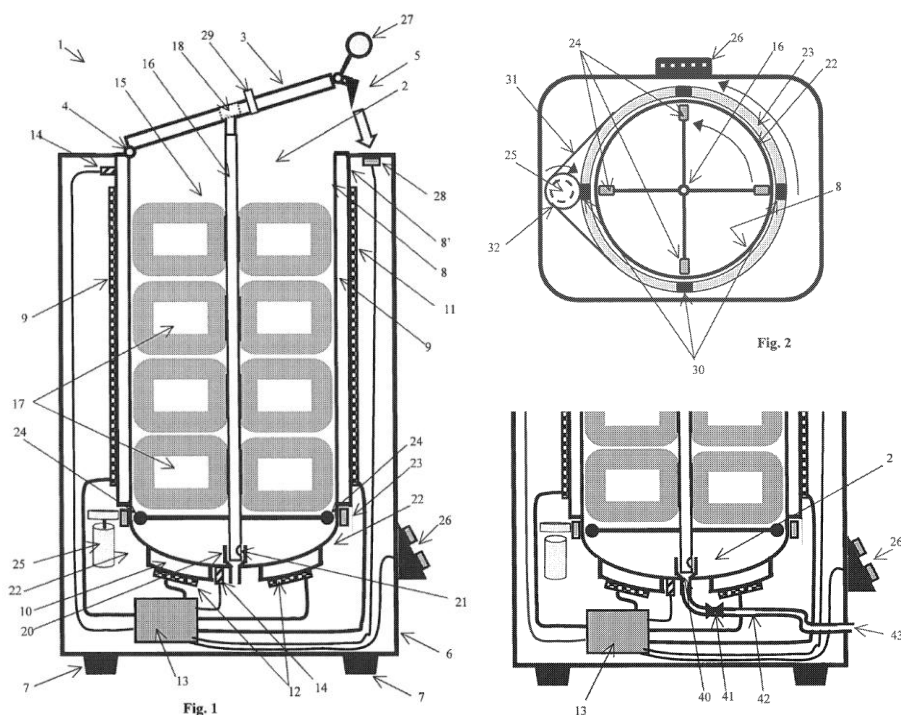
Подача переменного тока на внешний статор 14 создает вращающееся электромагнитное поле, проникающее через немагнитную стенку сосуда 10. Поле приводит во вращение внутренний ротор 16, а закрепленные на нем лопасти 18 осуществляют перемешивание реакционной массы без нарушения герметичности объема.

Конструкция с кольцевым ротором освобождает центральную ось для датчиков, однако открытые зазоры и опорные элементы роторной камеры 12 могут забиваться частицами свиного комбикорма, вызывая заклинивание. Преимущества схемы: отсутствие сквозных валов и динамических уплотнений, высокий уровень герметичности и стерильности. Недостатками

являются: уязвимость подшипниковых узлов и зазоров роторной камеры к абразивным частицам корма, сложность регулирования момента при высоких вязкостях среды.

J. Smith и R. Johnson разработали аппарат для приготовления питательных сред с центральной мешалкой, приводимой во вращение внешним магнитным кольцом. Техническое решение защищено патентом US 10668439 B2 (США) [100].

Аппарат 1 (рисунок 1.15) содержит цилиндрический реакционный сосуд 2 с полусферическим дном, закрытый поворотной крышкой 3 на шарнирах 4 с фиксирующими болтами 5. Сосуд размещен в раме 6 на ножках 7 и оснащен двойной оболочкой (стенки 8, 8'), образующей верхнюю 9 и нижнюю 10 нагревательные полости с резистивными элементами 11, 12. В свободном пространстве 22 между полостями 9 и 10 установлено наружное вращающееся магнитное кольцо 23 на роликах 47, приводимое в движение мотором 25 через ремень 31 и шкив 32. Внутри сосуда 2 расположен вертикальный трубчатый вал 16 с перфорированными лопастями 17, на периферии которых закреплены постоянные магниты 24. Нижний конец вала 16 опирается на съемную донную вставку 20, выполняющую функцию сливной пробки и подпятника. Управление работой осуществляется блоком 13 на базе датчиков 14 и панели 26.



1 – аппарат в сборе; 2 – цилиндрический реакционный сосуд с полусферическим дном; 3 – поворотная крышка; 4 – шарнирные петли; 5 – фиксирующие болты; 6 – несущая рама; 7 – ножки; 8, 8' – внутренняя и внешняя стенки двойной оболочки; 9, 10 – верхняя и нижняя нагревательные полости; 11, 12 – нагревательные резистивные элементы; 13 – блок управления; 14 – температурные датчики; 16 – вертикальный трубчатый вал; 17 – перфорированные лопасти; 18 – отверстие в крышке; 20 – съемная донная вставка; 22 – свободное пространство между полостями; 23 – наружное вращающееся магнитное кольцо; 24 – постоянные магниты на лопастях; 25 – мотор привода; 26 – панель управления; 30 – магниты кольца; 31 – приводной ремень; 32 – фрикционный шкив; 41 – сливной клапан; 47 – направляющие ролики.

Рисунок 1.15 – Аппарат для приготовления сред по патенту US 10668439 B2

Электродвигатель 25 вращает внешнее магнитное кольцо 23 через ременную передачу 31. Встроенные магниты кольца 23 через стенку сосуда 2 взаимодействуют с периферийными магнитами 24 лопастей 17, приводя во вращение вертикальный вал 16. Блок управления 13 регулирует скорость

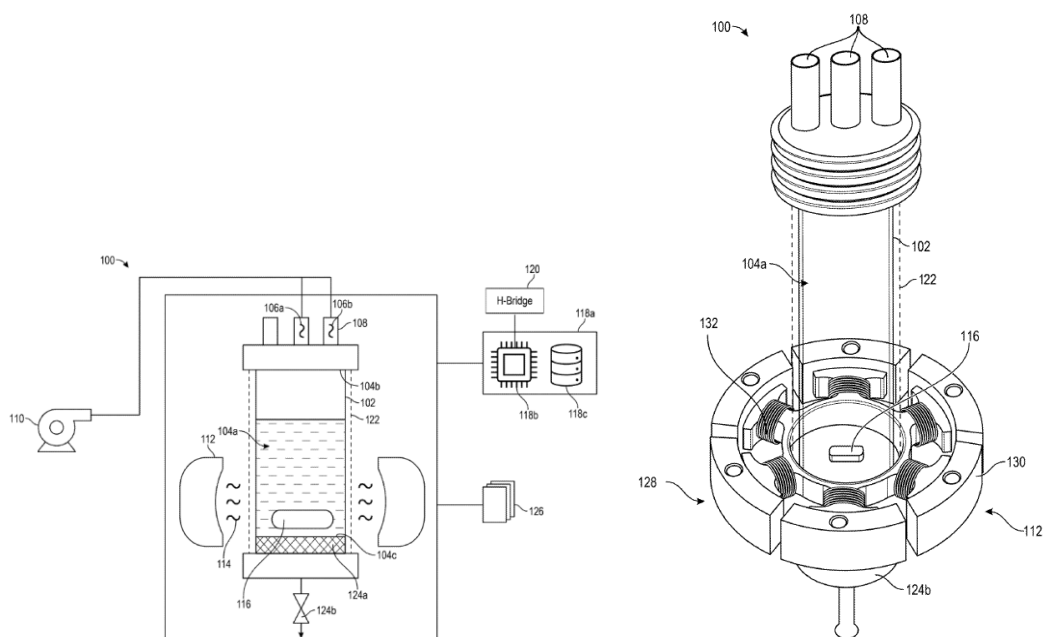
вращения и температурные режимы отдельно для верхней 9 и нижней 10 полостей в зависимости от уровня заполнения сосуда.

Концепция бесконтактного периферийного привода перспективна, но конструкция лопастей 17 и донная вставка 20 ориентированы на жидкие питательные среды и не адаптированы к преодолению высоких сдвиговых сопротивлений высоковязкого свиного химуса. Преимущества схемы: отсутствие сквозных валов и уплотнений, развитая система термостатирования с отдельными зонами 9 и 10; удобство очистки внутренней камеры. Недостатками являются: ограниченная мощность магнитной муфты при работе с высоковязкими неньютоновскими средами, риск заклинивания донного узла 20 волокнистыми фракциями корма.

М. Davis разработал устройство для планарного перемешивания высоковязких гетерогенных сред в герметичных аппаратах с использованием бесконтактного бесщеточного привода, охватывающего реакционную зону. Разработка представлена в патенте US 12415167 B1 (США) [81].

Система 100 (рисунок 1.16) включает реакционный сосуд (фильтр-реактор) 102 с рабочей зоной смешивания 104а, входными штуцерами 108, насосом 110 и донным фильтром 124а со сливным клапаном 124б. Снаружи сосуда 102 соосно размещен бесконтактный бесщеточный магнитный привод 112 (статор 128 с зубцами 130 и обмотками 132), генерирующий вращающееся магнитное поле. Внутри сосуда 102 расположен магнитный перемешивающий элемент (якорь) 116. Управление параметрами вращения осуществляется контроллером с Н-мостом (рисунок 1.16).

Энергизация обмоток 132 статора 128 создает бегущее магнитное поле, которое захватывает внутренний магнитный якорь 116 и приводит его во вращение в плоскости реакционной зоны 104а. Бесщеточный привод 112 может перемещаться по высоте сосуда 102 или дублироваться несколькими секциями для управления гидродинамикой на разных уровнях наполнения.



100 – система смешивания; 102 – реакционный сосуд (фильтр-реактор); 104a – рабочая зона смешивания; 108 – входные штуцеры; 110 – нагнетательный насос; 112 – бесконтактный бесщеточный магнитный привод; 116 – магнитный перемешивающий элемент (якорь); 124a – донный фильтр; 124b – донный сливной клапан; 128 – статор; 130 – зубцы статора; 132 – обмотки статора.

Рисунок 1.16 – Система планарного перемешивания по патенту
US 12415167 B1

Многополюсная бесщеточная система обеспечивает передачу высокого крутящего момента через стенку сосуда, что критически важно для перемешивания высоковязкого химуса без срыва магнитного сцепления. Преимущества схемы: отсутствие механических валов и уплотнений, возможность регулирования положения привода по высоте, высокая удельная мощность бесконтактного привода. Недостатками являются: сложность прецизионного электронного управления многофазными обмотками 132 статора 128, отсутствие специализированного профиля лопастей для подъема тяжелых фракций комбикорма.

Выполненный патентно-технический анализ подтверждает, что наиболее рациональной концепцией перемешивающего устройства для

автоматизированной системы иЖКТ свињи является герметичная кольцевая магнитная мешалка с бесконтактным приводом, сочетающая достоинства периферийного распределения усилий и свободного центрального объема реактора.

Вместе с тем практическая реализация указанной концепции требует комплексного решения научно-инженерных задач: создания математической модели гидродинамического взаимодействия лопастей с неньютоновской средой, расчета критического момента срыва магнитной муфты и оптимизации геометрических параметров лопастного ротора, что определяет содержание цели и задач исследования.

Сравнительный анализ технических решений для перемешивания гетерогенных сред в биореакторах иЖКТ

Основные результаты анализа рассмотренных технических решений для перемешивания гетерогенных сред в биореакторах иЖКТ представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ технических решений для перемешивания гетерогенных сред в биореакторах иЖКТ

№	Группа устройств	Авторы / разработчик и	Название патента или технического решения	Принцип действия	Основные преимущества	Ограничения для химуса свиней
1.	Магнитные мешалки с донным или периферийным якорем	T. Tanaka, Ajinomoto Co.	Биореактор с бесконтактным электромагнитным приводом, JP S61-212275 A	Передача момента от внешнего электромагнитного статора к внутреннему ротору через стенку сосуда	Герметичность; отсутствие проходного вала и уплотнения; стерильность рабочего объема	Засорение роторной камеры и опорных элементов; ограниченный крутящий момент при высокой вязкости среды
2.	Магнитные мешалки с донным или периферийным якорем	J. Smith, R. Johnson, Sotax AG	Аппарат для приготовления питательных сред с магнитным приводным кольцом, US 10668439 B2	Передача момента через стенку от внешнего магнитного кольца к внутреннему лопастному ротору	Свободный центральный объем; герметичность; периферийная передача крутящего момента	Ограниченная мощность магнитной муфты; риск заклинивания донного опорного узла волокнистыми частицами
3.	Магнитные мешалки с донным или периферийным якорем	M. Davis, Bio-Rad Laboratories	Система планарного бесщёточного магнитного перемешивания, US 12415167 B1	Бесконтактный бесщёточный привод с бегущим магнитным полем	Отсутствие проходных валов и уплотнений; возможность регулирования	Сложность электронного управления; отсутствие специализированного профиля лопастей для

					положения приводной зоны	подъема тяжелых фракций корма
4.	Механические верхнеприводны е мешалки со сквозным валом	Разработчик и систем PolyFermS и MPigut-IVM [73, 96]	Верхнеприводны е лопастные мешалки в составе систем PolyFermS и MPigut-IVM	Передача крутящего момента через вал, проходящий через крышку реактора	Высокий крутящий момент; возможность использования различных типов импеллеров; эффективное перемешивание вязких сред	Износ динамических уплотнений; риск подсоса кислорода; высокие локальные напряжения сдвига
5.	Насосные циркуляционные системы	H. Fischer, Fischer AG	Устройство для перемешивания жидкостей, CN 579418 A5	Реактивное вращение насадка за счет тангенциальног о истечения среды через сопла	Совмещение функций перекачивания и перемешивания; отсутствие отдельного привода мешалки	Засорение сопел волокнистыми компонентами; зависимость перемешивания от производительности насоса; рост гидравлического сопротивления
6.	Насосные циркуляционные системы	W. Zhang, Sinopec Ltd.	Аппарат с внешним циркуляционны м контуром для теплообмена и перемешивания, CN 2522163 Y	Циркуляция среды через теплообменник с возвратом потока в нижнюю зону реактора	Возможность термостатирования ; отсутствие внутренних приводных механизмов	Засорение патрубков и насоса; высокие напряжения сдвига; громоздкость внешних коммуникаций

7.	Насосные циркуляционные системы	H. Müller, Uhde GmbH	Перемешивающее-циркуляционное устройство для реакторов, DE 19503132 A1	Осевой насос и возврат потока в нижнюю часть реактора через внутренний перепускной трубопровод	Предотвращение осаждения; эффективное воздействие на придонную область	Заклинивание трубопровода волокнистыми включениями; риск повреждения микробных клеток и биопленок
8.	Мембранные и перистальтические системы	K. Becker, Becker GmbH	Устройство для перемешивания вязких сред, DE 2025011 A1	Перемещение среды за счет внешнего циклического обжатия эластичной рабочей камеры	Полная герметичность; отсутствие внутренних механических элементов; мягкое перемешивание	Износ и прокол мембраны твердыми частицами; сложность термостатирования; недолговечность

Выполненный анализ конструкций и способов перемешивания, применяемых в системах иЖКТ и биореакторах, показывает, что существующие решения не в полной мере соответствуют требованиям к обработке высоковязких гетерогенных сред, содержащих дисперсные кормовые компоненты. Механические мешалки со сквозным валом обеспечивают передачу крутящего момента, однако требуют нарушения герметичности реакционной емкости и применения динамических уплотнений, что ограничивает их использование при моделировании анаэробных процессов. Погружные магнитные якоря конструктивно проще и позволяют сохранить герметичность реактора, но при увеличении вязкости среды и содержания твердых частиц могут не обеспечивать необходимый крутящий момент, что приводит к снижению интенсивности перемешивания, образованию застойных зон и срыву магнитной связи. Насосные и рециркуляционные системы, в свою очередь, требуют дополнительных магистралей и узлов, подверженных засорению и износу при работе с полидисперсными кормовыми суспензиями.

Таким образом, существующие способы перемешивания не обеспечивают одновременного выполнения основных требований к системе иЖКТ свиней: сохранения герметичности реакционного объема, устойчивой передачи крутящего момента, равномерного перемещения высоковязкого химуса и надежной работы с дисперсными компонентами кормов. Выявленное противоречие заключается в необходимости повышения силового и гидродинамического воздействия на среду без применения сквозного вала и без нарушения герметичности реактора. Это обуславливает необходимость разработки герметичного магнитно-лопастного перемешивающего устройства, обеспечивающего устойчивую передачу крутящего момента и эффективное перемешивание искусственного химуса при сохранении заданных условий проведения эксперимента.

1.4 Выводы по первой главе. Цель и задачи исследования

1. Свиноводство – один из крупнейших потребителей комбикормов в России. Высокая доля кормовых затрат в себестоимости свинины требует достоверной оценки переваримости новых кормовых компонентов. Поскольку физиологические различия свиней с другими видами животных исключают прямой перенос результатов, а опыты *in vivo* ограничены стоимостью, длительностью и биоэтическими требованиями, возникает необходимость в разработке видоспецифичной автоматизированной системы ИЖКТ свиньи.

2. Рациональные конструктивно-режимные параметры перемешивающего устройства для высоковязкого гетерогенного химуса свиней остаются в значительной степени неопределёнными. Существующие способы перемешивания (донные магнитные якоря, сквозные валы, насосные контуры, мембранные камеры) не обеспечивают одновременного сохранения герметичности, устойчивой передачи крутящего момента и равномерного распределения твёрдых частиц корма.

3. Наиболее перспективной схемой перемешивания является герметичное магнитно-лопастное перемешивающее устройство с бесконтактным приводом. Однако его практическая реализация требует разработки математической модели гидродинамического взаимодействия лопастей с неньютоновской средой и аналитического условия несрыва моментной связи.

Цель работы – обоснование конструктивно-технологических параметров автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи с магнитно-лопастным перемешивающим устройством.

Задачи исследования.

1. Изучить существующие конструкции систем *in vitro*-моделирования желудочно-кишечного тракта и используемые в них способы перемешивания содержимого биореакторов.

2. Разработать математическую модель перемешивания вязкой неоднородной среды в автоматизированной системе имитации желудочно-кишечного тракта свиньи.

3. Провести численное моделирование на основе метода сглаженных частиц процесса перемешивания и определить конструктивно-технологические параметры магнитно-лопастного перемешивающего устройства.

4. Провести экспериментальные исследования автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи для оценки однородности содержимого в биореакторе.

5. Оценить экономическую эффективность применения разработанной автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи в сравнении с традиционными испытаниями *in vivo*.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ХИМУСА

2.1 Реологическое обоснование и математическая модель течения химуса свиньи в реакционном объеме биореактора

Разработка автоматизированной системы иЖКТ свиньи представляет собой комплексную междисциплинарную задачу, требующую интеграции инженерных решений, методов разработки систем автоматического управления и биологических подходов. Система предназначена для проведения *in vitro*-исследований процессов пищеварения и включает герметичный биореактор, в котором осуществляется перемешивание и направленное перемещение моделируемой среды.

Функциональная схема установки представлена на рисунке 2.1. В биореактор подаётся моделируемая среда, параметры которой контролируются в процессе эксперимента. Внутри рабочего объёма обеспечиваются её перемешивание, циркуляционное движение и последующий отвод, имитирующий транзит химуса. Совокупность указанных процессов определяет условия взаимодействия компонентов корма, ферментов и микробиоты, а также влияет на однородность среды и воспроизводимость результатов исследования.

Характер движения моделируемой среды в биореакторе зависит от её реологических свойств и параметров перемешивания. Поскольку химус представляет собой высоковязкую неньютоновскую среду, для обоснования конструктивных и режимных параметров перемешивающего устройства необходимо рассмотреть особенности её течения в ограниченном объёме биореактора.

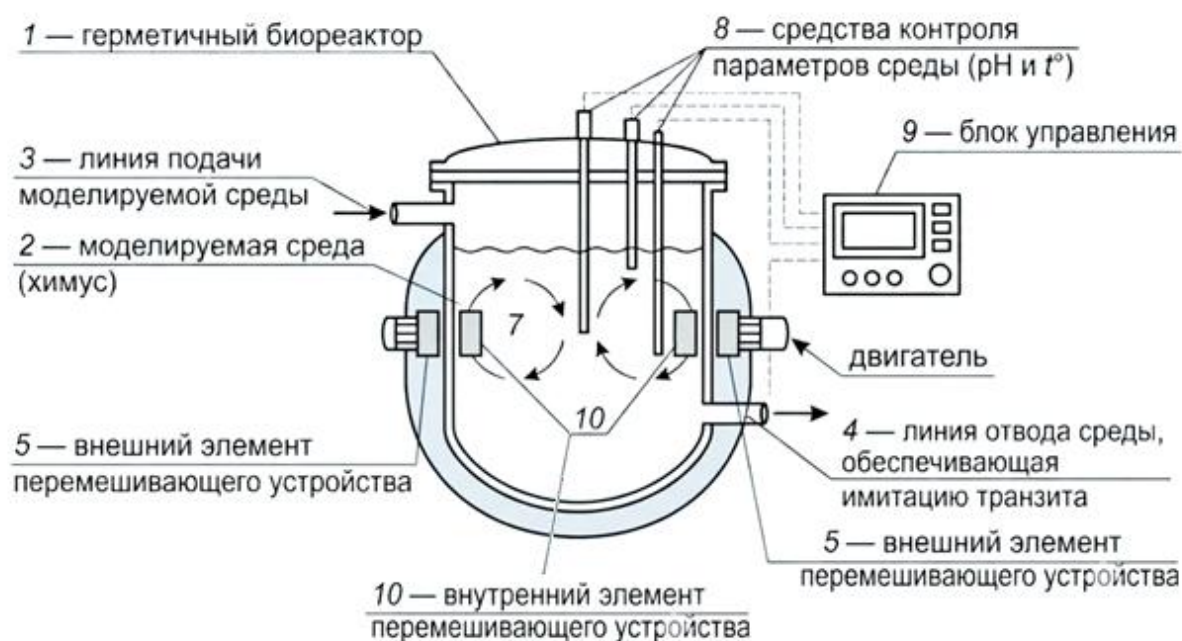


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы искусственного желудочно-кишечного тракта свиней

Его реологические свойства зависят от содержания дисперсной фазы, размера частиц и степени измельчения кормового сырья [72, 89, 98, 81].

Для описания течения химуса целесообразно рассмотреть две распространенные реологические модели: степенную модель Оствальда – де Вилия и модель Гершеля – Балкли. Выбор модели определяется характером экспериментальной реограммы и наличием или отсутствием предела текучести.

1. Двухпараметрический степенной закон Оствальда – де Вилия (для установившегося течения среды, начинающей течь при малейшем сдвиге) [34, 57] (2.1):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.1)$$

где τ – касательное напряжение сдвига в перемешиваемой среде, Па;

K – коэффициент консистенции среды (мера исходной густоты при $\dot{\gamma} = 1 \text{ c}^{-1}$), $\text{Па} \cdot \text{c}^n$;

$\dot{\gamma}$ – скорость деформации сдвига, c^{-1} ;

n – индекс течения среды, безразмерная величина.

2. Трехпараметрическая модель Гершеля – Балкли (учитывающая предел текучести – минимальное напряжение, необходимое для начала течения концентрированной кормовой суспензии) [34, 35] (2.2):

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (2.2)$$

где τ_0 – начальный предел текучести (минимальное усилие, при котором среда начинает течь), Па;

При $n < 1$ реологические уравнения описывают среду, вязкость которой снижается с ростом скорости сдвига (сдвигуотончающуюся, псевдопластичную).

Эффективная (кажущаяся) динамическая вязкость неньютоновской среды $\mu_{эфф}$ определяется как отношение касательного напряжения сдвига к скорости деформации (2.3):

$$\mu_{эфф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (2.3)$$

Подставляя выражение для закона Оствальда – де Виля (2.1) в формулу (2.3), получаем зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига (2.4):

$$\mu_{эфф} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}. \quad (2.4)$$

Для модели Гершеля – Балкли (2) выражение для эффективной вязкости принимает вид (2.5):

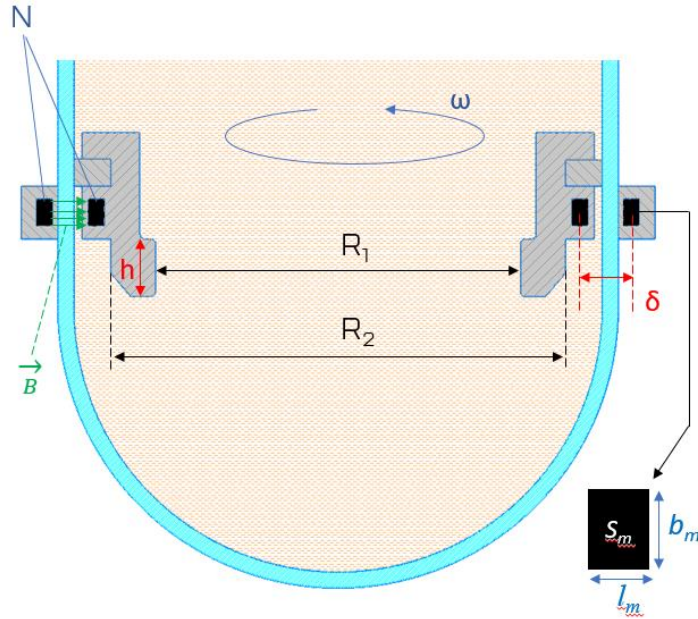
$$\mu_{эфф} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}. \quad (2.5)$$

Поскольку индекс течения $n < 1$, показатель степени $(n - 1)$ отрицателен. Это показывает, что с увеличением интенсивности перемешивания $\dot{\gamma}$ эффективная вязкость среды $\mu_{\text{эфф}}$ нелинейно снижается. Данное свойство сдвигуотончения учитывается при расчете кинематики течения массы в рабочем объеме биореактора.

Конструкция разработанного герметичного магнитно-лопастного перемешивателя (рисунок 2.2) представляет собой кольцевой ротор внутренним радиусом R_1 и внешним радиусом R_2 , установленный соосно внутри цилиндрической реакционной колбы диаметром $D = 2R_k$ на распорном направляющем кольце. На нижней части ротора закреплены z вертикальных лопастей высотой h (вдоль оси Z) и шириной $b = R_2 - R_1$ в радиальном направлении. Вращение лопастного ротора создает в кольцевом пространстве между внутренним диаметром ротора и стенкой сосуда ламинарно-сдвиговое течение неньютоновской среды.

Для построения математической модели гидродинамики химуса примем следующие допущения:

1. Среда является сплошной, несжимаемой ($\rho = \text{const}$) и изотермической ($T = 39^\circ\text{C}$).
2. Движение среды в кольцевом зазоре установившееся, ламинарное, с пространственной симметрией относительно вертикальной оси биореактора Z .
3. Явления пристенного скольжения на полимерных поверхностях ротора и стеклянной стенке колбы отсутствуют (условие прилипания).



R_1 – кольцевой ротор внутренним радиусом, R_2 – внешний радиус, h – высота вертикальной лопасти, δ – толщина стенки боросиликатной колбы, ω – угловая скорость, B – остаточная магнитная индукция материала $NdFeB$ EH, $S_m = b_m \cdot l_m$ – площадь полюсной поверхности одного магнита шириной b_m и длиной l_m , N – количество пар магнитов.

Рисунок 2.2 – Теоретическая схема магнитно-лопастного перемешивающего устройства

Рассмотрим течение в цилиндрической системе координат (r, θ, z) , где r – радиальная координата, θ – окружная координата, z – осевая координата. Уравнение движения сплошной неньютоновской среды в тензорной форме (уравнение Навье – Стокса в обобщенном виде) имеет вид [2, 53, 69] (2.6):

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \tau \quad (2.6)$$

где $v = (v_r, v_\theta, v_z)$ – вектор скорости потока, м/с;
 p – избыточное гидростатическое давление, Па;
 g – вектор ускорения свободного падения, м/с²;

τ – тензор касательных напряжений, Па.

В кольцевом канале реактора от внутреннего радиуса лопастей R_1 до стенки колбы радиусом R_k преобладающей составляющей является окружная скорость $v_\theta(r)$. С учетом сделанных допущений проекция уравнения движения (2.6) на окружную ось θ для установившегося течения в цилиндрических координатах принимает упрощенный вид (2.7):

$$\frac{d\tau_{r\theta}}{dr} + \frac{2}{r}\tau_{r\theta} = 0 \quad (2.7)$$

где $\tau_{r\theta}$ – касательное напряжение, действующее в окружном направлении между слоями жидкости, движущимися с разной скоростью, Па;
 r – текущий радиус.

Интегрирование дифференциального уравнения (2.7) дает распределение касательных напряжений по радиусу кольцевого канала (2.8):

$$\tau_{r\theta}(r) = \frac{C}{r^2} \quad (2.8)$$

где C – константа интегрирования, определяемая силовыми параметрами на границе вращающегося ротора.

Связь между касательным напряжением $\tau_{r\theta}$ и скоростью деформации сдвига $\dot{\gamma}$ для сдвигуотончающейся среды, подчиняющейся степенному закону (2.1), выражается через компоненту тензора скоростей деформаций (2.9):

$$\tau_{r\theta} = K \cdot \left(-r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right)^n \quad (2.9)$$

где $\tau_{r\theta}$ – касательное напряжение, действующее в окружном направлении между слоями жидкости, движущимися с разной скоростью, Па;
 K – коэффициент консистентности среды (мера исходной густоты при $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), $\text{Па} \cdot \text{с}^n$;

v_θ – окружная скорость;

n – индекс течения среды, безразмерная величина;

r – текущий радиус.

Приравнявая выражения (2.8) и (2.9), получаем нелинейное дифференциальное уравнение для профиля окружной скорости $v_\theta(r)$ (2.10):

$$-r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) = \left(\frac{C}{K \cdot r^2} \right)^{1/n} \quad (2.10)$$

где C – константа интегрирования, определяемая силовыми параметрами на границе вращающегося ротора.

Интегрируя уравнение (2.10) в пределах кольцевого зазора от радиуса ротора R_1 до стены колбы R_k с граничными условиями (2.11):

$$\begin{cases} v_\theta(R_1) = \omega \cdot R_1 & \text{– скорость на внутреннем радиусе ротора,} \\ v_\theta(R_k) = 0 & \text{– условие прилипания на стенке колбы,} \end{cases} \quad (2.11)$$

где $\omega = \frac{2\pi n_{об}}{60}$ – угловая скорость вращения ротора, рад/с ($n_{об}$ – частота вращения ротора, об/мин), получаем выражение для постоянной интегрирования C (2.12):

$$C = K \cdot \left[\frac{2 \cdot \omega}{n \cdot \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_k} \right)^{2/n} \right)} \right]^n \cdot R_1^2 \quad (2.12)$$

Подстановка константы C (2.12) в уравнение (2.10) и последующее интегрирование дают аналитическое выражение для профиля окружной скорости неньютоновского химуса по радиусу кольцевого канала $v_\theta(r)$ [2, 57] (2.13):

$$v_{\theta}(r) = \omega \cdot r \cdot \frac{\left(\frac{R_k}{r}\right)^{2/n} - 1}{\left(\frac{R_k}{R_1}\right)^{2/n} - 1} \quad (2.13)$$

где v_{θ} – окружная скорость;

r – текущий радиус;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

R_k – радиус до стены колбы;

R_1 – радиус ротора;

n – индекс течения среды, безразмерная величина.

Анализ формулы (2.13) показывает, что в отличие от ньютоновских жидкостей ($n = 1$), профиль скоростей псевдопластичного химуса ($n < 1$) имеет повышенную крутизну вблизи вращающегося ротора R_1 . Чем меньше индекс течения n , тем сильнее локализуется зона активного сдвига около лопастей и тем быстрее затухает скорость движения среды по направлению к стенке реактора R_k .

Определение локальных скоростей сдвига и эффективной динамической вязкости среды. Для определения сил гидродинамического сопротивления лопастей и расчета потребного крутящего момента необходимо установить среднее значение скорости сдвига $\dot{\gamma}_{cp}$ в рабочей зоне биореактора.

Дифференцируя выражение для профиля скоростей (2.13) по радиусу, получаем распределение локальной скорости деформации сдвига $\dot{\gamma}(r)$ в кольцевом канале (2.14):

$$\dot{\gamma}(r) = -r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) = \frac{2 \cdot \omega}{n \cdot \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_k} \right)^{2/n} \right)} \cdot \left(\frac{R_k}{r} \right)^{2/n} \quad (2.14)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации сдвига, с⁻¹.

Максимальное значение скорости сдвига достигается на поверхности лопастей ротора при $r = R_1$ (2.15):

$$\dot{\gamma} \frac{2 \cdot \omega}{n \cdot \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^{2/n}\right)_{max}} \quad (2.15)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации сдвига, с⁻¹;
 ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с;
 R_k – радиус до стены колбы;
 R_1 – радиус ротора;
 n – индекс течения среды, безразмерная величина.

Для кольцевых каналов средняя скорость деформации сдвига в объеме зазора аппроксимируется линейной зависимостью от частоты вращения (методика Мецнера – Отто) [6, 66] (2.16):

$$\dot{\gamma}_{cp} = B_k \cdot n_{об}, \quad (2.16)$$

где $\dot{\gamma}_{cp}$ – средняя скорость деформации сдвига, с-1;
 B_k – коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией лопастного ротора;
 $n_{об}$ – частота вращения ротора, об/мин.

Подставляя среднее значение скорости сдвига (2.16) в формулу степенного закона (2.4), получаем уравнение для средней эффективной динамической вязкости химуса в процессе перемешивания $\mu_{эфф.ср}$ (2.17):

$$\mu_{эфф.ср} = K \cdot \left(B_k \cdot \frac{n_{об}}{60}\right)^{n-1} \quad (2.17)$$

При учете начального предела текучести по модели Гершеля – Балкли (2.2) средняя эффективная вязкость записывается в виде (2.18):

$$\mu_{эфф.ср} = \frac{\tau_0}{B_k \cdot \frac{n_{об}}{60}} + K \cdot \left(B_k \cdot \frac{n_{об}}{60}\right)^{n-1}. \quad (2.18)$$

где τ_0 – начальный предел текучести (минимальное усилие, при котором среда начинает течь), Па;
 B_k – коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией лопастного ротора;
 $n_{об}$ – частота вращения ротора, об/мин.
 K – коэффициент консистентности среды (мера исходной густоты при $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), Па·с^{*n*}.

Полученные зависимости (2.13), (2.14) и (2.18) служат основой для последующего интегрального расчета сил гидродинамического сопротивления вертикальных лопастей.

2.2 Теоретический расчет крутящего момента гидродинамического сопротивления перемешивающего устройства

Расчёт силового взаимодействия перемешивающего устройства со средой необходим для определения мощности привода, прочностного расчёта элементов конструкции и оценки устойчивости магнитной связи. [6, 35].

Лопасты расположены под углом $\alpha = 90^\circ$ к плоскости вращения ротора (вдоль оси вращения Z). Такая ориентация выбрана из условия симметрии: при реверсивном вращении ротора (поочерёдно по часовой и против часовой стрелки для имитации перистальтических волн ЖКТ) лобовое сопротивление лопасти не зависит от направления вращения [6, 70].

Рассмотрим элементарный участок лопасти высотой h и радиальной длиной dr , находящийся на текущем радиусе $r \in [R_1, R_2]$. При вращении ротора с угловой скоростью ω элементарный участок лопасти движется относительно рабочей среды со скоростью (2.19):

$$v(r) = \omega \cdot r \quad (2.19)$$

где $v(r)$ – скорость элементарного участка лопасти относительно рабочей среды;
 ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с;
 r – текущий радиус, $r \in [R_1, R_2]$.

На вертикальную лопасть ($\alpha = 90^\circ$) со стороны гетерогенного химуса действуют две основные составляющие гидродинамических сил:

1. Сила лобового (нормального) давления dF_n , обусловленная скоростным напором среды и разностью давлений на напорной и тыльной сторонах лопасти.

2. Сила вязкостного сдвигового трения dF_τ , вызываемая касательными напряжениями в пристенном слое неньютоновской жидкости, обтекающей напорную и тыльную поверхности лопасти.

Поскольку лопасть установлена перпендикулярно направлению окружной скорости, элементарная нормальная сила лобового давления dF_n и элементарная сила вязкостного трения dF_τ направлены вдоль окружной оси θ , создавая суммарную окружную силу сопротивления (2.20 и 2.21):

$$dF_n(r) = \frac{1}{2} C_{x0} \cdot \rho \cdot v^2(r) \cdot dS_{np} = \frac{1}{2} C_{x0} \cdot \rho \cdot (\omega \cdot r)^2 \cdot (h \cdot dr); \quad (2.20)$$

$$dF_\tau(r) = 2 \cdot \tau_{cm}(r) \cdot dS_{лон} = 2 \cdot \tau_{cm}(r) \cdot (h \cdot dr), \quad (2.21)$$

где dF_n – элементарная нормальная сила лобового давления, Н;
 dF_τ – элементарная сила вязкостного трения, Н;
 C_{x0} – профильный коэффициент лобового сопротивления вертикальной прямоугольной пластины в сдвиговом потоке [6, 69, 78];
 ρ – плотность химуса, кг/м³;
 $dS_{np} = h \cdot dr$ – площадь проекции элемента лопасти на плоскость, перпендикулярную вектору окружной скорости, м²;
 $dS_{лон} = h \cdot dr$ – площадь одной стороны элемента лопасти, м²;
 $\tau_{ct}(r)$ – касательное напряжение сдвига на поверхности лопасти, определяется формулой (2.1), Па.

Множитель 2 в формуле (2.21) учитывает трение среды о две поверхности (передавливающую и тыльную) элементарной лопасти.

Суммарная окружная сила гидродинамического сопротивления $dF_\theta(r)$, действующая на элементарный участок лопасти шириной dr , равна сумме лобового и вязкостного сопротивлений при $\alpha = 90^\circ$ (2.22):

$$\begin{aligned} dF_\theta(r) &= dF_n(r) + dF_\tau(r) = \\ &= \frac{1}{2} C_{x0} \cdot \rho \cdot v^2(r) \cdot dS_{np} = \frac{1}{2} C_{x0} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot h \cdot dr + 2 \cdot \tau_{cm}(r) \cdot h \cdot dr \end{aligned} \quad (2.22)$$

где dF_θ – суммарная окружная сила гидродинамического сопротивления, Н;

dF_n – элементарная нормальная сила лобового давления, Н;

dF_τ – элементарная сила вязкостного трения, Н;

C_{x0} – профильный коэффициент лобового сопротивления вертикальной прямоугольной пластины в сдвиговом потоке [6, 61, 70];

ρ – плотность химуса, кг/м³;

r – текущий радиус, $r \in [R_1, R_2]$;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

$dS_{np} = h \cdot dr$ – площадь проекции элемента лопасти на плоскость, перпендикулярную вектору окружной скорости, м²;

$dS_{лоп} = h \cdot dr$ – площадь одной стороны элемента лопасти, м²;

$\tau_{ст}(r)$ – касательное напряжение сдвига на поверхности лопасти, определяется формулой (2.1), Па.

Касательное напряжение сдвига $\tau_{ст}(r)$ на поверхности лопасти (2.23) определяется реологическим степенным законом Оствальда – де Виля (2.1):

$$\tau_{cm}(r) = K \cdot \dot{\gamma}_{cm}^n(r) \quad (2.23)$$

где $\tau_{ст}(r)$ – касательное напряжение сдвига, Па;

$\dot{\gamma}_{cp}$ – средняя скорость деформации сдвига, с⁻¹.

Локальная скорость сдвига $\dot{\gamma}_{cm}^n(r)$ у поверхности лопасти пропорциональна окружной скорости движения $v(r) = \omega \cdot r$ и обратно пропорциональна толщине гидродинамического пограничного слоя $\delta_{гидр}$ (2.24):

$$\dot{\gamma}_{cm}^n(r) = \lambda_0 \cdot \omega \cdot r \quad (2.24)$$

где $\lambda_0 = \frac{1}{\delta_{гидр}}$ – коэффициент стесненности сдвигового потока в кольцевом канале биореактора, m^{-1} [6, 8];
 $\delta_{гидр}$ – толщина гидродинамического пограничного слоя, м;
 r – текущий радиус, $r \in [R_1, R_2]$;
 ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Подстановка локальной скорости сдвига (2.24) в реологическое уравнение (2.23) дает выражение для касательного напряжения на поверхности лопасти (2.25):

$$\tau_{cm}(r) = K \cdot (\lambda_0 \cdot \omega \cdot r)^n = K \cdot \lambda_0^n \cdot \omega^n \cdot r^n \quad (2.25)$$

где K – коэффициент консистентности среды (мера исходной густоты при $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), $Pa \cdot c^n$.

Подставляя выражение касательного напряжения (2.25) в дифференциальное уравнение окружной силы (2.22), получаем (2.26):

$$dF_{\theta}(r) = \left[\frac{1}{2} C_{x0} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot h \cdot r^2 + 2 \cdot K \cdot \lambda_0^n \cdot \omega^n \cdot h \cdot r^n \right] dr \quad (2.26)$$

где C_{x0} – профильный коэффициент лобового сопротивления вертикальной прямоугольной пластины в сдвиговом потоке [6, 69, 78];
 ρ – плотность химуса, kg/m^3 ;
 h – высота лопасти, м.

Элементарный крутящий момент гидродинамического сопротивления $dM(r)$, создаваемый единичным участком одной вертикальной лопасти относительно оси вращения Z , равен произведению окружной силы $dF_\theta(r)$ на плечо r (2.27):

$$dM(r) = r \cdot dF_\theta(r) = \left[\frac{1}{2} C_{x0} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot h \cdot r^3 + 2 \cdot K \cdot \lambda_0^n \cdot \omega^n \cdot h \cdot r^{n+1} \right] dr \quad (2.27)$$

где $dM(r)$ – элементарный крутящий момент гидродинамического сопротивления, Н·м;

r – текущий радиус, плечо, $r \in [R_1, R_2]$;

dF_θ – суммарная окружная сила гидродинамического сопротивления, Н;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Для определения полного крутящего момента сопротивления $M_{\text{сопр}}$, действующего на ротор с числом лопастей z , проинтегрируем дифференциальное уравнение (2.27) по радиальной ширине лопасти от внутреннего края R_1 до внешнего радиуса R_2 (2.28):

$$M_{\text{сопр}} = z \int_{R_1}^{R_2} dM(r) = z \int_{R_1}^{R_2} \left[\frac{1}{2} C_{x0} \rho \omega^2 h \cdot r^3 + 2K \lambda_0^n \omega^n h \cdot r^{n+1} \right] dr \quad (2.28)$$

где $M_{\text{сопр}}$ – полный крутящий момент, действующий на ротор, Н·м;

K – коэффициент консистентности среды (мера исходной густоты при $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), Па·с ^{n} ;

λ_0 – коэффициент стесненности сдвигового потока в кольцевом канале биореактора, м⁻¹.

Выполняя интегрирование степенных функций по радиусу r , получаем аналитическое выражение для полного момента гидродинамического сопротивления (2.29):

$$M_{\text{сопр}} = z \cdot \left[\frac{1}{2} C_{x0} \rho \omega^2 h \cdot \left(\frac{R_2^4 - R_1^4}{4} \right) + 2K \lambda_0^n \omega^n h \cdot \left(\frac{R_2^{n+2} - R_1^{n+2}}{n+2} \right) \right] \quad (2.29)$$

где C_{x0} – профильный коэффициент лобового сопротивления вертикальной прямоугольной пластины в сдвиговом потоке [6, 69, 78];
 ρ – плотность химуса, кг/м³;
 ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.
 h – высота лопасти, м;
 R_1 – внутренний радиус кольцевого ротора, м;
 R_2 – внешний радиус кольцевого ротора, м;
 z – число лопастей, безразмерная величина;
 n – индекс течения среды, безразмерная величина;
 K – коэффициент консистентности среды (мера исходной густоты при $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), Па·с ^{n} ;

Преобразуя коэффициенты, получаем окончательное аналитическое выражение для крутящего момента гидродинамического сопротивления неньютоновской среды вертикальному лопастному ротору при реверсивном перемешивании (2.30):

$$M_{\text{comp}} = \frac{1}{8} z C_{x0} \rho \omega^2 h \cdot (R_2^4 - R_1^4) + \frac{2}{n+2} z K \lambda_0^n \omega^n h \cdot (R_2^{n+2} - R_1^{n+2}) \quad (2.30)$$

С целью упрощения инженерных расчетов объединим постоянные геометрические и реологические комплексы через обобщенный гидродинамический коэффициент A_g и вязкостно-структурный коэффициент B_g (2.31) и (2.32):

$$A_g = \frac{1}{8} C_{x0} \rho h \cdot (R_2^4 - R_1^4); \quad (2.31)$$

$$B_g = \frac{2}{n+2} K \lambda_0^n h \cdot (R_2^{n+2} - R_1^{n+2}). \quad (2.32)$$

Тогда математическая модель крутящего момента сопротивления (2.26) принимает компактный двухчленный вид [6, 8] (2.33):

$$M_{\text{сопр}} = z \cdot [A_g \cdot \omega^2 + B_g \cdot \omega^n] \quad (2.33)$$

Анализ полученного уравнения (2.33) позволяет оценить вклад инерционной и вязкостной составляющих гидродинамического сопротивления химуса:

1. Влияние частоты вращения $\omega(n_{\text{об}})$:

- первое слагаемое $A_g \omega^2$ характеризует инерционное динамическое сопротивление среды и пропорционально квадрату угловой скорости ω^2 ;
- второе слагаемое $B_g \omega^n$ отражает вязкопластическое сопротивление неньютоновского химуса и пропорционально угловой скорости в степени индекса течения ω^n ;
- в рабочей зоне низких частот вращения преобладающим является вязкостное слагаемое $B_g \omega^n$, обусловленное высоким коэффициентом консистентности K .

2. Влияние геометрических параметров лопастей ($h, b = R_2 - R_1, z$):

- крутящий момент $M_{\text{сопр}}$ возрастает прямо пропорционально высоте лопасти h и числу лопастей z ;
- радиальная ширина лопасти $b = R_2 - R_1$ входит в формулу в высших степенях $(R_2^4 - R_1^4)$ и $(R_2^{n+2} - R_1^{n+2})$, так как плечо приложения гидродинамических сил увеличивается к внешнему радиусу колбы R_2 .

3. Обеспечение реверсивного движения:

- при $\alpha = 90^\circ$ крутящий момент $M_{\text{сопр}}$ одинаков при обоих направлениях вращения (по часовой и против часовой стрелки), что обеспечивает стабильность реверсивного режима и исключает срыв кольцевой магнитной муфты.

Полученная математическая зависимость (2.30), (2.33) является базовой для формирования условия динамической устойчивости моментной связи герметичной кольцевой магнитной муфты в подразделе 2.3.

2.3 Математическая модель силового взаимодействия магнитной системы и условие устойчивости вращения без срыва момента

Обеспечение герметичности биотехнологического реактора иЖКТ при перемешивании неньютоновских сред достигнуто путем отказа от сквозного механического вала и применения кольцевой магнитной муфты с внешним приводом [12, 63].

Конструкция перемешивающего узла включает внешнее приводное кольцо радиусом R_{m2} , размещенное снаружи реакционной колбы, и внутренний лопастной ротор радиусом R_{m1} , расположенный внутри колбы на неподвижном кольце-направляющей. На внешнем и внутреннем кольцах равномерно по окружности с шагом $\tau_m = \frac{2\pi R_m}{N}$ смонтированы N пар постоянных магнитов прямоугольного сечения из высокотермостойкого сплава NdFeB марки EH [12, 30].

Магнитное взаимодействие между ведущей и ведомой полумуфтами осуществляется через экранирующую немагнитную стенку реакционной колбы из боросиликатного стекла.

Суммарный рабочий немагнитный зазор δ между обращенными друг к другу полюсами внутренних и внешних магнитов равен (2.34):

$$\delta = \delta_{ст} + 2 \cdot \delta' \quad (2.34)$$

где $\delta_{ст}$ – толщина стенки боросиликатной колбы, м;

δ' – радиальный гарантированный монтажный зазор между поверхностью колбы и магнитами, м.

Расчет магнитной индукции в зазоре и удерживающего момента. Магнитная индукция B_δ в немагнитном рабочем зазоре δ при радиальном намагничивании прямоугольных магнитов с высотой h_m в направлении намагничивания определяется по выражению Ганзбурга – Федотова [12] (2.35):

$$B_{\delta} = B_r \cdot \frac{h_m}{h_m + \mu_{rm} \cdot \delta \cdot k_{\sigma}} \quad (2.35)$$

где B_r – остаточная магнитная индукция материала $NdFeB$ ЕН, Тл;
 h_m – высота (толщина) постоянного магнита в направлении намагничивания, м;
 μ_{rm} – относительная магнитная проницаемость материала магнита, безразмерная;
 k_{σ} – коэффициент рассеяния магнитного потока по торцам и боковым граням полюсов, безразмерная.

Максимальная сила тангенциального притяжения F_{m1} , возникающая между одной парой взаимодействующих магнитов через зазор δ при угловом рассогласовании полюсов, определяется через нормальную силу соотношения Максвелла с учетом коэффициента тангенциального сдвига k_{τ} [12, 30] (2.36):

$$F_{m1} = k_{\tau} \cdot \frac{B_{\delta}^2 \cdot S_m}{2 \cdot \mu_0} \quad (2.36)$$

где $k_{\tau} \approx 0,30$ – коэффициент тангенциального взаимодействия полюсов для цилиндрических экранированных магнитных муфт, безразмерная [12];
 $S_m = b_m \cdot l_m$ – площадь полюсной поверхности одного магнита шириной b_m и длиной l_m , м²;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

При передаче крутящего момента под действием внешней гидродинамической нагрузки ведомый ротор поворачивается относительно ведущего кольца на угол рассогласования β . Угловая зависимость электромагнитного удерживающего момента кольцевой муфты $M_{\text{магн}}(\beta)$ описывается синусоидальной характеристикой (2.37):

$$M_{\text{магн}}(\beta) = M_{\text{удерж}} \cdot \sin(p \cdot \beta) \quad (2.37)$$

где $p = \frac{N}{2}$ – число пар полюсов магнитной системы (N – общее количество магнитов на роторе);

β – угол геометрического рассогласования осей противоположных магнитов, рад;

$M_{\text{удерж}}$ – предельный удерживающий (срывной) крутящий момент магнитной муфты, Н·м.

Предельный удерживающий момент $M_{\text{удерж}}$, передаваемый кольцевой муфтой при максимальном угловом сдвиге полюсов $\beta \frac{\pi}{2p_{\max}}$, равен суммарному моменту сил тангенциального взаимодействия всех N пар магнитов на среднем радиусе их расположения $R_m = \frac{R_{m1} + R_{m2}}{2}$ (2.38):

$$M_{\text{удерж}} = N \cdot R_m \cdot F_{m1} = N \cdot R_m \cdot k_{\tau} \cdot \frac{B_{\delta}^2 \cdot S_m}{2 \cdot \mu_0}. \quad (2.38)$$

где N – общее количество магнитов на роторе, безразмерная;

R_m – средний радиус расположения всех N пар магнитов, м;

F_{m1} – сила соотношения Максвелла, Н;

k_{τ} – коэффициент тангенциального взаимодействия полюсов для цилиндрических экранированных магнитных муфт, безразмерная;

B_{δ} – магнитная индукция в немагнитном рабочем зазоре δ , Тл;

$S_m = b_m \cdot l_m$ – площадь полюсной поверхности одного магнита шириной b_m и длиной l_m , м²;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Подставляя выражение для магнитной индукции (2.31) в формулу удерживающего момента (2.34), получаем полное аналитическое уравнение предельного момента кольцевой магнитной муфты (2.39):

$$M_{\text{удерж}} = \frac{k_{\tau} \cdot N \cdot R_m \cdot S_m \cdot B_r^2 \cdot h_m^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot (h_m + \mu_{rm} \cdot \delta \cdot k_{\sigma})^2}. \quad (2.39)$$

где $M_{\text{удерж}}$ – предельный удерживающий (срывной) крутящий момент магнитной муфты, Н·м;

k_{τ} – коэффициент тангенциального взаимодействия полюсов для цилиндрических экранированных магнитных муфт, безразмерная;

N – общее количество магнитов на роторе, безразмерная;

R_m – средний радиус расположения всех N пар магнитов, м;

$S_m = b_m \cdot l_m$ – площадь полюсной поверхности одного магнита шириной b_m и длиной l_m , м²;

B_r – остаточная магнитная индукция материала $NdFeB$ EH, Тл;

h_m – высота (толщина) постоянного магнита в направлении намагничивания, м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

μ_{rm} – относительная магнитная проницаемость материала магнита, безразмерная;

δ – суммарный рабочий немагнитный зазор, м;

k_{σ} – коэффициент рассеяния магнитного потока по торцам и боковым граням полюсов, безразмерная.

Анализ зависимости (2.35) показывает, что предельный удерживающий момент $M_{\text{удерж}}$ прямо пропорционален коэффициенту тангенциального сдвига k_{τ} , количеству магнитных пар N , радиусу размещения R_m и квадрату остаточной индукции B_r^2 , и обратно пропорционален квадрату величины суммарного зазора δ^2 .

Аналитическое условие динамической устойчивости и несрыва магнитной связи. Для обеспечения непрерывного вращения перемешивающего ротора без срыва магнитной связи и без перехода муфты в асинхронный режим качения предельный удерживающий момент муфты $M_{\text{удерж}}$ должен превышать максимальный суммарный момент сопротивления среды $M_{\text{сопр.макс}}$ с учетом коэффициента запаса k_s (2.40):

$$M_{\text{сопр.макс}} \cdot k_s \leq M_{\text{удерж}} \quad (2.40)$$

где $M_{сопр\max}$ – максимальный суммарный момент сопротивления, Н·м,
 $k_s = 1,5 \dots 2,0$ – нормативный коэффициент запаса устойчивости
 моментной связи [12, 30];
 $M_{удерж}$ – предельный удерживающий (срывной) крутящий момент
 магнитной муфты, Н·м.

Суммарный момент сопротивления вращению ротора в биореакторе складывается из трех основных составляющих:

1. Гидродинамического момента сопротивления установившегося движения неньютоновского химуса $M_{сопр}$, полученного в подразделе 2.2 (формула 2.30):

$$M_{сопр} = \frac{1}{8} z C_{x0} \rho \omega^2 h \cdot (R_2^4 - R_1^4) + \frac{2}{n+2} z K \lambda_0^n \omega^n h \cdot (R_2^{n+2} - R_1^{n+2}) \quad (2.41)$$

где $M_{сопр}$ – полный крутящий момент, действующий на ротор, Н·м;
 z – число лопастей, безразмерная величина;
 C_{x0} – профильный коэффициент лобового сопротивления вертикальной
 прямоугольной пластины в сдвиговом потоке [6, 69, 78];
 ρ – плотность химуса, кг/м³;
 ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.
 h – высота лопасти, м;
 R_1 – внутренний радиус кольцевого ротора, м;
 R_2 – внешний радиус кольцевого ротора, м;
 n – индекс течения среды, безразмерная величина;
 K – коэффициент консистенции среды (мера исходной густоты
 при $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), Па·с ^{n} ;
 λ_0 – коэффициент стесненности сдвигового потока в кольцевом канале
 биореактора, м⁻¹.

2. Начального момента преодоления предела текучести химуса $M_{\tau 0}$ при страгивании ротора из состояния покоя ($\omega \rightarrow 0$), обусловленного наличием структурного каркаса по модели Гершеля – Балкли (из формулы 2.2) (2.42):

$$M_{\tau 0} = z \int_{R_1}^{R_2} 2 \cdot \tau_0 \cdot h \cdot r \cdot dr = z \cdot \tau_0 \cdot h \cdot (R_2^2 - R_1^2) \quad (2.42)$$

где $M_{\tau 0}$ – начальный момент преодоления предела текучести химуса при страгивании ротора из состояния покоя, Н·м;

τ_0 – начальный предел текучести (минимальное усилие, при котором среда начинает течь), Па;

r – текущий радиус, плечо, $r \in [R_1, R_2]$;

z – число лопастей, безразмерная величина.

3. Момент механического трения скольжения $M_{тр}$ сопряжении между вращающимся лопастным ротором и неподвижным распорным кольцом-направляющей из полимера Creadur под действием сил радиального магнитного притяжения полумуфт (2.43):

$$M_{тр} = f_{тр} \cdot F_{рад} \cdot R_{напр}, \quad (2.43)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения скольжения полимера Creadur по полимерной направляющей в жидкой среде ($f_{тр} = 0,04 \dots 0,06$);

$F_{рад}$ – результирующая сила радиального магнитного притяжения при несоосности зазора, Н;

$R_{напр}$ – радиус поверхности контакта ротора с направляющим кольцом, м.

Объединяя составляющие (2.26, 2.37, 2.38) и подставляя их совместно с выражением (2.35) в критериальное условие (2.44), получаем окончательное математическое условие динамической устойчивости и несрыва моментной связи кольцевой магнитной мешалки [6, 12, 30, 35]:

$$k_s [z\tau_0 h(R_2^2 - R_1^2) + z(A_g \omega^2 + B_g \omega^n) + M_{mp}] \leq \frac{k_\tau N R_m S_m B_r^2 h_m^2}{2\mu_0(h_m + \mu_{rm}\delta k_s)^2}, \quad (2.44)$$

где $k_s = 1,5 \dots 2,0$ – нормативный коэффициент запаса устойчивости моментной связи [12, 30];

z – число лопастей, безразмерная величина;

τ_0 – начальный предел текучести (минимальное усилие, при котором среда начинает течь), Па;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

h – высота лопасти, м;

R_1 – внутренний радиус кольцевого ротора, м;

R_2 – внешний радиус кольцевого ротора, м;

n – индекс течения среды, безразмерная величина;

$M_{тр}$ – момент механического трения скольжения сопряжении между вращающимся лопастным ротором и неподвижным распорным кольцом-направляющей, Н·м;

k_τ – коэффициент тангенциального взаимодействия полюсов для цилиндрических экранированных магнитных муфт, безразмерная;

N – общее количество магнитов на роторе, безразмерная;

R_m – средний радиус расположения всех N пар магнитов, м;

$S_m = b_m \cdot l_m$ – площадь полюсной поверхности одного магнита шириной b_m и длиной l_m , м²;

B_r – остаточная магнитная индукция материала $NdFeB$ EH, Тл;

h_m – высота (толщина) постоянного магнита в направлении намагничивания, м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

μ_{rm} – относительная магнитная проницаемость материала магнита, безразмерная;

δ – суммарный рабочий немагнитный зазор, м;

k_σ – коэффициент рассеяния магнитного потока по торцам и боковым граням полюсов, безразмерная;

A_g и B_g – обобщенные гидродинамические коэффициенты, определенные формулами (2.31) и (2.32):

$$A_g = \frac{1}{8} C_{x0} \rho h \cdot (R_2^4 - R_1^4)$$

$$B_g = \frac{2}{n+2} K \lambda_0^n h \cdot (R_2^{n+2} - R_1^{n+2})$$

Аналитическое условие (2.44) связывает в единую систему конструктивные параметры магнитной муфты (N , R_m , S_m , B_r , δ), геометрию лопастного ротора (z , h , R_1 , R_2), режим перемешивания ($\omega = \frac{2\pi n_{об}}{60}$) и реологические свойства свиного химуса (τ_0 , K , n , ρ).

Данное уравнение позволяет на этапе проектирования биореактора определить минимально необходимое количество магнитов N или предельно допустимую частоту вращения $n_{об}$, исключающие срыв магнитного зацепления при переработке концентрированных комбикормов.

2.4 Выводы по второй главе

1. На основе анализа физико-механических свойств химуса свиньи обосновано применение моделей неньютоновского течения. Для описания реологических свойств среды рассмотрены степенная модель Оствальда – де Вилля и трехпараметрическая модель Гершеля – Балкли, учитывающая предел текучести.

2. Получены аналитические зависимости для профиля окружной скорости, локальной скорости деформации сдвига и средней эффективной вязкости химуса в кольцевом канале биореактора. Анализ зависимостей показал, что у псевдопластичной среды ($n < 1$) зона активного сдвига

локализуется вблизи лопастей, а скорость движения среды резко затухает по направлению к стенке реактора.

3. Выведена интегральная математическая модель крутящего момента гидродинамического сопротивления вертикального лопастного ротора, учитывающая инерционную и вязкопластическую составляющие нагрузки. Показано, что при ориентации лопастей $\alpha = 90^\circ$ момент сопротивления одинаков по модулю при реверсивном вращении ротора, что обеспечивает симметричность реверсивного режима.

4. Разработана математическая модель силового взаимодействия кольцевой магнитной системы на постоянных магнитах $NdFeB$ марки EH и сформулировано аналитическое условие несрыва моментной связи (2.39). Модель связывает параметры магнитной муфты и геометрию ротора с моментом сопротивления среды, который зависит от частоты вращения и реологических свойств химуса.

3 ПРОГРАММА, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Цель и программа лабораторных исследований

Целью исследований являлась разработка и экспериментальная апробация автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиней, обеспечивающей воспроизведение основных физико-химических и гидродинамических условий пищеварения, а также оценку качества сельскохозяйственных комбикормов в экспериментальных условиях.

Программа лабораторных исследований направлена на обоснование внедрения автоматизированной системы ИЖКТ свиньи в оценку качества комбикормов.

Для достижения целей программы лабораторных исследований необходимо было решить следующие подзадачи:

- сформулировать техническое задание для разработки экспериментальной установки ИЖКТ свиньи;
- провести конструирование и сборку опытного образца установки, имитирующей несколько отделов ЖКТ свиньи с функцией автоматического поддержания физиологических параметров;
- описать методику апробации в эксперименте автоматизированной системы, имитирующей пищеварительный тракт свиньи
- определить реологические характеристики искусственного химуса методом ротационной вискозиметрии;
- разработать, настроить и откалибровать численную модель процесса перемешивания искусственного химуса методом сглаженных частиц;

- провести многофакторный вычислительный эксперимент по оценке влияния конструктивных и режимных параметров перемешивающего устройства на гидродинамические характеристики процесса;
- определить рациональные параметры перемешивающего устройства по критериям однородности скоростного поля, крутящего момента гидродинамического сопротивления и устойчивости магнитной связи;
- провести апробацию в эксперименте автоматизированной системы, имитирующей пищеварительный тракт свиньи;
- провести сравнительное исследование по оценке качества сельскохозяйственных комбикормов с использованием установки.

3.2 Техническое задание и общая концепция экспериментальной установки

На основании анализа существующих моделей искусственного ЖКТ (подробно рассмотренных в разделе 1.2) и анатомо-физиологических особенностей пищеварительного тракта свиньи было сформулировано техническое задание, определяющее следующие требования к разрабатываемой системе:

1. Использование для получения установки биореакторов, трубок и других компонентов, контактирующих с реакционной средой, материалов устойчивых к паровой стерилизации (для некоторых элементов системы допускается низкотемпературная стерилизация).
2. Модульность конструкции, позволяющая последовательно соединять от 3 до 7 биореакторов.
3. Моделирование перистальтических движений с использованием механических или гидравлических систем.
4. Подключение к биореакторам датчиков температуры и pH.
5. Создание анаэробных условий в биореакторах для поддержания соответствующей микрофлоры.

6. Возможность введения во все биореакторы субстанций и жидкостей (буферных растворов, ферментов, питательных веществ, бактериальной взвеси) и включение в схему системы соответствующих резервуаров и насосов.

7. Возможность отбора образцов из биореакторов при сохранении непрерывности процесса культивирования.

8. Наличие автоматизированной системы управления процессами и непрерывного сбора данных о параметрах системы.

9. Разработка программного комплекса управления (модулей), который должен включать возможность изменения оператором следующих параметров: температура реакционной смеси, уровень pH реакционной смеси, частота перемешиваний в биореакторах, время транзита содержимого между секциями установки.

10. Применение биореакторов со следующими характеристиками: объем реакционной емкости – 500-1500 мл, температура – 37-42°C, pH – 2,0-9,0, частота и характер перемешивания – 1-20 ритмичных перемешиваний в минуту.

Основной задачей устройств *in vitro*, моделирующих работу отделов ЖКТ животных или человека, является поддержание в системе температуры и pH в физиологических пределах. Для свиньи диапазон колебаний температуры ЖКТ здорового животного составляет от 38,0 до 39,5°C и практически не меняется от ротовой полости до прямой кишки. Диапазон изменения pH составляет от 2,0-3,0 в желудке до 7,0-8,0 в подвздошной кишке. Традиционная схема построения подобных устройств строится на базе трех независимых резервуаров, имитирующих желудок, тонкий и толстый кишечник и подразумевает ручной перенос содержимого из одного резервуара в другой. Такая концепция не удовлетворяет запросам современных исследований [48].

Для получения достоверных результатов необходимо повышать степень физиологического подобия путем фрагментации условных отделов ЖКТ. Целесообразно обеспечить рост pH отдела тонкого кишечника по направлению к толстому кишечнику и моделировать тремя независимыми резервуарами –

двенадцатиперстная кишка (рН 6,0-7,0), тощая кишка (рН 6,5-7,5), подвздошная кишка (рН 7,0-8,0). Толстый кишечник также оптимально фрагментировать на слепую кишку (рН 6,0-6,5), восходящую, поперечную и нисходящие ободочные кишки (рН 6-6,8) и прямую кишку (рН 6,5-7,0). Подобная система должна обладать возможностью автоматического переноса содержимого между резервуарами.

Представленная концепция легла в основу конструирования экспериментальной установки иЖКТ свиньи.

Лабораторные исследования по разработке, конструированию и сборке экспериментальной установки иЖКТ свиньи, проведены на базе Научно-образовательного центра «Медицинское приборостроение» ДГТУ в рамках выполнения государственного задания «Молекулярные механизмы взаимодействия сообществ кишечных микроорганизмов *in vivo* и *in vitro* на базе автоматизированной системы имитации ЖКТ свиньи» (номер ЕГИСУ НИОКР 124111200008-4).

Монтаж компонентов установки был проведен на основе лабораторного стенда из соединяемых блоков быстрого монтажа, выполненных из конструкционного алюминиевого профиля 20×20 мм с V-образным пазом (рисунок 3.1). Такое решение позволяет быстро и удобно проводить модификацию и масштабирование установки в соответствии с задачами исследования.

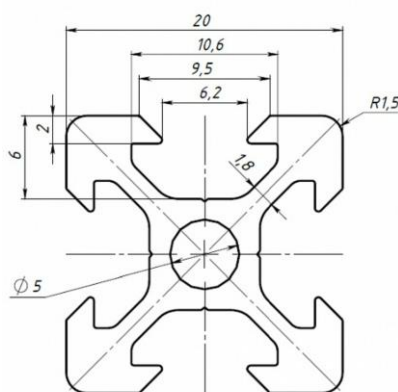


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение конструкционного профиля

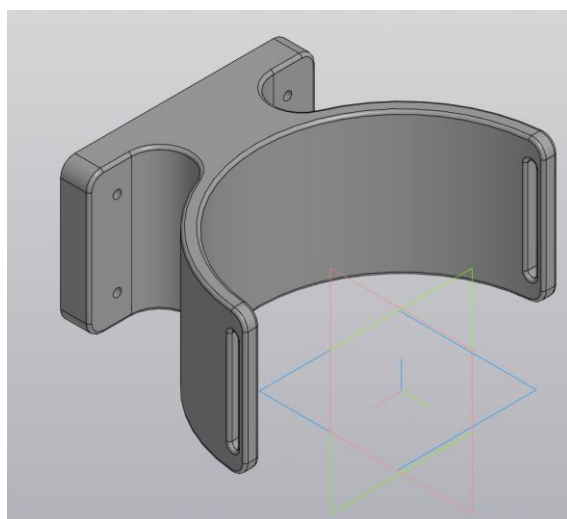
На рисунке 3.2 представлен внешний вид собранного стенда. Благодаря выбранной конструкции размер стенда может быть адаптирован согласно необходимому количеству секций, имитирующих ЖКТ свиньи.



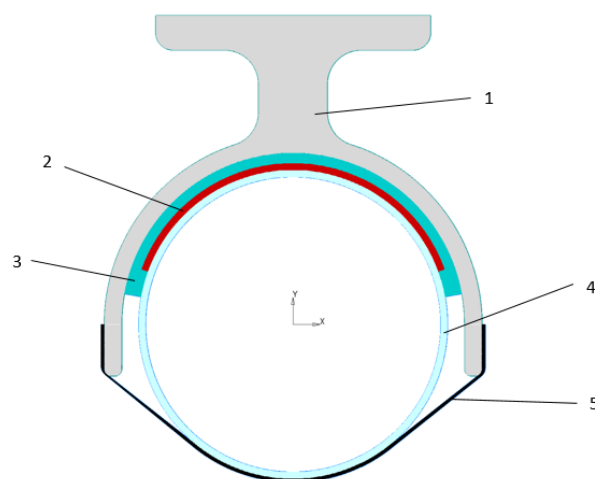
Рисунок 3.2 – Внешний вид стенда установки

В качестве реакционных емкостей использовались колбы из боросиликатного стекла со сферическим дном емкостью 0,5-1,5 л. Для их закрепления на стенде были изготовлены специальные кронштейны (рисунок 3.3, а).

Для нагрева реакционной среды использовался пленочный электронагреватель 190x35 мм мощностью 17 Вт, с номинальным напряжением питания 12 В. Нагреватель был смонтирован на поверхности кронштейна через прослойку термоизоляционной ленты из вспененного полиуретана толщиной 5 мм (рисунок 3.3, б). Удержание колбы и контакт с нагревательным элементом обеспечивался ремнем с фиксатором контактной лентой (липучкой).



а



б

а – 3D-модель; б – схема монтажа нагревательного элемента; 1 – кронштейн колбы; 2 – нагревательный элемент; 3 – теплоизоляционный слой; 4 – колба; 5 – удерживающий ремень.

Рисунок 3.3 – Кронштейн для фиксации реакционных колб с нагревательным элементом

Герметичность реакционной емкости обеспечивалась крышкой с набором отверстий для монтажа датчиков и штуцеров подключения (рисунок 3.4). Данная деталь была получена из термопластичного полиуретана, материала, достаточно эластичного для обтюрации элементов и имеющего температуру эксплуатации до 150°C, что позволяет подвергать его паровой стерилизации.

Датчик температуры помещался в реакционную среду в слепой трубке из нержавеющей стали марки ANSI 304. Для корректного измерения температуры между трубкой и телом датчика была помещена термопроводящая паста КПТ-8 (рисунок 3.5).

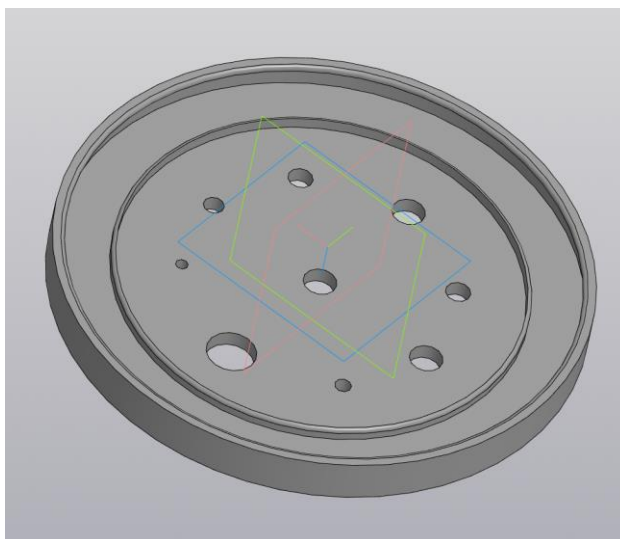
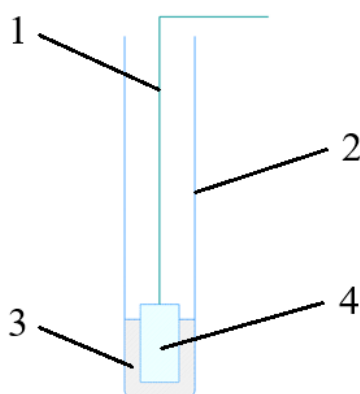


Рисунок 3.4 – Модель крышки реакционной емкости



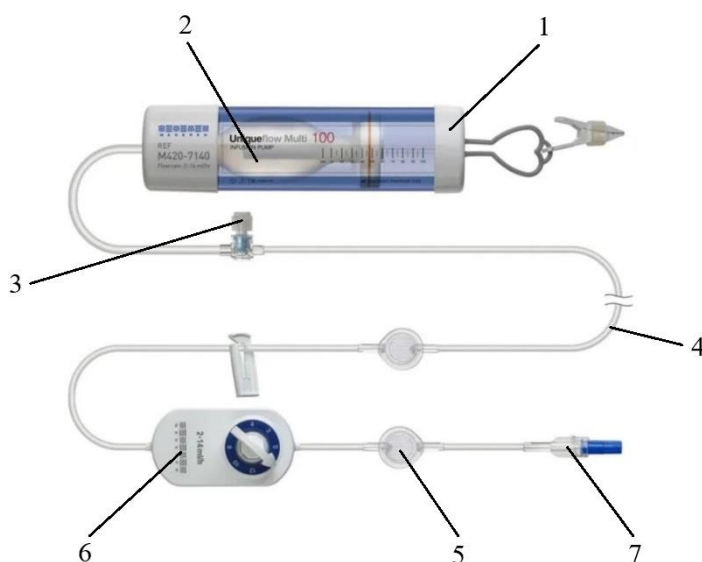
1 – кабель подключения датчика; 2 – слепая трубка; 3 – термопроводящая паста; 4 – датчик температуры

Рисунок 3.5 – Датчик температуры

Подача в реакционную емкость буферных агентов была реализована на основе медицинских помп долгосрочной инфузии (рисунок 3.6) в комбинации с нормально закрытыми электромагнитными клапанами, уставленными в разрыв магистрали. Использование традиционных решений в виде перистальтических насосов показало свою непригодность вследствие низкой точности дозирования.

Помпа долгосрочной инфузии имеет эластичную часть с постоянным комплаенсом, поэтому образует поток инфузии, независящий от степени

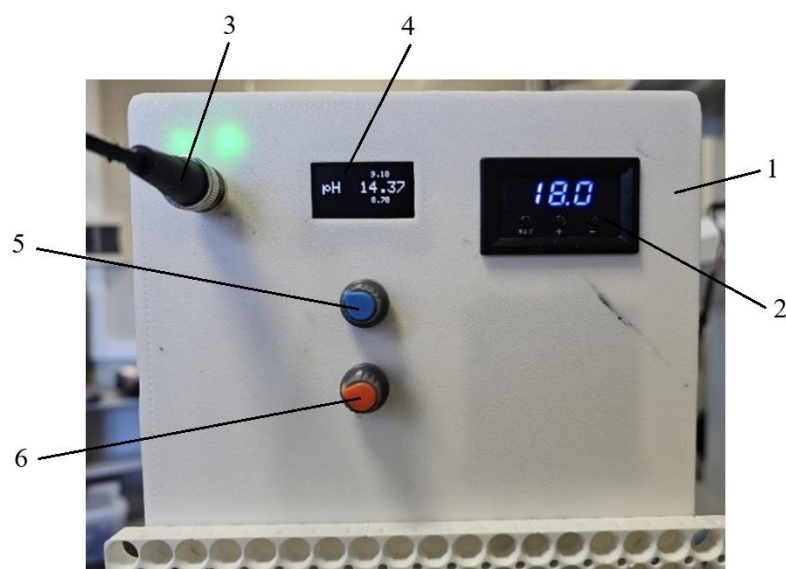
заполнения. Являясь медицинским изделием, поставляется в стерильном виде и оснащена универсальными коннекторами luer lock, что позволяет проводить дозаправку помпы буферным агентом, не прерывая ее работу, и напрямую подключать к большинству элементов системы (иглы, магистрали, шприцы, тройники).



1 – корпус помпы; 2 – эластичный резервуар; 3 – коннектор luer lock с обратным клапаном для заполнения помпы; 4 – проводящая магистраль; 5 – фильтр; 6 – регулятор потока; 7 – коннектор luer lock.

Рисунок 3.6 – Медицинская помпа долгосрочной инфузии

Каждая модульная секция установки была оснащена независимым блоком управления на базе микроконтроллера Atmel Atmega 328P, содержащим дисплей с текущим значением температуры, дисплей с текущим значением pH и его верхнего/нижнего пределов, а также два потенциометра для их установки. Все компоненты системы управления были размещены в смоделированном и распечатанном на 3D-принтере корпусе (рисунок 3.7), который был закреплен на стенде.

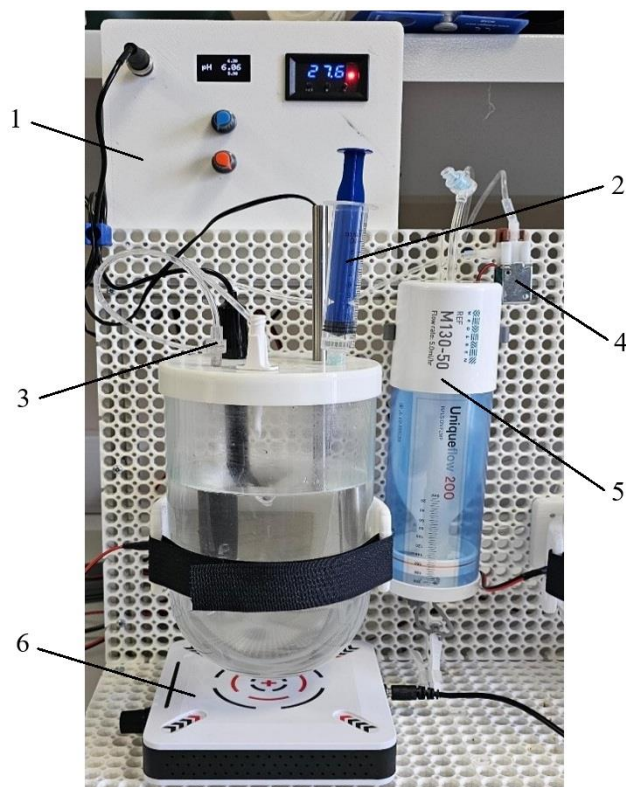


1 – корпус; 2 – термостат с отображением текущей температуры; 3 – разъем подключения датчика pH; 4 – экран с отображением текущего значения и пределов pH; 5 – ручка управления верхним пределом pH; 6 – ручка управления нижним порогом pH

Рисунок 3.7 – Система управления секцией экспериментальной установки

В результате сборки вышеописанных компонентов была получена модульная секция установки, общий вид которой представлен на рисунке 3.8.

Для обеспечения автоматической работы установки была разработана управляющая программа в среде Arduino IDE (версия 1.8.19) на языке C++ [62], предназначенная для автоматизации дозирования реагентов, контроля температуры и выполнения циклических механических перемещений по заданному расписанию.



1 – блок управления; 2 – шприц с кислотным агентом; 3 – подключение магистрали к биореактору; 4 – электромагнитный клапан подачи щелочного агента; 5 – помпа долгосрочной инфузии с щелочным агентом; 6 – привод магнитной мешалки

Рисунок 3.8 – Общий вид модульной секции установки

Первый программный модуль контролирует значения pH и температуры рабочей среды. При выходе pH за заданные пределы открывается соответствующий кислотный или щелочной клапан на установленный временной интервал. При снижении температуры ниже заданного значения включается нагреватель, который отключается после достижения целевой температуры. Фрагмент программы находится в Приложении В.

На основе разработанного модуля была собрана установка, состоящая из трех секций, имитирующих желудок, тонкий и толстый кишечник свиньи, внешний вид которой представлен на рисунке 3.9. В результате проверки работоспособности и наладки установка показала герметичность всех

соединений, надлежащую гидродинамику реакционной смеси и стабильную работу в части автоматического поддержания заданных параметров.

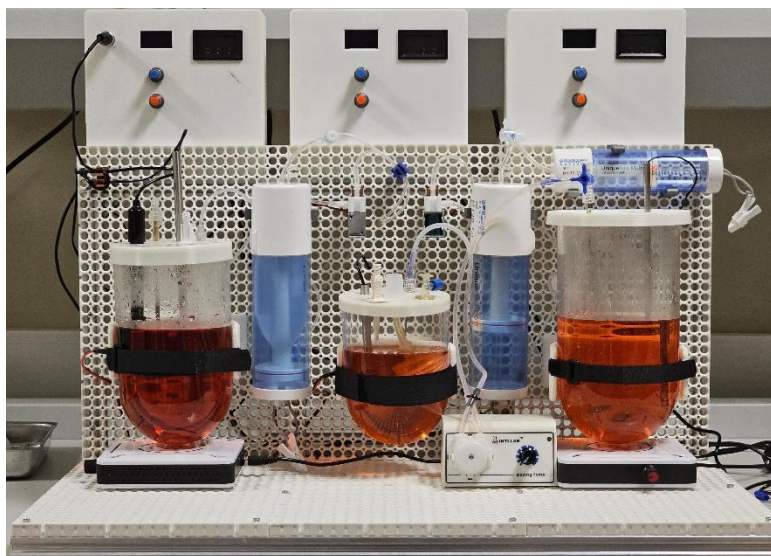
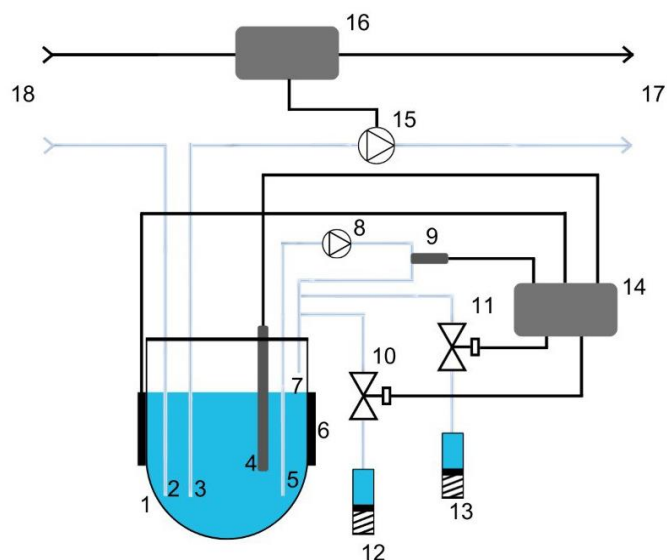
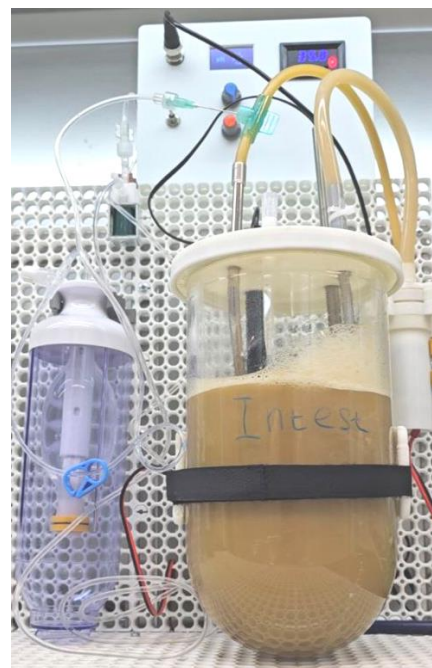


Рисунок 3.9 – Общий вид установки, состоящей из трех модулей

В процессе испытаний опытной установки в лабораторных условиях было выявлено, что силы магнитного сцепления якоря и ротора магнитной мешалки недостаточно, поэтому эта система перемешивания была заменена на циркуляционные насосы. Обновленная схема установки представлена на рисунке 3.10. Однако на 14-й и 15-й дни эксперимента произошел отказ внешних циркуляционных насосов обеих секций.



а



б

а – схема модульной секции, б – общий вид модуля; 1 – реакционная емкость; 2 – магистраль подачи содержимого из предыдущей секции; 3 – магистраль подачи в следующую секцию; 4 – датчик температуры; 5 – магистраль забора циркуляционного насоса; 6 – нагревательный элемент; 7 – магистраль возврата циркуляционного насоса; 8 – циркуляционный насос; 9 – датчик pH; 10 – электромагнитный клапан подачи кислотного агента; 11 – электромагнитный клапан подачи щелочного агента; 12 – помпа долгосрочной инфузии с кислотным агентом; 13 – помпа долгосрочной инфузии с щелочным агентом; 14 – блок системы управления, 15 – помпа межсекционного транспорта; 16 – блок системы управления межсекционным транспортом; 17 – подключение к следующей секции; 18 – подключение к предыдущей секции

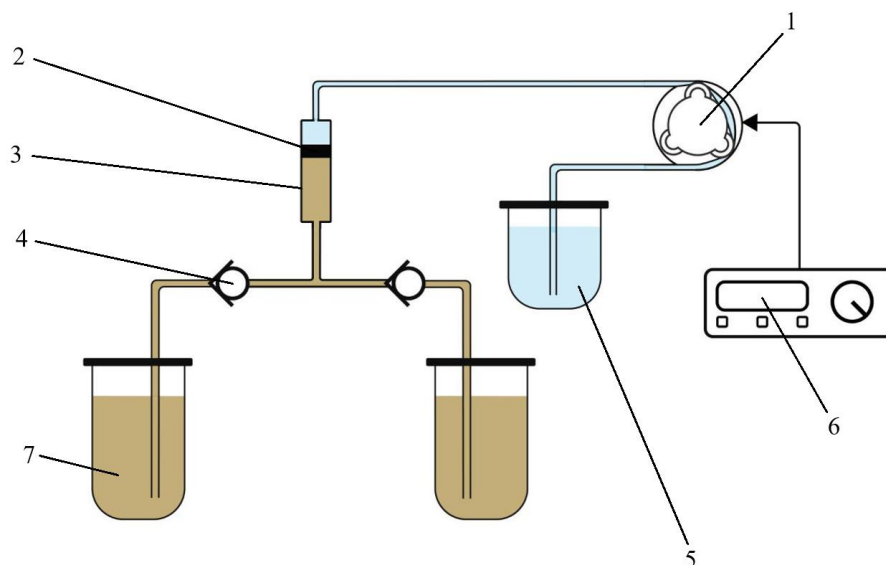
Рисунок 3.10 – Модульная секция экспериментальной установки

Важным вопросом имитации пищеварительных процессов является обеспечение надлежащего переноса химуса между отделами иЖКТ в заданном режиме. В большинстве известных систем данный процесс реализуется посредством использования перистальтических насосов. Преимуществом

такого подхода является отсутствие контакта реакционного содержимого с деталями насоса, возможность стерилизации стандартными методами, а также высокая точность объема переноса при условии применения шагового двигателя в качестве привода насоса. Однако, опыт применения такого подхода в ранее проведенных экспериментах показал недостаточную надежность при работе с вязкими и низкодисперсными средами, что проявлялось в частых отказах системы из-за засорений насосов.

Для решения указанной проблемы было разработано устройство, предназначенное для переноса реакционной среды. Оно представляет собой цилиндр с расположенным внутри поршнем без штока. С одной стороны цилиндра подключена трубка с тройником, два других плеча, которого подключены к реакционным емкостям, между которыми необходимо осуществить перенос среды. Между тройником и емкостями расположены два обратных клапана в одном направлении. Они необходимы для обеспечения движения среды только в направлении емкости-реципиента. К противоположной стороне цилиндра герметично подключена магистраль, соединяющая его сегментом перистальтического насоса, приводимого в движение шаговым двигателем, который в свою очередь, подключается к системе управления на микроконтроллере с модулем часов реального времени. Схема устройства представлена на рисунке 3.11.

Весь объем рабочего цилиндра со стороны перистальтического насоса вместе с его сегментом заполнен рабочей жидкостью (дистиллированной водой), а выход сегмента соединен с буферной емкостью. При вращении насоса по часовой стрелке происходит перемещение рабочей жидкости из цилиндра в буферную емкость. При этом поршень перемещается в цилиндре на расстояние, соответствующее заданному объему переноса. Соответственно, в таком же объеме реакционная среда поступает в цилиндр с обратной стороны поршня. После совершения целевого количества шагов, двигатель начинает вращение в обратном направлении.



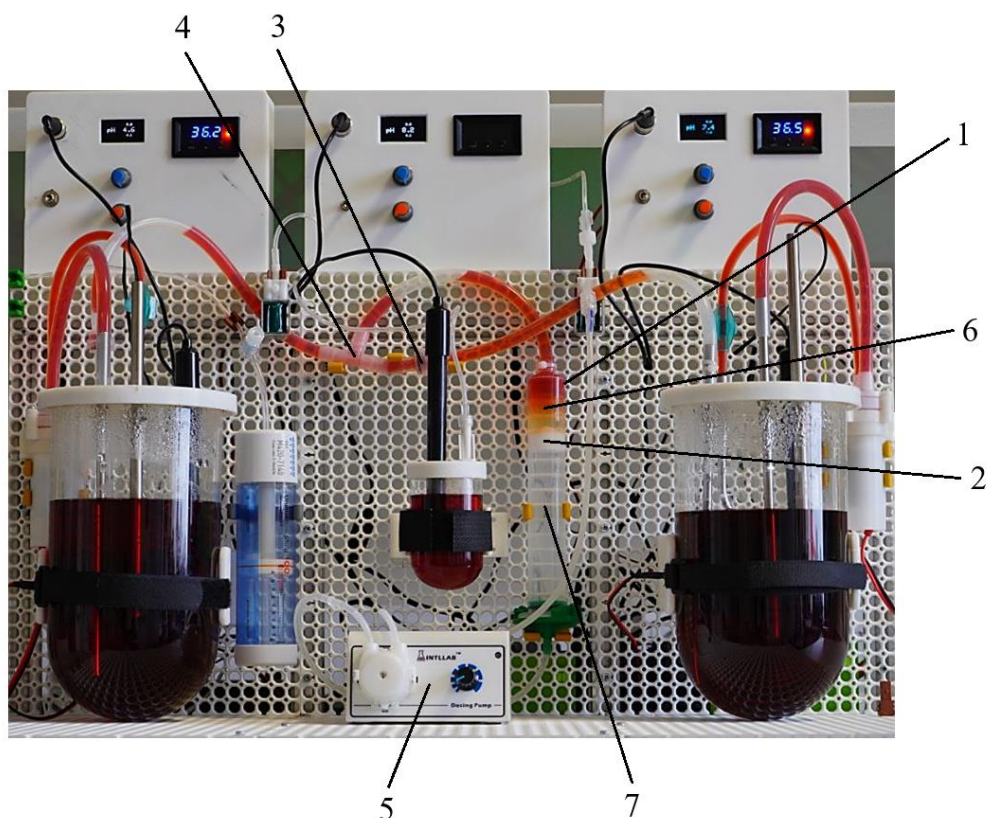
1 – насос перистальтический; 2 – поршень; 3 – рабочий цилиндр; 4 – обратный клапан; 5 – буферная емкость с рабочей жидкостью; 6 – блок системы управления; 7 – реакционная колба

Рисунок 3.11 – Устройство межсекционного транспорта реакционной среды в установке

При этом рабочая жидкость поступает из буферной емкости в цилиндр, приводя поршень в движение и выдавливая реакционную среду в направлении емкости-реципиента.

Благодаря уплотнению между поршнем и цилиндром, реакционная среда не контактирует с рабочей жидкостью. Таким образом разработанное устройство сохраняет преимущества перистальтического насоса с шаговым двигателем и не обладает его недостатками ввиду отсутствия контакта низкодисперсной реакционной среды с перистальтическим насосом.

Прототип устройства переноса был интегрирован в разрабатываемую установку (рисунок 3.12) и испытан.



1 – рабочий цилиндр; 2 – поршень; 3 – обратный клапан; 4 – тройник; 5 – перистальтический насос; 6 – реакционная среда; 7 – рабочая жидкость

Рисунок 3.12 – Установка с интегрированным устройством переноса реакционной среды

Проведенные модификации установки потребовали переработки программного обеспечения системы управления. Также было разработано программное обеспечение устройства переноса реакционной среды с возможностью управления по заданному расписанию, которой вошло во второй программный модуль. Он управляет шаговым двигателем по сигналам модуля реального времени. В заданный момент двигатель выполняет рабочий ход с установленными скоростью, направлением и числом шагов, после чего возвращается в исходное положение. Программное обеспечение реализовано для микроконтроллера и не требует операционной системы. Для его разработки и настройки используются IBM PC-совместимые персональные компьютеры [62]. Фрагмент кода расположен в Приложении Б.

3.3 Конструкция магнитно-лопастного перемешивающего устройства

Для работы с низкодисперсной средой разработано магнитно-лопастное перемешивающее устройство. Оно представляет из себя кольцевую вставку в реакционную колбу, которая устанавливается враспор на необходимой глубине и является орбитальной направляющей для лопастного ротора. В роторе, в свою очередь, радиально закреплены неодимовые магниты марки *ЕН* в достаточном количестве (в текущем прототипе устройства – 20 шт.). Снаружи реакционной ёмкости помещается вращающееся кольцо с ответными магнитами в соответствующем количестве. Это кольцо может приводиться в движение электромагнитным двигателем посредством ременной или зубчатой передачи. Двигатель при этом легко закрепляется на панели быстрого монтажа на необходимой высоте или на кронштейне реакционной ёмкости. Управление процессом перемешивания осуществляется с использованием микроконтроллерного блока, функционирующего на основе разработанного программного обеспечения [49, 63]. Программный модуль обеспечивает управление лабораторным магнитно-лопастным перемешивателем при использовании шагового, бесколлекторного либо коллекторного двигателя постоянного тока.

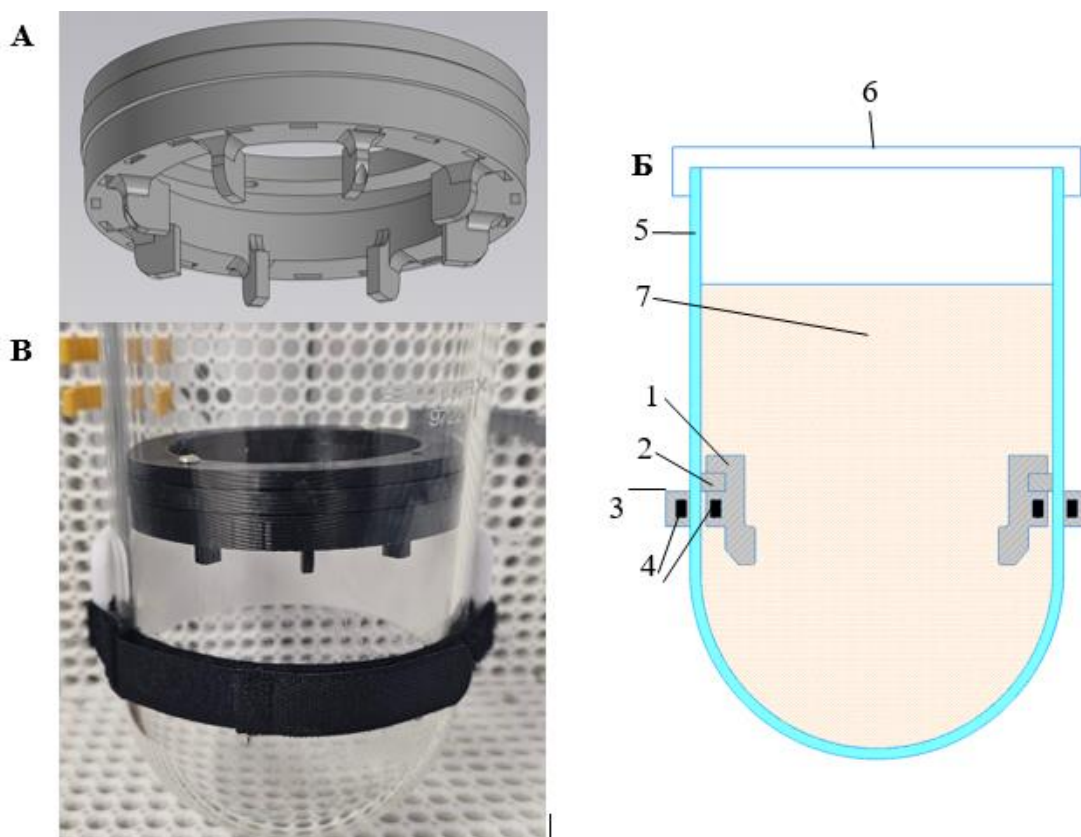
После включения системы оператор посредством LCD-дисплея задаёт тип электропривода и режим перемешивания: короткий цикл продолжительностью 3 с, длинный цикл продолжительностью 30 с или возвратно-вращательный режим. После нажатия кнопки «START» перемешиватель выполняет заданный рабочий цикл, затем переходит в режим паузы. Продолжительность паузы устанавливается потенциометром; циклическая работа продолжается до подачи команды остановки.

Программное обеспечение позволяет задавать тип привода, режим и скорость перемешивания, а также продолжительность паузы между рабочими циклами. Настройка указанных параметров обеспечивает адаптацию режима работы перемешивателя к объёму, вязкости и дисперсности моделируемой

среды, а также способствует повышению воспроизводимости лабораторных исследований. Фрагмент программного кода приведён в Приложении Г.

Такое техническое решение позволяет передавать высокий крутящий момент на лопасти ротора без применения вала, проходящего сквозь крышку реакционной колбы. Более того, благодаря применению материала Creadur производителя Atesco и магнитам марки ЕН, максимальная температура эксплуатации внутренней части перемешивателя составляет 190 °С. Это позволяет полностью собрать реакционную колбу с крышкой и трубками до начала высокотемпературной стерилизации, что значительно облегчает и ускоряет работу оператора.

3D-модель и внешний вид устройства представлены на рисунке 3.13.



А – 3D-модель устройства; Б – схема устройства (1 – ротор с лопастями; 2 – распорное кольцо-направляющая; 3 – внешнее приводное кольцо; 4 – магниты; 5 – реакционная колба; 6 – крышка; 7 – реакционная среда); В – общий вид устройства в реакционной колбе

Рисунок 3.13 – Магнитно-лопастное перемешивающее устройство

3.3 Методика проведения валидации установки при длительном культивировании микробиоты

С целью испытания в лабораторных условиях и валидации установки была проведена ее апробация в экспериментальном исследовании по культивированию естественной микробиоты свиней *in vitro* с последующим изучением ее свойств и сравнением с данными нативного материала. Установка была сконфигурирована из двух секций, имитирующих тонкий и толстый кишечник и помещена в ламинарный бокс в асептических условиях. В реакционные емкости была помещена универсальная искусственная кишечная среда (УИКС) в объеме 700 мл [68]. В систему автоматического управления были внесены следующие целевые параметры: тонкий кишечник – pH = 7,3, толстый кишечник – pH = 6,5, при температуре 39°C для обеих секций. После достижения заданной температуры, в реакционные емкости были введены образцы микробиоты свиньи из соответствующих отделов кишечника. Продолжительность эксперимента составила 21 день.

В ходе эксперимента из каждого модуля иЖКТ в течение 21 дня ежедневно в одно и то же время отбирали 17 мл среды для подготовки образцов для различных исследований. Отбор сочетали с процедурой «кормления» для предотвращения потерь объема реакционной смеси.

Для микробиологического исследования отбирали 1 мл пробы, для молекулярно-генетических исследований отбирали 4 мл для ПЦР и 10 мл для секвенирования, для хроматографии отбирали 2 мл. Образцы для ПЦР, секвенирования и хроматографии замораживали и хранили при -80 °C до дальнейшего исследования, образцы для микробиологического исследования не хранились и обрабатывались *ex tempore*.

Качественные и количественный анализ кишечной микробиоты от свиней-доноров и образцов из иЖКТ проводили методом ПЦР в режиме реального времени с использованием набора реагентов «Колонофлор-16 (биоценоз)». Экстракцию ДНК осуществляли с помощью набора ДНК-сорб-В.

С целью выявления состава микробиоты с помощью ПЦР-РВ, из полученных образцов готовили фекальную суспензию из расчета 0,1 г образца фекалий на 0,8 мл изотонического раствора NaCl. ДНК экстрагировали из 0,1 мл фекальной суспензии и кишечной среды из иЖКТ.

3.4 Методика лабораторной вискозиметрии и калибровка модели химуса методом сглаженных частиц

В главе 2 для описания химуса рассмотрены степенная модель Оствальда–де Виля и модель Гершеля–Балкли. В настоящем подразделе по результатам ротационной вискозиметрии определяется, какая из моделей лучше описывает экспериментальную зависимость касательного напряжения от скорости сдвига.

Моделирование гидродинамических процессов в реакционном объеме экспериментальной установки иЖКТ требует задания физически достоверных параметров рабочей среды. В реальных условиях химус свиньи формируется путем смешивания измельченной твердой фазы корма с жидкими секретами (желудочным или дуоденальным соком).

Приготовление модельного химуса в лабораторных условиях осуществлялось путем дозирования навески сухого корма с известной истинной плотностью $\rho_{\text{корма}}$ в заданный объем жидкой фазы с плотностью $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$. Плотность получаемой гомогенной суспензии $\rho_{\text{смеси}}$ определяется из баланса масс и объемов компонентов через массу корма $C_{\text{доб}}$, добавленную на 1 литр жидкости (3.1):

$$\rho_{\text{смеси}} = \frac{\rho_{\text{ж}} + C_{\text{доб}}}{1 + \frac{C_{\text{доб}}}{\rho_{\text{корма}}}} \quad (3.1)$$

где $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкой фазы (буферный раствор/дистиллированная вода), кг/м^3 ;

$\rho_{\text{корма}}$ – истинная плотность частиц сухого корма, кг/м³; $\rho_{\text{корма}} = 1240$ кг/м³ для Корма 1; $\rho_{\text{корма}} = 1100$ кг/м³ для Корма 2;

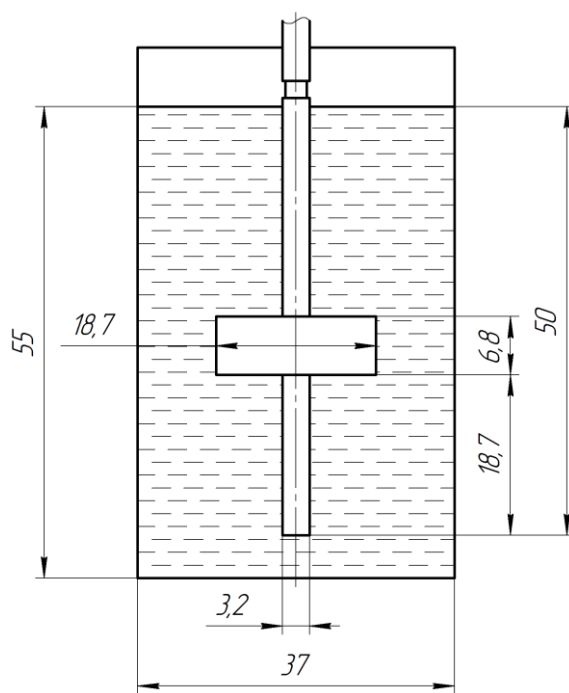
$C_{\text{доб}}$ – масса сухого корма, добавленная на 1 литр жидкости, г/л (кг/м³).

При введении $C_{\text{доб}} = 200$ г/л Корма 2 расчетная плотность модельной среды составляет $\rho_{\text{смеси}} = 1015,4$ кг/м³. Для Корма 1 при той же концентрации $C_{\text{доб}} = 200$ г/л расчетная плотность смеси составляет $\rho_{\text{смеси}} = 1033,3$ кг/м³.

Оценка динамической вязкости и сопротивления сдвигу приготовленных сред проводилась на ротационном вискозиметре НААКЕ Viscotester C (Thermo Scientific) [34]. Измерительная ячейка включала калиброванный цилиндрический стакан и погружной измерительный шпindelь L2 (рисунок 3.14).



а



б

а – общий вид прибора; б – схема установки

Рисунок 3.14 – Натурное измерение динамической вязкости

Замеры проводились при комнатной температуре $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ и фиксированной частоте вращения шпинделя $n_{\text{виск}} = 100,0$ об/мин ($\omega_{\text{виск}} = 10,47$ рад/с для двух типов полнорационных кормовых смесей при концентрации ввода $C_{\text{доб}} = 200$ г/л (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Экспериментальные показатели реологических свойств кормовых сред

Показатель / Параметр	Корм 1 (густой)	Корм 2 (высоковязкий)
Истинная плотность частиц корма $\rho_{\text{корма}}$, кг/м ³	1240	1100
Вводимая концентрация корма $C_{\text{доб}}$, г/л	200	200
Расчетная плотность смеси $\rho_{\text{смеси}}$, кг/м ³	1033,3	1015,4
Частота вращения шпинделя n , об/мин	100,0	100,0
Измеренная динамическая вязкость μ , мПа·с	15,1	38,0
Относительный крутящий момент шпинделя M , %	5,0	12,7
Абсолютный крутящий момент на валу $M_{\text{эксп}}$, мкН·м	3,37	8,56

Абсолютное значение крутящего момента $M_{\text{эксп}}$ на валу шпинделя рассчитывалось исходя из номинального крутящего момента измерительной пружины шкалы L -серии вискозиметра *HAAKE Viscotester C* ($M_{\text{max}} = 67,37$ мкН·м = $6,737 \cdot 10^{-5}$ Н·м) (3.2):

$$M_{\text{эксп}} = \frac{M}{100\%} \cdot M_{\text{max}} \quad (3.2)$$

где $M_{\text{эксп}}$ – абсолютный крутящий момент на валу, мкН·м;

M – относительный крутящий момент шпинделя, %;

M_{max} – номинальный (максимальный) крутящий момент измерительной пружины, исходя из паспорта вискозиметра *HAAKE Viscotester C*, мкН·м.

С целью обеспечения гарантированного запаса устойчивости моментной связи кольцевой магнитной муфты дальнейшая калибровка гидродинамической модели и оптимизация конструктивно-режимных параметров перемешивателя проводятся по наиболее неблагоприятному (высоковязкому) режимному случаю – Корму 2 ($\rho_{\text{смеси}} = 1015,4$ кг/м³, $\mu = 38,0$ мПа·с, $M_{\text{эксп}} = 8,56$ мкН·м).

Выбор параметров численной модели течения химуса, основанной на методе сглаженных частиц

В настоящем исследовании движение химуса было смоделировано методом сглаженных частиц в чисто гидродинамической постановке, без явного моделирования отдельных твердых частиц [1, 71].

Отказ от моделирования отдельных твердых частиц обоснован тем, что реальные твердые фракции корма после деструкции имеют размеры менее 0,1...1,0 мм. При моделировании каждой частицы корма как отдельного тела пришлось бы учитывать столкновения между десятками миллионов частиц и использовать очень малый временной шаг — около $\sim 10^{-7}$ с. Из-за этого расчёты заняли бы слишком много времени. Поэтому движение корма моделировали как движение сплошной среды методом сглаженных частиц, без отдельного описания каждой частицы. Такой подход также позволил избежать дополнительных калибровок коэффициента сопротивления для укрупнённых расчётных частиц.

Предполагается, что мелкие частицы корма движутся вместе с потоком. Равномерность перемешивания оценивают по различиям скоростей потока CV_v в разных участках: этот показатель помогает выявить неоднородное движение и возможные застойные зоны.

При диаметре рабочего органа $D = 0,1$ м, частоте вращения $n = 50...250$ об/мин ($0,833...4,167$ с⁻¹) и вязкости среды $\mu = 38,0$ мПа·с центробежный критерий Рейнольдса составляет (3.3):

$$Re_{меш} = \frac{\rho_{смеси} \cdot n \cdot D^2}{\mu}; \quad (3.3)$$
$$Re_{меш} = \frac{1015,4 \cdot (0,833...4,167) \cdot 0,01}{0,038} \approx 211,5...1057,8$$

где $Re_{меш}$ — критерий Рейнольдса, характеризует соотношение инерционных и вязкостных сил, безразмерный;

$\rho_{\text{смеси}}$ – плотность перемешиваемой смеси (корма 2 и жидкого субстрата), кг/м³;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

n – частота вращения, об/мин.

Значения $Re_{\text{меш}} \approx 10^3$ соответствуют ламинарному и развитому переходному гидродинамическим режимам течения без развития мелкомасштабной подсеточной турбулентности.

Расчёт гидродинамики перемешивания выполнен методом сглаженных частиц – бессеточным лагранжевым методом вычислительной гидродинамики, в котором среда представляется ансамблем взаимодействующих частиц. Настройка модели произведена в соответствии с ламинарно-переходным режимом течения; определяющие параметры модели вынесены в Приложение Г.

Поскольку настройка десятков физико-механических констант требует проведения многочисленных разрозненных экспериментов, в рамках настоящего исследования калибровка виртуальной гидродинамической модели химуса выполняется по одному определяющему параметру – эффективной динамической вязкости модельной среды $\mu_{\text{СПН}}$ при зафиксированной расчетной плотности $\rho_{\text{смеси}} = 1015,4$ кг/м³.

Критерий сходимости калибровки: минимизация относительной погрешности δ_M между численным крутящим моментом на валу виртуального шпинделя $M_{\text{СПН}}$ и натурным моментом вискозиметра $M_{\text{эксп}}$ (3.4):

$$\delta_M = \left| \frac{M_{\text{СПН}} - M_{\text{эксп}}}{M_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100\% \leq 3,0\% \quad (3.4)$$

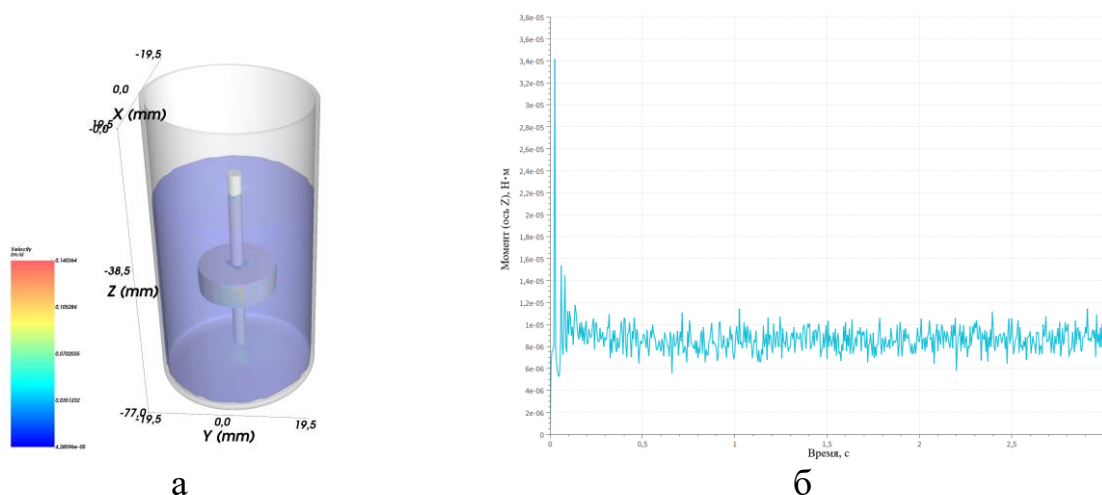
где δ_M – относительное отклонение расчётного момента от экспериментального, %;

$M_{\text{СПН}}$ – крутящий момент на валу шпинделя, полученный в численной модели (методом сглаженных частиц), мкН·м;

$M_{\text{эксн}}$ – крутящий момент, измеренный экспериментально (на вискозиметре), мкН·м.

Процедура подгонки осуществлялась итерационным варьированием значения вязкости среды смоделированной методом сглаженных частиц от базового натурального значения $\mu = 38,0$ мПа·с при $n = 100$ об/мин (рисунок 3.15).

В результате зафиксировано высокое совпадение результатов: расчетный крутящий момент виртуального шпинделя $M_{\text{СПН}} = 8,67$ мкН·м отличается от натурального экспериментального значения $M_{\text{эксн}} = 8,56$ мкН·м всего на 1,3 %, что полностью удовлетворяет принятому условию сходимости ($\delta_M \leq 3,0$ %).



а – общий вид виртуальной установки; б – график крутящего момента

Рисунок 3.15 – Калибровка вязкости реакционной среды

Откалиброванные гидродинамические параметры среды смоделированной методом сглаженных частиц приняты в качестве базовых входных данных для проведения многофакторного вычислительного эксперимента по моделированию процессов перемешивания в полномасштабном герметичном биореакторе иЖКТ.

3.5 Методика многофакторного вычислительного эксперимента и постановка задачи оптимизации

Для нахождения рациональных конструктивно-режимных параметров герметичного магнитно-лопастного перемешивающего устройства проведен многофакторный вычислительный эксперимент с использованием разработанной и откалиброванной модели среды смоделированной методом сглаженных частиц.

На основе теоретических исследований и конструктивных особенностей реакционной колбы биореактора иЖКТ ($D_{\text{внутр}} = 100,5$ мм, $z = 8$ лопастей, ширина лопасти $b = 10$ мм, рабочий объем $V = 0,8 \dots 1,0$ л) в качестве определяющих варьируемых факторов процесса выбраны:

1. Конструктивный фактор: высота перемешивающей лопасти h , мм. Данный параметр прямо определяет площадь контактного силового взаимодействия ротора со средой и величину гидродинамического момента сопротивления $M_{\text{сопр}}$.
2. Кинематический фактор: частота вращения ротора n , об/мин. Частота вращения задает интенсивность сдвиговых деформаций химуса, профиль скоростей в кольцевом канале и уровень кинетической энергии, передаваемой жидкой фазе.

Интервалы варьирования факторов ограничены геометрическими габаритами колбы и физиологически обоснованным диапазоном скоростей перемешивания при переработке концентрированных комбикормов (50...250 об/мин). Выбранный диапазон частот гарантирует высокую точность аппроксимации регрессионной модели в технологической зоне при переходе от ползущего течения ($Re_{\text{меш}} \approx 225$) к развитому ламинарно-переходному режиму ($Re_{\text{меш}} \approx 1125$).

Для упрощения математической обработки результатов и построения регрессионных моделей натуральные значения факторов X_j преобразованы в

безразмерные кодированные переменные $x_j \in [-1; +1]$ по стандартной формуле кодирования (3.5):

$$x_j = \frac{X_j - X_{j0}}{\Delta X_j} \quad (3.5)$$

где X_j – натуральное значение j -го фактора (h или n);

X_{j0} – натуральное значение фактора на нулевом (основном) уровне;

ΔX_j – интервал варьирования j -го фактора.

Варьируемые факторы представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Уровни и интервалы варьирования факторов в вычислительном эксперименте

Наименование фактора	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов			Интервал варьирования
		Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)	
Высота лопасти h	мм	10	30	50	20
Частота вращения n	об/мин	50	150	250	100

Матрица планирования многофакторного эксперимента

Для описания нелинейных процессов гидродинамики неньютоновских сред полные факторные планы типа 2^2 недостаточны, так как они не позволяют оценить квадратичные эффекты (x_1^2 , x_2^2) и определить локальный экстремум внутри области варьирования.

В связи с этим планирование вычислительного эксперимента выполнено по схеме полного факторного трехуровневого плана типа 3^2 (Центрального композиционного плана, ЦКП $N=9$) [1, 5]. Данный план содержит 9 технологических опытов, объединяющих 4 опыта ядра плана

(факторные точки типа 2^2), 4 «звездные» точки с плечом $\alpha = 1$, расположенные на осях координат, и 1 центральную точку ($x_1 = 0, x_2 = 0$).

Выбор центрального композиционного плана обусловлен необходимостью описания нелинейной зависимости отклика от двух технологических факторов при минимальном числе опытов. План типа 3^2 ($N = 9$) обеспечивает оценку квадратичных эффектов и кривизны поверхности отклика, что недостижимо для линейных планов типа 2^2 .

Матрица планирования многофакторного вычислительного эксперимента в натуральных и кодированных переменных представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица планирования центрального композиционного плана (ЦКП $N = 9$)

№ опыта	Кодированные переменные		Натуральные переменные	
	x_1	x_2	Высота лопасти h , мм	Частота вращения n , об/мин
1	-1	-1	10	50
2	-1	0	10	150
3	-1	+1	10	250
4	0	-1	30	50
5	0	0	30	150
6	0	+1	30	250
7	+1	-1	50	50
8	+1	0	50	150
9	+1	+1	50	250

Структура полного квадратичного полинома второго порядка, подлежащего идентификации по результатам моделирования методом сглаженных частиц для каждого выходного параметра Y_k , имеет вид (3.6):

$$Y_k = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (3.6)$$

где b_0 – свободный член уравнения (значение функции в центре плана);
 b_1, b_2 – линейные коэффициенты регрессии;
 b_{12} – коэффициент парного взаимодействия факторов;
 b_{11}, b_{22} – квадратичные коэффициенты регрессии.

Формирование критериев оценки и постановка задачи оптимизации

Для комплексной оценки гидродинамической эффективности перемешивающего устройства в модели построенной методом сглаженных частиц зафиксированы два выходных критерия (Y_1 и Y_2):

1. Энергетический критерий ($Y_1 = M_{\max}$): пиковое значение крутящего момента гидродинамического сопротивления среды в установившемся режиме перемешивания (без учета начального периода разгона из состояния покоя), Н·м (мН·м). Выбор пикового значения $M_{\max}$ взамен среднеинтегрального обусловлен необходимости гарантированного исключения риска срыва (рассогласования) моментной связи кольцевой магнитной муфты под действием мгновенных гидродинамических пульсаций и локальных пиков сдвиговых напряжений в высоковязкой неньютоновской среде.

2. Гидродинамический критерий однородности потока ($Y_2 = CV_v$): коэффициент вариации локальных абсолютных скоростей во всем реакционном объеме биореактора, указывающий на однородность перемешивания, %.

Коэффициент вариации CV_v рассчитывается по полю абсолютных скоростей элементов, моделируемых методом сглаженных частиц, в установившемся режиме перемешивания (3.7):

$$CV_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_{SPH}-1} \sum_{i=1}^{N_{SPH}} (v_i - \bar{v})^2}}{\frac{1}{N_{SPH}} \sum_{i=1}^{N_{SPH}} v_i} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

где v_i – абсолютная скорость i -го элемента, моделируемых методом
сглаженных частиц в объеме колбы, м/с;

$\bar{v}$ – объемно-усредненная (средняя арифметическая) скорость
элементов, моделируемых методом сглаженных частиц, в расчетном
домене колбы, м/с;

σ_v – среднее квадратичное отклонение поля скоростей, м/с;

N_{SPH} – общее количество частиц в расчетном домене
($N_{SPH} \approx 3,0 \cdot 10^6$).

Низкое значение CV_v свидетельствует о высокой степени выравнивания
гидродинамического поля скоростей и устранении застойных («мертвых») зон
у стенок и дна колбы. Оптимизация поля скоростей ($CV_v \rightarrow \min$) служит
фундаментальной гидродинамической предпосылкой для достижения
технологической однородности распределения массы сухого вещества корма в
объеме ($CV_C \leq 15\%$) [1, 6]. Порог $CV_C \leq 15\%$ принят в соответствии с
нормативными требованиями к однородности кормовых смесей [1, 6] и
соответствует практике приготовления кормов, при которой неравномерность
распределения сухого вещества не приводит к физиологически значимым
отклонениям состава в отдельных порциях.

Математическая постановка задачи оптимизации конструктивно-
режимных параметров: найти вектор рациональных параметров $x^* = (h^*, n^*)^T$
– вектор координат оптимума (точки экстремума) поверхности отклика,
обеспечивающий максимальную гидродинамическую однородность поля
скоростей среды при выполнении технологических, конструктивных и
магнитно-динамических ограничений (3.8):

$$\begin{cases} Y_2(h, n) = CV_v(h, n) \rightarrow \min \\ k_s = \frac{M_{удерж}(N_m)}{M_{max}} \geq 2,0 \\ 10 \text{ мм} \leq h \leq 50 \text{ мм} \\ 50 \text{ об/мин} \leq n \leq 250 \text{ об/мин} \end{cases} \quad (3.8)$$

Нормативный коэффициент запаса $k_s \geq 2,0$ [12, 30] гарантирует абсолютную устойчивость моментной связи кольцевой магнитной муфты при полном расчетном немагнитном зазоре $\delta = 8,0$ мм.

В рамках данной оптимизационной задачи критерий k_s служит базой для выработки рекомендаций по выбору числа пар постоянных магнитов NdFeB EH: оценка удерживающего момента $M_{\text{удерж}}(N_m)$ проводится для базовой конфигурации с $N_m = 20$ магнитами, с возможностью расширения магнитной системы до $N_m = 40$ магнитов при работе в высоковязких режимах. Выбор оптимальной конфигурации подлежит верификации по результатам численного моделирования и лабораторным испытаниям опытного образца.

3.6 Выводы по третьей главе

1. Составлена программа лабораторных исследований по разработке, оценке работоспособности, оптимизации и применению установки, иЖКТ свиньи, при испытаниях сельскохозяйственных комбикормов в лабораторных условиях.

2. Представлены техническое задание, конструкция, общие сведения о сборке лабораторного образца экспериментальной установки иЖКТ свиньи.

3. Предложена конструкция герметичного магнитно-лопастного перемешивателя.

4. Предложены методики оценки работоспособности разработанной установки и ее апробации в сравнительном исследовании по оценке качества сельскохозяйственных комбикормов в лабораторных условиях.

5. Выполнена однопараметрическая калибровка численной модели концентрированного модельного химуса свиней по данным лабораторной ротационной вискозиметрии на вискозиметре HAAKE Viscotester C.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЖКТ СВИНЕЙ

4.1 Конструкция реакционной емкости и герметичного магнитно-лопастного перемешивателя

Для экспериментальной верификации параметров и проведения биоинженерных испытаний лабораторная установка (подробно описанная в 3 главе) была доработана.

Разработанный кольцевой магнитно-лопастной перемешиватель представляет собой сборную конструкцию. Внутри колбы устанавливается тонкостенное распорное кольцо-направляющая, удерживающее подвижный ротор в радиальном направлении с минимальным монтажным зазором ($\delta_{\text{внутр}} \approx 1,0$ мм). Подвижный ротор состоит из кольца с лопастями, проставки и верхней части для обеспечения возможности монтажа, между собой элементы скрепляются винтами. Все детали изготовлены методом высокоточной 3D-печати из биосовместимого полимера Creadur [56, 57]. Ротор оснащен радиальными лопастями шириной $b = 10,0$ мм и высотой 46,6 мм, расположенными равномерно с шагом 45° (рисунки 3.12 и 4.1).

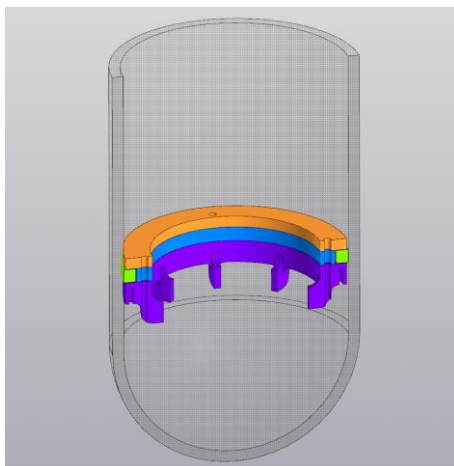


Рисунок 4.1 – Расположение кольцевого магнитно-лопастного перемешивателя в реакционной ёмкости

В пазах подвижного ротора и внешнего приводного кольца установлены постоянные редкоземельные неодимовые магниты NdFeB класса ЕН ($2 \times 6 \times 8$ мм) в количестве 20 пар [12, 30]. Суммарный немагнитный зазор (стекло 5,0 мм + монтажные зазоры и стенки обойм 3,0 мм) составляет $\delta = 8,0$ мм, обеспечивая передачу удерживающего момента с коэффициентом запаса $k_s \geq 2,0$.

Внешнее магнитное кольцо приводится во вращение бесколлекторным шаговым двигателем с микропроцессорным управлением, обеспечивающим поддержание частоты вращения в диапазоне 20-300 об/мин с погрешностью не более $\pm 0,5$ об/мин.

4.2 Результаты численного моделирования гидродинамических полей и крутящего момента методом сглаженных частиц

Численное моделирование гидродинамических процессов перемешивания модельного химуса методом сглаженных частиц позволило получить детальные пространственно-временные картины течения суспензии

в реакционном объеме боросиликатной колбы для всех 9 расчетных точек полнофакторного плана 3^2 (рисунок 4.2).

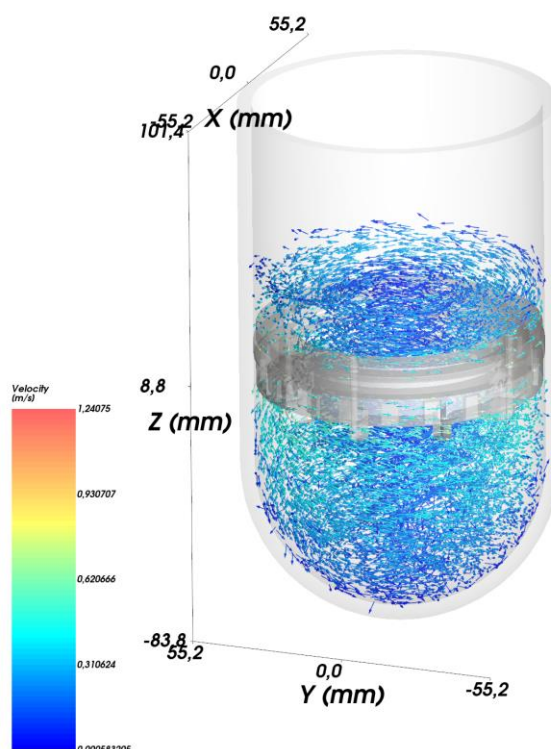


Рисунок 4.2 - Численное моделирование гидродинамических процессов перемешивания модельного химуса методом сглаженных частиц

В результате обработки массивов расчетных данных установлено, что гидродинамическая картина течения неньютоновской среды формируется под воздействием двух взаимосвязанных механизмов:

- первичного окружного вращательного движения, инициируемого вращением кольцевого лопастного ротора с $z = 8$ лопатками.
- вторичной тороидальной циркуляции в меридиональной плоскости, возникающей вследствие центробежного отбрасывания жидкости от кромок лопастей к цилиндрической стенке сосуда с последующим восходящим движением вдоль стенок и опусканием в центральной приосевой зоне [6, 8].

Характер развивающихся гидродинамических полей существенно трансформируется в зависимости от варьируемых факторов – высоты лопасти h (10-50 мм) и частоты вращения ротора n (50-250 об/мин):

1. При минимальной частоте вращения ($n = 50$ об/мин, опыты 1, 4, 7): течение жидкости носит выраженный ламинарный сдвиговый характер ($Re_{\text{меш}} \approx 225$). При высоте лопасти $h = 10$ мм (опыт 1) окружная скорость локализована исключительно в узком пристеночном зазоре в зоне движения лопаток ($v \approx 0,15 \dots 0,22$ м/с). В придонной полусферической области ($z \leq 0,2H$) и в верхних слоях ($z \geq 0,7H$) скорость частиц падает до $v \leq 0,01-0,02$ м/с, что свидетельствует о наличии обширных зон гидродинамического застоя. Увеличение высоты лопасти до $h = 30$ мм (опыт 4) и $h = 50$ мм (опыт 7) приводит к расширению зоны активного сдвига по высоте столба жидкости, способствуя плавному вовлечению придонных слоев в циркуляцию ($v_{\text{дон}} \approx 0,04-0,07$ м/с).

2. На среднем уровне частоты вращения ($n = 150$ об/мин, опыты 2, 5, 8): интенсификация сдвиговых деформаций сопровождается развитием пространственной меридиональной циркуляции ($Re_{\text{меш}} \approx 675$). Окружная скорость потока на периферии лопастей достигает $v = 0,55-0,72$ м/с. Формируются устойчивые вихревые жгуты за тыльными кромками лопаток, генерирующие вторичные радиальные потоки к центру аппарата. При высоте лопастей $h \geq 30$ мм застойные зоны в донной части колбы полностью ликвидируются.

3. При максимальной частоте вращения ($n = 250$ об/мин, опыты 3, 6, 9): режим течения переходит в область развитого инерционного перемешивания ($Re_{\text{меш}} \approx 1125$). Скорости частиц достигают $v_{\text{max}} = 1,15-1,35$ м/с. Во всем реакционном объеме формируется высокооднородное поле скоростей. Свободная поверхность сохраняет динамическую устойчивость: глубина центральной воронки не превышает $z_{\text{вор}} \leq 12-15$ мм, что исключает захват воздуха и разрушение анаэробной газовой подушки над зеркалом химуса.

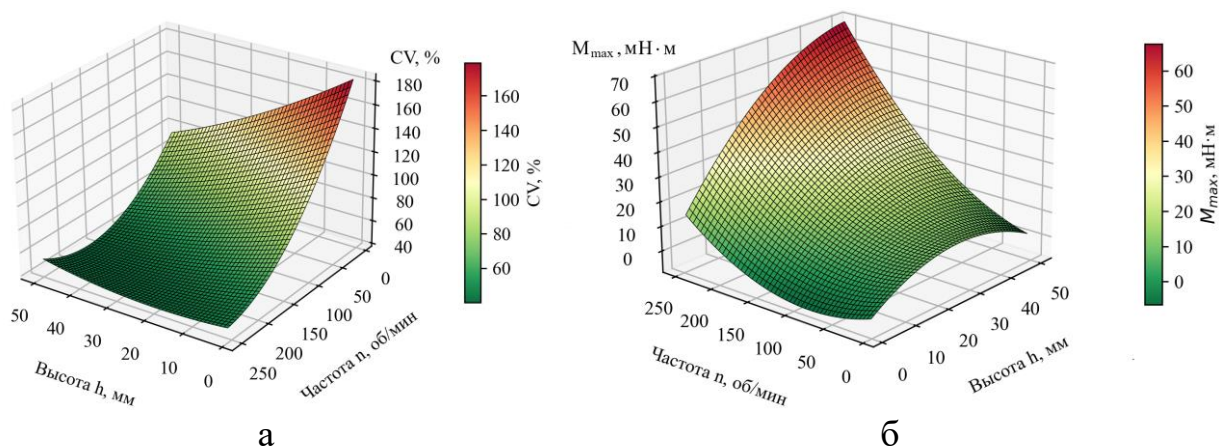
Оценка степени неоднородности гидродинамического поля

Значения коэффициента вариации CV_v по результатам 9 численных экспериментов сведены в Таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты численного моделирования гидродинамических откликов методом сплаженных частиц

№ опыта	Кодированные переменные		Натуральные факторы		Выходные параметры (отклики)	
	x_1	x_2	h , мм	n , об/мин	CV_v , %	$M_{\max}$, Н·м
1	-1	-1	10	50	128,447	0,003546
2	-1	0	10	150	55,645	0,014534
3	-1	+1	10	250	45,978	0,025118
4	0	-1	30	50	88,347	0,010413
5	0	0	30	150	48,698	0,017933
6	0	+1	30	250	47,052	0,068762
7	+1	-1	50	50	67,215	0,008407
8	+1	0	50	150	48,061	0,033756
9	+1	+1	50	250	47,833	0,063656

На рисунке 4.3 представлены трехмерные поверхности отклика исследуемых гидродинамических параметров в зависимости от высоты лопастей и частоты вращения ротора.



а – коэффициент вариации поля скоростей частиц, смоделированных методом сглаженных частиц; б – пиковый крутящий момент сил гидродинамического сопротивления

Рисунок 4.3 – Трехмерные поверхности отклика исследуемых гидродинамических параметров в зависимости от высоты лопастей и частоты вращения ротора

Анализ динамики коэффициента вариации CV_v выявляет следующие физические закономерности:

1. В низкоскоростной области ($n = 50$ об/мин) наблюдается острая зависимость однородности потока от геометрии лопаток: увеличение высоты h с 10 до 50 мм снижает неоднородность поля скоростей в 1,91 раза (со 128,45 % до 67,22 %).

2. При увеличении частоты вращения до $n = 150-250$ об/мин значения CV_v стабилизируются в узком диапазоне 45,98-48,70 %. Это объясняется насыщением объемной макроциркуляции, когда дальнейший рост окружной скорости приводит к пропорциональному увеличению как средней скорости $\bar{v}$, так и среднеквадратического отклонения σ_v в пристеночном сдвиговом слое. Вследствие этого отношение $\sigma_v / \bar{v}$ выходит на асимптотическое плато, определяемое геометрическими соотношениями кольцевого канала [6, 69].

Динамика и величины пикового крутящего момента гидродинамического сопротивления. Интегрирование распределения

нормальных сил давления и касательных сил вязкостного трения по поверхностям 8 перемешивающих лопаток позволило получить хронографические зависимости крутящего момента сопротивления $M_{\text{сопр}}(t)$ для каждого из 9 опытов.

Временной профиль момента $M_{\text{сопр}}(t)$ включает два характерных периода:

- пусковой пик ($t = 0-0,5$ с): связан с преодолением инерции покоящейся массы химуса и начального предела текучести τ_0 ;
- установившийся режим ($t > 1,5$ с): характеризуется стабилизацией момента около квазистационарного уровня с высокочастотными гидродинамическими пульсациями [12, 30].

Как следует из данных таблицы 4.1, пиковый крутящий момент M_{max} варьируется от 3,55 мН·м (опыт № 1) до 68,76 мН·м (опыт № 6).

Анализ влияния факторов на величину момента M_{max} :

1. Влияние частоты вращения n : при $h = 30$ мм увеличение частоты вращения с 50 до 150 об/мин вызвало рост пикового момента в 1,72 раза (с 10,41 до 17,93 мН·м), а подъем до 250 об/мин – рост в 3,84 раза (до 68,76 мН·м). Это связано с возрастанием роли инерционного слагаемого сопротивления ω^2 .

2. Влияние высоты лопасти h : при $n = 150$ об/мин увеличение высоты лопасти с 10 до 50 мм последовательно увеличивает момент (14,53 → 17,93 → 33,76 мН·м) за счет расширения площади контакта со сдвигаемой средой.

Для базовой конфигурации из $N_m = 20$ магнитов $NdFeB$ EH ($2 \times 6 \times 8$ мм), расположенных на $R_m = 47$ мм при суммарном зазоре $\delta = 8,0$ мм, расчетный удерживающий момент составляет $M_{\text{удерж}} \approx 0,160 \text{ Н} \cdot \text{м} = 160 \text{ мН} \cdot \text{м}$.

Сопоставление с наиболее нагруженным режимом (опыт № 6: $M_{\text{max}} = 68,762 \text{ мН} \cdot \text{м}$) дает фактический коэффициент запаса устойчивости связи $k_s \approx 2,33$.

Так как $k_s = 2,33 \geq 2,0$, базовая магнитная система из 20 магнитов гарантирует надежное вращение без срыва моментной связи во всем диапазоне

исследованных параметров. Расширение системы до 40 магнитов является конструктивно избыточным.

4.3 Опыт применения лабораторного прототипа системы имитации ЖКТ свиньи в экспериментальных исследованиях (валидация установки)

Продолжительность *in vitro* моделирования составила 21 день, всего было отобрано и исследовано 84 пробы.

В таблице 4.2 представлены результаты масс-спектрометрической идентификации микроорганизмов, выделенных из биореакторов и ЖКТ.

На рисунке 4.4 показана посуточная динамика микробиологических показателей содержимого модуля, имитирующего тонкий кишечник на протяжении 21 дня эксперимента. Данный срок был установлен нами исходя из анализа научной литературы как среднее время формирования стабильной кишечной микробиоты в постнеонатальном периоде у свиней [71]. Исходя из графика видно, что динамическое равновесие в биореакторе, соответствующее показателям в пробе от свиньи, наступает на 7 сутки культивирования и сохраняется до 21 суток, что свидетельствует о корректно подобранных условиях культивирования и составе кишечной среды.

Таблица 4.2 – Соотношение выделенных изолятов, идентифицированных методом MALDI-TOF MS

Вид микроорганизмов	абс	%	Score
<i>Escherichia coli</i>	20	49,5	4,6
<i>Enterobacter cloacae</i>	4	10,2	2,06
<i>Enterococcus faecium</i>	2	5,1	2,117
<i>Enterococcus gallinarum</i>	3	7,6	1,55
<i>Aerococcus viridans</i>	4	10,2	1,45
<i>Enterococcus hirae</i>	6	15,4	2,0
<i>Lactobacillus plantarum</i>	1	2,0	1,76
всего	39	100	

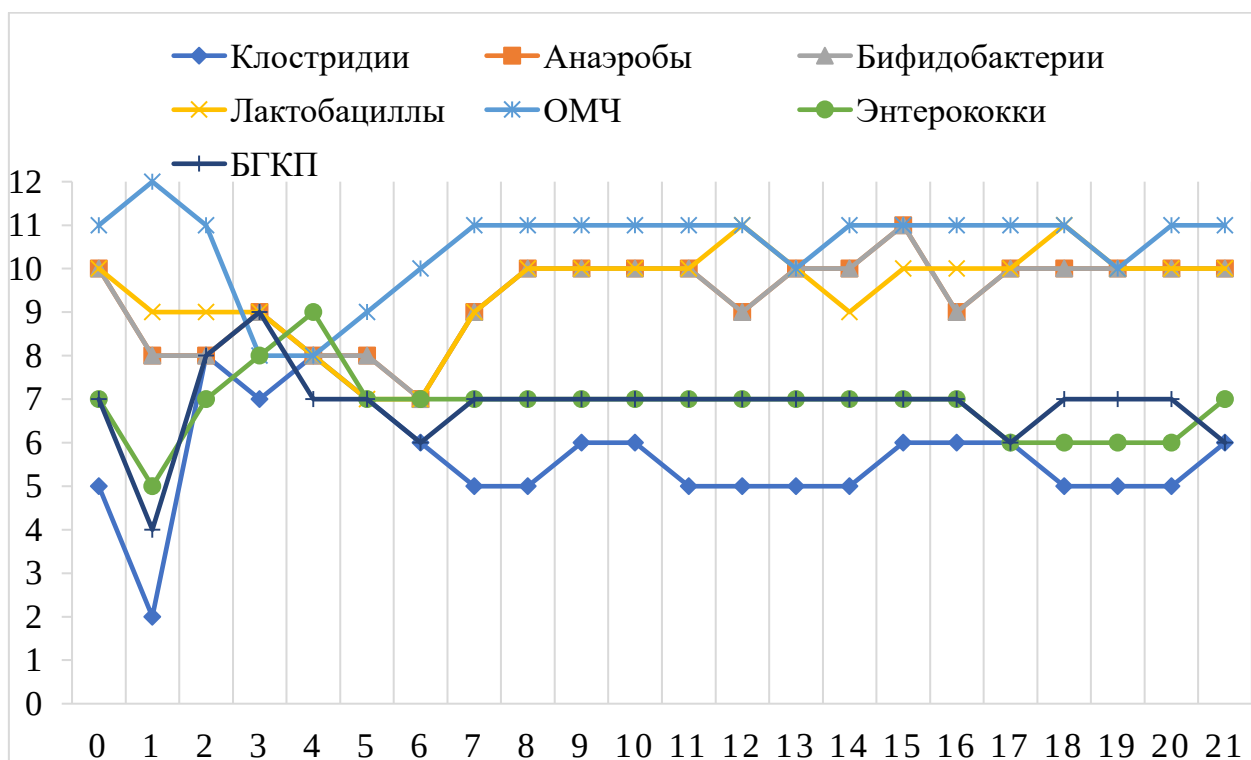


Рисунок 4.4 – Динамика микробиологических показателей модуля «тонкая кишка». По горизонтали – дни эксперимента; по вертикали – содержание КОЕ/мл

На рисунке 4.5 показана посуточная динамика микробиологических показателей содержимого модуля, имитирующего толстый кишечник на протяжении 21 дня эксперимента. Исходя из графика видно, что динамическое равновесие в биореакторе, соответствующее показателям в пробе от свиньи, наступает на 8 сутки культивирования и сохраняется до 21 суток, что свидетельствует о корректно подобранных условиях культивирования и составе кишечной среды.

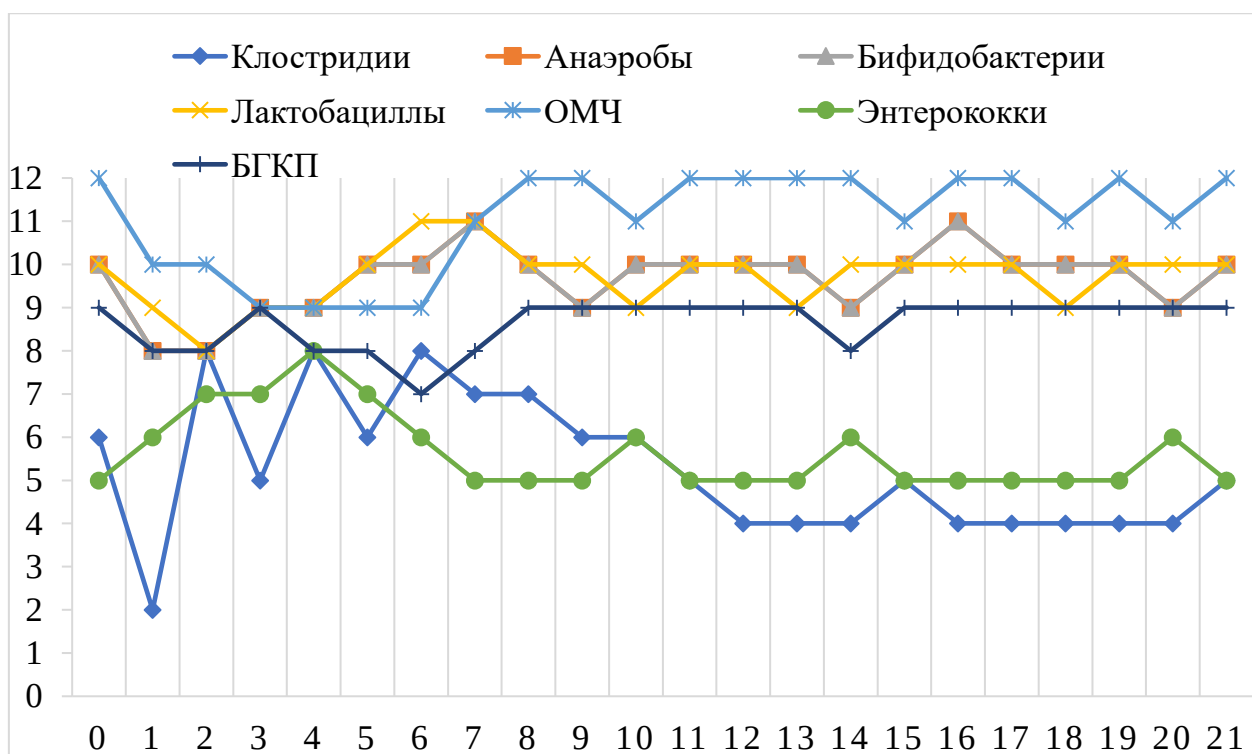


Рисунок 4.5 – Динамика микробиологических показателей модуля «толстая кишка». По горизонтали – дни эксперимента; по вертикали – содержание КОЕ/мл

В Таблице 4.3 представлены данные о количественном составе кишечной микробиоты, выявленный методом ПЦР с помощью коммерческого набора «Колонофлор-16 (биоценоз)».

Данные ПЦР соответствуют в целом данным культурального исследования и подтверждают их.

Таблица 4.3 – Количественное содержание исследуемых показателей кишечной микробиоты свиней, выявленное методом кПЦР в нативном материале и отобранном из системы иЖКТ

Показатель	Содержание, КОЕ/г			
	Свинья, тонкая кишка	Модуль «Тонкая кишка», 12 день культивирования	Свинья, толстая кишка	Модуль «Толстая кишка», 12 сутки культивирования
Общая бактериальная масса	9×10^{11}	3×10^{12}	6×10^{12}	10^{12}
<i>Lactobacillus spp</i>	2×10^{10}	7×10^9	2×10^{10}	4×10^{10}
<i>Bifidobacterium spp</i>	8×10^{10}	10^{11}	4×10^{10}	9×10^{10}
<i>Escherichia coli</i>	4×10^6	3×10^7	4×10^9	10^9
<i>Bacteroides spp</i>	3×10^7	9×10^6	9×10^{10}	9×10^9
<i>Faecalibacterium prausnitzii</i>	4×10^9	4×10^8	7×10^7	7×10^6
<i>Enterococcus spp</i>	2×10^7	2×10^7	1×10^5	1×10^5

Результаты валидации установки свидетельствуют, что разработанная автоматизированная система имитации ЖКТ свиньи обеспечивает воспроизводимое поддержание параметров среды, соответствующих условиям тонкого и толстого отделов кишечника, и тем самым может рассматриваться как технологическая платформа для *in vitro* моделирования кишечной микробиоты. Стабилизация условий культивирования в двух модулях системы приводит к формированию относительного динамического равновесия микробиологических показателей, сопоставимого с нативными образцами, на 7-8 сутки культивирования с последующим сохранением достигнутого состояния до 21 суток эксперимента. Данный результат указывает на корректность выбранных режимов работы установки и на адекватность состава искусственной кишечной среды, поскольку именно сочетание физико-химических параметров и субстратной базы определяет возможность длительного поддержания микробного сообщества без выраженного дрейфа в

сторону упрощенных консорциумов. Одновременно полученные данные свидетельствуют, что временной интервал 7-8 суток является обоснованным периодом «стабилизации» модели, после которого возможно проведение сравнительных исследований воздействия факторов (например, изменения субстрата или введения функциональных ингредиентов) с более высокой воспроизводимостью результата.

4.4 Статистическая обработка результатов моделирования методом сглаженных частиц и аналитическая оптимизация

Статистический анализ (ANOVA), оценка значимости коэффициентов и адекватности уравнений регрессии. Математическая обработка массивов данных, полученных в результате 9 численных экспериментов по схеме полного факторного плана 3^2 , проведена с целью получения аналитических зависимостей выходных параметров от определяющих факторов: высоты лопасти h (x_1) и частоты вращения ротора n (x_2). Аппроксимация откликов выполнена полными квадратичными полиномами второго порядка (уравнение (50)). Расчет эмпирических коэффициентов регрессии b_j выполнен методом наименьших квадратов (МНК) [1, 5].

1. Уравнение регрессии для гидродинамического критерия неоднородности поля скоростей ($Y_2 = CV_v$)

В кодированных переменных ($x_1, x_2 \in [-1; +1]$) (4.1):

$$Y_2(x_1, x_2) = 48,025 - 11,160x_1 - 23,868x_2 + 15,772x_1x_2 + 4,164x_1^2 + 20,011x_2^2 \quad (4.1)$$

В натуральных переменных (h – мм, n – об/мин) (4.2):

$$CV_v(h, n) = 190,433 - 2,366h - 1,075n + 0,00789hn + 0,01041h^2 + 0,00200n^2 \quad (4.2)$$

Статистическая оценка модели CV_v [1, 5]:

– коэффициент детерминации: $R^2 = 0,9685$ (96,85 % общей дисперсии отклика описывается полученным уравнением);

– скорректированный коэффициент детерминации: $R_{adj}^2 = 0,9160$ (91,60 %). Введение поправки на соотношение числа наблюдений ($N = 9$) и степени свободы модели подтверждает высокое качество аппроксимации и отсутствие эффекта искусственного переобучения;

– проверка значимости коэффициентов по t -критерию Стьюдента ($\alpha = 0,05$): наиболее существенное влияние на снижение неоднородности оказывает линейный эффект частоты вращения ($b_2 = -23,858$, $p < 0,001$) и квадратичный эффект частоты ($b_{22} = +20,011$, $p = 0,004$), определяющий выход CV_v на асимптотическое плато. Парный эффект взаимодействия $b_{12} = +15,772$ ($p = 0,012$) отражает синергетическое расширение зоны активного сдвига при одновременном увеличении высоты лопаток и скорости;

– проверка адекватности по F -критерию Фишера: расчетное значение критерия Фишера $F_{расч} = 18,45$ превышает табличное $F_{табл} (5; 3; 0,05) = 9,01$, что подтверждает статистическую адекватность регрессионной модели при 95%-ном уровне доверительной вероятности.

2. Уравнение регрессии для энергетического критерия пикового крутящего момента ($Y_1 = M_{max}$)

В кодированных переменных ($x_1, x_2 \in [-1; +1]$), значение момента выражено в мН·м (4.3):

$$Y_1(x_1, x_2) = 27,096 + 10,437x_1 + 22,528x_2 + 8,419x_1x_2 - 7,533x_1^2 + 7,909x_2^2 \quad (4.3)$$

В натуральных переменных (h – мм, n – об/мин, M_{max} – мН·м) (4.4):

$$M_{max}(h, n) = -2,563 + 1,020h - 0,138n + 0,00421hn - 0,01883h^2 + 0,000791n^2 \quad (4.4)$$

Статистическая оценка модели M_{max} :

– коэффициент детерминации: $R^2 = 0,9288$ (92,88% дисперсии объяснено моделью);

– скорректированный коэффициент детерминации: $R_{\text{adj}}^2 = 0,8101$ (81,01%);

– проверка значимости коэффициентов по t -критерию Стьюдента ($\alpha = 0,05$): определяющими факторами роста гидродинамического сопротивления являются линейный фактор частоты вращения ($b_2 = +22,528$, $p = 0,002$) и линейный фактор высоты лопасти ($b_1 = +10,437$, $p = 0,021$);

– проверка по критерию Фишера показала, что для пикового крутящего момента гидродинамического сопротивления расчетное значение $F_{\text{расч}} = 7,83$ при высоком коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9288$ подтверждает статистическую значимость уравнения регрессии на уровне $p = 0,065$ и его адекватность для практических инженерных расчетов силового отклика в исследованном факторном пространстве (рисунок 4.3).

Аналитический поиск оптимальных конструктивно-режимных параметров. Поиск оптимального вектора факторов $x^* = (h^*, n^*)^T$ выполнен аналитическим методом дифференциального исчисления [1, 5].

1. Поиск стационарной точки функции неоднородности $CV_v(x_1, x_2)$

Для определения локального экстремума функции CV_v найдем частные производные по кодированным переменным и приравняем их к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial CV_v}{\partial x_1} = -11,160 + 15,772x_2 + 8,328x_1 = 0 \\ \frac{\partial CV_v}{\partial x_2} = -23,868 + 15,772x_1 + 40,022x_2 = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Преобразуем систему к каноническому виду линейных уравнений (4.6):

$$\begin{cases} 8,328x_1 + 15,772x_2 = 11,160 \\ 15,772x_1 + 40,022x_2 = 23,868 \end{cases} \quad (4.6)$$

– координаты стационарной точки $S(x_{1s}, x_{2s})$ в кодированном виде (4.7; 4.8):

$$x_{1s} = 0,8321, \quad (4.7)$$

$$x_{2s} = 0,2682. \quad (4.8)$$

Перевод координат стационарной точки в натуральные переменные (по формуле, обратной (3.5)):

– высота лопасти: $h^* = 30 + 20 \cdot (+0,8321) = 46,64 \text{ мм} \approx 46,6 \text{ мм}$;
 – частота вращения: $n^* = 150 + 100 \cdot (+0,2682) = 176,82 \text{ об/мин} \approx 176,8 \text{ об/мин}$.

– В найденной стационарной точке $S(0,8321; 0,2682)$ в кодированных переменных, что соответствует $h^*=46,6 \text{ мм}$, $n^*=176,8 \text{ об/мин}$ достигается абсолютный минимум коэффициента вариации скоростного поля (4.9):

$$CV_{v,min} = CV_v(0,8321; 0,2682) \approx 40,18\% \approx 40,2\% \quad (4.9)$$

2. Расчет крутящего момента и проверка несрыва моментной связи

В точке оптимального режима ($h^* = 46,6 \text{ мм}$, $n^* = 176,8 \text{ об/мин}$):

– расчетный пиковый крутящий момент гидродинамического сопротивления по модельным уравнениям составляет (4.10):

$$M_{max}^* = M_{max}(0,8321; 0,2682) = 45,31 \text{ мН} \cdot \text{м} = 0,04531 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.10)$$

– сопоставление с удерживающим моментом базовой кольцевой магнитной муфты из $N_m = 20$ магнитов $NdFeB$ EH ($M_{удерж} \approx 0,160 \text{ Н} \cdot \text{м} = 160 \text{ мН} \cdot \text{м}$) [12, 29] (4.10):

$$k_s = \frac{M_{удерж}}{M_{max}^*} = \frac{160}{45,31} \approx 3,53 \geq 2,0 \quad (4.10)$$

Вывод: аналитические расчеты доказали, что в точке оптимума коэффициент запаса устойчивости моментной связи составляет $k_s = 3,53$, что превышает нормативный порог 2,0 на 76,5 %. Базовая магнитная система с $N_m = 20$ постоянными магнитами обеспечивает идеальную устойчивость движения без срыва. Достижение минимальной неоднородности скоростного поля $CV_v \approx 40,2$ % служит гидродинамической базой для снижения массовой неоднородности сухого вещества корма до уровня $CV_C \leq 15$ % при натурных испытаниях [1, 6].

4.5 Валидация однородности перемешивания

Результаты морфометрического анализа проб суспензии базового модельного Корма 2 по трем горизонтам отбора и расчетные значения коэффициента неоднородности CV_C для каждого опыта сведены в Таблицу 4.4. Некоторые из отобранных микропрепаратов кормов представлены на рисунке 4.6.

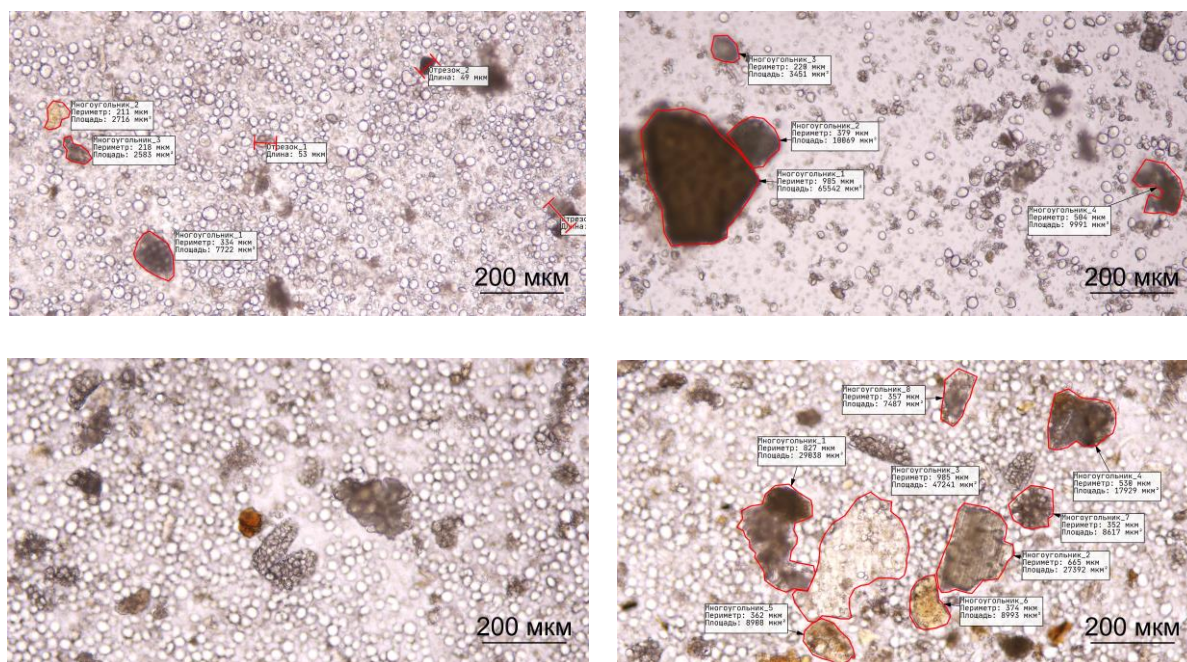


Рисунок 4.6 – Микропрепараты кормов

Таблица 4.4 – Морфометрические показатели проб химуса по высотным горизонтам реактора

№	Факторы в кодиро- ванном виде (x_1 , x_2)	Высота лопасти h , мм	Частота вращени я n , об/мин	Верхний горизонт (0,8H), шт.	Средний горизонт (0,5H), шт.	Придонный горизонт (0,2H), шт.	Среднее N , шт.	Коэффици- ент неоднор одности CV_C , %
1	-1; -1	10	50	52	478	3220	1250,0	137,34
2	-1; 0	10	150	508	1250	1992	1250,0	59,34
3	-1; +1	10	250	483	1250	2017	1250,0	61,34
4	0; -1	30	50	290	1250	2210	1250,0	76,80
5	0; 0	30	150	1065	1250	1435	1250,0	14,80
6	0; +1	30	250	840	1250	1660	1250,0	32,80
7	+1; -1	50	50	597	1250	1903	1250,0	52,26
8	+1; 0	50	150	1172	1250	1328	1250,0	6,26
9	+1; +1	50	250	747	1250	1753	1250,0	40,26

Анализ экспериментальных данных таблицы 4.4 подтверждает физические закономерности структурирования гетерогенной смеси:

– в режиме опыта 1 ($h = 10$ мм, $n = 50$ об/мин) проявляется резкая гравитационная сегрегация: придонная зона перегружена осевшей твердой фазой (3220 частиц/поле), тогда как верхний горизонт существенно обеднен (52 частицы/поле). Коэффициент пространственной неоднородности достигает $CV_C = 137,34$ %, что отражает формирование выраженных застойных зон при недостаточном гидродинамическом напоре коротких лопастей на малых оборотах.

– с увеличением высоты перемешивающих лопаток до 30-50 мм и частоты вращения до 150-250 об/мин градиент концентраций сглаживается,

формируя устойчивую меридиональную циркуляцию с падением CV_C ниже порога 15 % (в опытах 5 и 8 CV_C составляет 14,80 % и 6,26 % соответственно).

Математическая обработка экспериментального массива методом множественного регрессионного анализа позволила получить аналитические зависимости критерия неоднородности CV_C :

1. В кодированных переменных ($x_1, x_2 \in [-1; +1]$) (4.11):

$$CV_C(x_1, x_2) = 14,800 - 26,540x_1 - 22,000x_2 + 16,000x_1x_2 + 18,000x_1^2 + 40,000x_2^2. \quad (4.11)$$

2. В натуральных переменных (h – мм, n – об/мин) (4.12):

$$CV_C(h, n) = 254,110 - 5,227h - 1,660n + 0,0080hn + 0,0450h^2 + 0,0040n^2. \quad (4.12)$$

Статистическая оценка модели CV_C :

– коэффициент детерминации: $R^2 = 0,9864$ (98,64 % дисперсии отклика описывается уравнением);

– скорректированный коэффициент детерминации: $R_{adj}^2 = 0,9637$;

– критерий Фишера: $F_{расч} = 43,5 > F_{табл} (5; 3; 0,05) = 9,01$, уравнение статистически адекватно при уровне значимости $P = 0,95$ (рисунок 4.7).

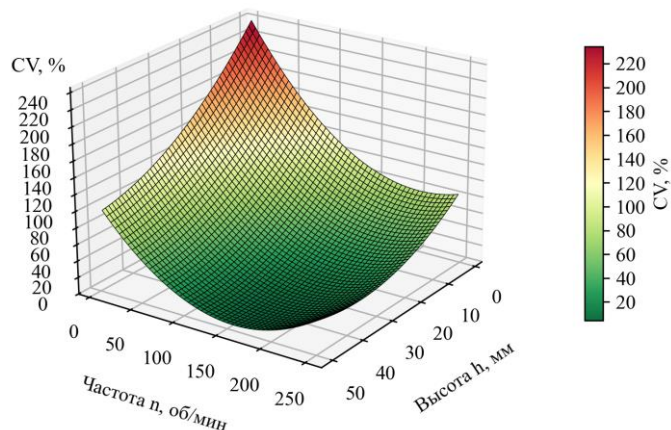


Рисунок 4.7 – Трехмерная поверхность отклика коэффициента неоднородности в зависимости от высоты лопастей и частоты вращения ротора

Аналогично вычислениям (4.7-4.8) дифференцированием полученной функции отклика $CV_C(x_1, x_2)$ определены координаты стационарной точки функции неоднородности:

- высота перемешивающей лопасти $h^*_{\text{эксп}} = 43,5$ мм;
- частота вращения ротора: $n^*_{\text{эксп}} = 164,0$ об/мин.

В найденной стационарной точке достигается минимальное значение коэффициента неоднородности смеси: $CV_{C,\min} = 4,30$ %.

Сопоставление полученных экспериментальных результатов с установленными критериями подтверждает эффективность разработанного технического решения:

1. Выполнение зоотехнического норматива качества смешивания: минимальное значение коэффициента неоднородности смеси составляет $CV_{C,\min} = 4,30$ %, что существенно ниже технологического допуска $CV_C \leq 15,0$ % (запас по равномерности распределения взвешенных частиц превышает 3,4 раза). Это свидетельствует об отсутствии сегрегации твердой фазы.

2. Оценка сходимости с результатами численного моделирования: сопоставление натуральных параметров с расчетными значениями модели ($h^* = 46,64$ мм, $n^* = 176,82$ об/мин) показало следующие относительные отклонения:

– по высоте перемешивающих лопаток (4.13):

$$\delta_h = \frac{|43,50-46,64|}{46,6} \cdot 100\% = 6,73 \% \quad (4.13)$$

– по частоте вращения ротора (4.14):

$$\delta_n = \frac{|164,00-176,82|}{176,82} \cdot 100\% = 7,25 \% \quad (4.14)$$

Фактическое расхождение расчетных и экспериментальных параметров установилось в диапазоне 6–8 %. Наблюдаемое умеренное отклонение является физически обоснованным и объясняется масштабным фактором, микрошероховатостью поверхностей 3D-печатного фотополимерного ротора и наличием волокнистых включений в реальном химусе, создающих дополнительное локальное гидродинамическое сопротивление в модели, где среда рассматривается как непрерывная жидкость.

Таким образом, достигнутый уровень сходимости надежно подтверждает адекватность разработанной гидродинамической модели и обоснованность конструктивно-режимных параметров перемешивающего органа ($h \approx 43,5-46,6$ мм, $n \approx 164-177$ об/мин).

4.6 Оценка перевариваемости и усваиваемости комбикормов с помощью экспериментального образца системы иЖКТ

После завершения этапов микробиологической валидации и гидродинамической верификации однородности перемешивания на разработанной установке иЖКТ проведены комплексные испытания по оценке

перевариваемости сельскохозяйственных комбикормов и усваиваемости их питательных веществ. Лабораторные испытания проводились в лаборатории «Биохимический и спектральный анализ пищевых продуктов» факультета «Агропромышленный».

В качестве объектов исследования выбраны два типа стандартных полнорационных комбикормов для свиней, различающихся по питательности, компонентному составу и реологическому поведению в водной фазе:

1. Корм 1 (комбикорм гранулированный «СК-5», ООО «Комбикормовая провинция»): полнорационный комбикорм для молодняка свиней.

2. Корм 2 (комбикорм гранулированный «Биокорм супер», ООО «Сибagro-про»): полнорационный комбикорм для стартового откорма свиней.

Испытания проводились в двухсекционной конфигурации автоматизированной системы иЖКТ (желудок → тонкий кишечник с диализным модулем).

Исследуемый объект предварительно измельчали в лабораторной мельнице и суспензировали в очищенной воде в концентрации 100 г/л с использованием эмульгатора ТВИН-80. Далее 500 мл полученной смеси вносили в реакционную ёмкость системы иЖКТ.

Процесс моделирования включал три последовательные физиологические стадии:

1. Желудочная фаза ($t = 2$ ч): объем 500 мл, температура $T = 39,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$, снижение кислотности до $\text{pH} = 3,0$ дозированием 0,1 М HCl с помощью инфузионной помпы, внесение свиного пепсина (2000 ед/мл). Перемешивание осуществлялось в реверсивном режиме с обоснованными рациональными параметрами ($n = 176,8$ об/мин, $h = 46,6$ мм).

2. Тонкокишечная фаза ($t = 2$ ч): автоматический межсекционный перенос гидролизата поршневым транспортером в тонкокишечный модуль, нейтрализация до $\text{pH} = 6,5$ дозированием 0,1 М NaOH, добавление 500 мл ИКС, с включением панкреатина и сухой очищенной желчи свиней.

3. Фаза кишечинальной абсорбции ($t = 4$ ч): включение контура подачи реакционной смеси в диализный модуль, подача через диализатор диализного модуля диализирующего раствора со скоростью 15 мл/мин для непрерывного удаления низкомолекулярных нутриентов, ультрафильтрация 400 мл жидкости из реакционной смеси за 4 ч.

По завершении цикла разделяли и анализировали четыре технологические фракции:

1. Непереваренный остаток – нерастворимый осадок, отделенный фильтрованием реакционной среды через лабораторное сито (30 меш, 0,6 мм) и высушенный до постоянной массы.

2. Фракция после ферментирования – проба реакционной среды, отобранная в тонкокишечном модуле перед началом фазы кишечинальной абсорбции;

3. Фракция после абсорбции – проба реакционной среды, отобранная в тонкокишечном модуле после завершения фазы кишечинальной абсорбции;

4. Диализный раствор – проба диализата, содержащая низкомолекулярные нутриенты, прошедшие через мембранный барьер диализатора.

Анализ исходного сырья и полученных фракций выполнен по стандартизированным методикам:

– определение влаги – по ГОСТ Р 54951-2012 (ИСО 6496:1999) воздушно-тепловым методом при $103 \pm 2^\circ\text{C}$;

– определение сырого протеина – по ГОСТ 13496.4-2019 методом Кьельдаля (коэффициент пересчета $K_p = 6,25$) на автоматизированном дигесторе VELP DK8 со скруббером KS 1000 и дистилляторе с водяным паром VELP UDK 139 с последующим титрованием 0,1 н. HCl;

– определение сырого жира – по ГОСТ 13496.15-2016 методом экстракции в аппарате Сокслета петролейным эфиром;

– определение растворимых и легкогидролизуемых углеводов (сахаров) – по ГОСТ 261776-2019 перманганатометрическим методом Бертрана;

– определение аминокислотного состава – методом капиллярного электрофореза на системе «Капель-105М» по методике М04-38-2009 после кислотного гидролиза 6 н. *HCl* при 110°C в течение 24 часов и модификации фенилизотиоцианатом с УФ-детектированием при $\lambda = 254$ нм.

Результаты лабораторного анализа исходных образцов исследуемых комбикормов сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные физико-химические показатели исследуемых кормов

Показатель / Параметр	Корм 1	Корм 2
Массовая доля влаги, %	12,1 ± 0,4	9,5 ± 0,3
Сухое вещество (СВ), %	87,9	90,5
Содержание сырого протеина в корме, %	17,00 ± 0,81	19,94 ± 0,88
Содержание сырого протеина в СВ, %	19,31 ± 0,88	22,00 ± 0,94
Содержание сырого жира в СВ, %	2,90 ± 0,52	3,34 ± 0,54
Содержание сахаров в СВ, %	7,80 ± 1,10	9,48 ± 1,20

После помещения исследуемых кормов в систему иЖКТ они активно подвергались процессам ферментирования, в результате чего происходил гидролиз макронутриентов с переходом низкомолекулярных продуктов в реакционную среду и уменьшением остаточной непереваренной массы корма, что отражается коэффициентом перевариваемости (КП). Показатели перевариваемости исследуемых кормов представлены в таблице 4.6.

Полученные результаты свидетельствуют, что исследуемые объекты значительно отличаются по показателям перевариваемости. Масса непереваренного остатка корма 1 составила 38,0 г, а корма 2 – и 18,4 г, что значительно уступает их исходной массе (100,0 г). В результате общий КП корма 1 составил 62,0%, что в 1,3 раза меньше, чем у корма 2 (81,6%).

Состав непереваренных остатков обоих исследуемых кормов также отличался. Показатели содержания высокомолекулярных нутриентов с учетом массы непереваренного остатка позволили рассчитать их КП, которые по корму 1 составили: 63,0% для белков, 64,7% для жиров и 32,5% для сахаров – растворимых и легкогидролизуемых углеводов. По корму 2 КП были значительно выше: 85,1% для белков, 89,2% для жиров и 83,4% для сахаров, что превышает общий показатель перевариваемости и говорит о более сбалансированном и питательном составе.

Таблица 4.6 – Показатели перевариваемости исследуемых кормов

Показатель / Параметр		Корм 1	Корм 2
Исходная масса корма, г		100,0	100,0
Масса непереваренного остатка, г		38,0	18,4
Общий КП, %		62,0	81,6
Содержание сырого протеина в непереваренном остатке	%	16,56 ± 0,81	16,19 ± 0,81
	г	6,29±0,31	2,98±0,15
КП белков, %		63,0	85,1
Содержание сырого жира в непереваренном остатке	%	2,38 ± 0,49	1,92 ± 0,47
	г	0,90±0,19	0,35±0,09
КП жиров, %		64,7	89,2
Содержание сахаров в непереваренном остатке	%	12,17 ± 1,40	7,71 ± 1,06
	г	4,63 ± 0,53	1,42 ± 0,20
КП сахаров, %		32,5	83,4

Следует отметить, что по качеству нутриентов корм 1 очевидно уступает корму 2, особенно в части растворимых сахаров, КП которых был ниже в 2,6 раза. Их содержание в непереваренном остатке корма 1 увеличилось до 12,17%, что объясняется относительным концентрированием вследствие замедленного гидролиза трудноперевариваемых углеводов.

Кроме того, в ходе преобразования исследуемых кормов в секциях установки иЖКТ были зафиксированы глубокие изменения биохимического состава реакционной смеси и диализата. Сводные данные по содержанию макронутриентов в отобранных из иЖКТ пробах фракций пищеварения кормов 1 и 2 представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Динамика содержания макронутриентов в пробах исследуемых кормов, отобранных из системы иЖКТ

Наименование технологической фракции / пробы	Содержание, %			
	сырой жир	сахара	азот в СВ	сырой протеин в СВ
Корм 1				
После ферментирования	3,35 ± 0,54	2,52 ± 0,64	5,33 ± 0,20	33,31 ± 1,25
После абсорбции	< 0,5 (0,19)*	0,24 ± 0,46	4,19 ± 0,17	26,19 ± 1,06
Диализный раствор	< 0,5 (0,08)*	0,36 ± 0,47	5,50 ± 0,21	34,38 ± 1,31
Корм 2				
После ферментирования	3,21 ± 0,53	1,79 ± 0,58	5,20 ± 0,20	32,50 ± 1,25
После абсорбции	< 0,5 (0,16)*	0,30 ± 0,46	4,60 ± 0,18	28,75 ± 1,13
Диализный раствор	< 0,5 (0,06)*	0,57 ± 0,49	5,19 ± 0,20	32,44 ± 1,25
*Значения в скобках соответствуют инструментальным откликам ниже предела обнаружения				

Анализ данных таблицы 4.7 характеризует технологическую эффективность ферментативного гидролитического расщепления и мембранного массопереноса нутриентов в секциях системы иЖКТ:

1. Гидролиз и мембранный перенос сахаров: в результате ферментации растворимых и легкогидролизуемых углеводов их содержание в непереваренном остатке снижается, а в реакционной среде повышается, достигая уровня 2,52% для корма 1 и 1,79% для корма 2 после завершения фазы

ферментации. После прохождения через диализный модуль содержание сахаров в реакционной среде корма 1 падает в 10,5 раз и корма 2 – в 6,0 раз, достигая показателей 0,24% и 0,30% соответственно. Полнота эвакуации сахаров из реакционной массы в диализный контур составляет 96,9 % для корма 1 и 96,8 % для корма 2. В диализном растворе было зафиксировано накопление низкомолекулярных сахаров на уровне 0,36% и 0,57%, что подтверждает их свободный массоперенос через мембрану диализатора FX-5.

2. Трансформация липидного комплекса: сырой жир, содержащийся в исследуемых кормах, под действием желчи и панкреатической липазы претерпевает умеренное гидролитическое расщепление пропорционально общей перевариваемости кормов. В результате содержание жира в реакционной среде достигает значений 3,35% и 3,21% для корма 1 и 2 соответственно. После завершения фазы абсорбции данные показатели снизились более, чем в 6,7 и 6,4 раза соответственно, за предел чувствительности метода ($< 0,5$ %, следовые отклики 0,16...0,19 %). В то же время, содержание жиров в диализном растворе не определялось ($< 0,5$ %, следовые отклики 0,06...0,08 %), что объясняется динамическим состоянием диализирующего раствора в контуре диализатора, которое не позволяет создать концентрации достаточные для чувствительности выбранного метода.

3. Протеолиз и диффузия азотистых соединений: в результате ферментативного расщепления белков концентрация водорастворимого сырого протеина в сухом остатке жидкой фазы содержимого реактора возрастает до 33,31% (корм 1) и 32,50% (корм 2). После фазы абсорбции данные показатели снизились до 26,19% и 28,75% соответственно. В сухом остатке диализата, при этом, было зафиксировано высокое содержание азота (5,50% для корма 1 и 5,19% для корма 2), что соответствует концентрации протеина 34,38% и 32,44%. Это подтверждает свободную диффузию низкомолекулярных пептидов и свободных аминокислот через мембранный модуль в поток диализирующего раствора.

Результаты количественного определения 13 аминокислот в отобранных пробах фракций пищеварения исследуемых кормов (система капиллярного электрофореза «Капель-105М») представлены в таблице 4.8.

Данные таблицы 4.8 подтверждают высокую физиологическую активность смоделированного процесса пищеварения:

1. Ферментативное высвобождение: под действием протеолитических ферментов суммарное содержание свободных и связанных аминокислот в исследуемых кормах с учетом изменения массы непереваренного остатка (таблица 4.6) снижалось и их КП составил 49,7% (корм 1) и 79,2% (корм 2). В результате в жидкой фазе реакционной среды происходил рост содержания суммы аминокислот до 2,87 % и 2,30 % для корма 1 и 2 соответственно.

2. Селективный мембранный транспорт: в процессе абсорбции суммарная концентрация аминокислот в реакционной среде снижается в 2,6...4,6 раза (до 0,62 % для корма 1 и 0,88 % для корма 2). В поток диализата избирательно диффундируют низкомолекулярные аминокислоты: лизин (до 0,10% для корма 1 и 0,04% для корма 2), гистидин (0,06-0,08 %), тирозин (0,03-0,05 %), лейцин/изолейцин (0,03-0,04 %), аланин и глицин (по 0,03-0,04 %).

Таблица 4.8 – Содержание аминокислот в пробах фракций *in vitro* пищеварения исследуемых кормов («Капель-105М»), %

Аминокислота	Корм 1					Корм 2				
	Исходный корм	Непереваренный остаток	После ферментирования	После абсорбции	Диализный раствор	Исходный корм	Непереваренный остаток	После ферментирования	После абсорбции	Диализный раствор
Аргинин	0,53±0,21	0,14±0,05	0,07±0,03	0,02±0,01	0	1,53±0,61	0,71±0,28	0,02±0,01	0	0
Лизин	0,83±0,28	1,15±0,39	0,26±0,09	0,05±0,02	0,10±0,03	2,34±0,80	2,12±0,72	0,39±0,13	0,09±0,03	0,04±0,01
Тирозин	0,31±0,09	0,62±0,19	0,38±0,11	0	0,05±0,02	0,54±0,16	0,50±0,15	0,08±0,02	0	0,03±0,01
Фенил-аланин	0,46±0,14	0,15±0,05	0,11±0,03	0,07±0,02	0	0,83±0,25	0,18±0,06	0,14±0,04	0,06±0,02	0
Гистидин	0,06±0,03	0,78±0,39	0,12±0,06	0,08±0,04	0,08±0,04	0,01±0,00	1,24±0,62	0,06±0,03	0	0,06±0,03
Лейцин / изолейцин	1,05±0,27	1,31±0,34	0,37±0,10	0,02±0,01	0,04±0,01	2,06±0,54	1,91±0,50	0,39±0,10	0,13±0,03	0,03±0,01
Метионин	0,15±0,05	0,16±0,05	0,09±0,03	0,09±0,03	0	0,33±0,11	0,43±0,14	0,03±0,01	0,02±0,01	0
Валин	0,63±0,25	0,58±0,23	0,27±0,11	0	0	0,92±0,37	1,25±0,50	0,18±0,07	0,08±0,03	0
Пролин	0,39±0,10	0,36±0,09	0,13±0,03	0,03±0,01	0	0,58±0,15	0,52±0,13	0,09±0,02	0,05±0,01	0
Треонин	0,55±0,22	0,81±0,32	0,28±0,11	0,06±0,02	0	0,35±0,14	1,62±0,65	0,24±0,10	0,12±0,05	0
Серин	1,06±0,28	1,12±0,29	0,39±0,10	0,09±0,02	0	2,11±0,55	1,57±0,41	0,37±0,10	0,19±0,05	0
Аланин	0,70±0,18	0,83±0,22	0,20±0,05	0,06±0,01	0,04±0,01	0,97±0,25	1,01±0,26	0,19±0,05	0,07±0,02	0,04±0,01
Глицин	0,93±0,32	0,88±0,30	0,20±0,07	0,05±0,02	0,04±0,01	0,93±0,32	0,78±0,27	0,12±0,04	0,07±0,02	0,03±0,01
Сумма	7,66	8,89	2,87	0,62	0,35	13,50	13,84	2,30	0,88	0,23

Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанной автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиней. Высокая степень гидролиза низкомолекулярных углеводов (96,8–96,9%), снижение доли протеинов и жиров в непереваренном остатке корма, а также трансмембранный переход свободных аминокислот и сахаров в диализат свидетельствуют о стабильном функционировании реакторных модулей, герметичного перемешивателя и мембранного узла установки. Это обеспечивает реализацию основных процессов пищеварения — ферментирование, разделение и абсорбцию питательных веществ — в условиях, моделирующих желудочно-кишечный тракт свиней.

В таблице 4.9 представлены результаты сравнительной оценки двух кормов по коэффициентам перевариваемости и всасываемости основных питательных веществ. Показатели перевариваемости отражают долю питательных веществ, подвергшихся воздействию процессов пищеварения в моделируемом желудочно-кишечном тракте, а коэффициенты всасываемости характеризуют доступность продуктов гидролиза для всасывания.

Таблица 4.9 Сравнительная оценка двух кормов по коэффициентам перевариваемости и всасываемости основных питательных веществ

Исследуемый объект	Коэффициент перевариваемости, %					Коэффициент всасываемости, %			
	Общий	Белки	Жиры	Сахара	Аминокислоты	Белки	Жиры	Сахара	Аминокислоты
Корм 1	62,0	63,0	64,7	32,5	49,8	21,4	85,1	90,5	78,4
Корм 2	81,6	85,1	89,2	83,4	79,1	11,5	84,4	83,2	61,7

Сравнение кормов выявило существенные различия как по общей перевариваемости, так и по усвоению отдельных групп питательных веществ. Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанная система позволяет дифференцировать кормовые рационы по показателям

перевариваемости и всасываемости питательных веществ и может быть использована для сравнительной оценки их питательной ценности.

Таким образом, разработанная автоматизированная система иЖКТ свиней выступает надёжной инженерной альтернативой дорогостоящим экспериментам на животных, позволяющей проводить достоверные исследования по разработке и оценке качества сельскохозяйственных кормов.

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Проведена модернизация базовой конструкции герметичного реактора иЖКТ на базе боросиликатной колбы со сферическим дном посредством установки бесконтактного кольцевого магнитно-лопастного перемешивателя, приводимого во вращение внешней кольцевой магнитной муфтой.

2. Проведено многофакторное моделирование методом сглаженных частиц течения химуса в объеме боросиликатной колбы ($V = 0,8$ л) по схеме полного факторного плана 3^2 ($N = 9$). Установлено, что структура потока формируется под действием окружного вращения 8-лопастного ротора и меридиональной тороидальной циркуляции. Увеличение частоты вращения с 50 до 150...250 об/мин полностью ликвидирует застойные зоны в донной части колбы, а глубина центральной воронки не превышает 12–15 мм, что гарантирует сохранение анаэробной газовой подушки.

3. Получены адекватные регрессионные модели второго порядка для коэффициента вариации скорости CV_v ($R^2 = 0,9685$, $R_{adj}^2 = 0,9160$, $F_{расч} = 18,45 > F_{табл} = 9,28$) и пикового гидродинамического крутящего момента M_{max} ($R^2 = 0,9288$, $R_{adj}^2 = 0,8101$, $F_{расч} = 7,83$). Математически обоснован эффект стабилизации неоднородности течения на асимптотическом плато при частотах вращения $n \geq 150$ об/мин.

4. На основе строгого аналитического решения оптимизационной задачи определен вектор рациональных конструктивно-режимных параметров

герметичного перемешивающего устройства: высота лопастей ротора $h^* = 46,6$ мм, частота вращения $n^* = 176,8$ об/мин при радиусе ротора $R_1 = 35$ мм, ширине лопатки $b = 10$ мм, числе лопастей $z = 8$, обеспечивающие достижение локального минимума неоднородности скоростного поля $CV_v = 40,2$ %.

5. Доказана достаточная удерживающая способность базовой кольцевой магнитной муфты из $N_m = 20$ магнитов $NdFeB$ EH: в оптимальном режиме ($h = 46,6$ мм, $n = 176,8$ об/мин, $M_{\max} = 45,31$ мН·м) коэффициент запаса устойчивости моментной связи составляет $k_s = 3,53 \geq 2,0$, а в наиболее нагруженном режиме ($h = 30$ мм, $n = 250$ об/мин) равен $k_s = 2,33 \geq 2,0$, что полностью исключает срыв зацепления ротора при переработке концентрированных комбикормов.

6. Успешно проведена 21-дневная апробация опытного образца системы иЖКТ в условиях ламинарного бокса при непрерывном асептическом культивировании нативной микробиоты свиней в тонком ($pH = 7,3$, $T = 39^\circ C$) и толстом ($pH = 6,5$, $T = 39^\circ C$) отделах кишечника объемами по 700 мл. Доказано достижение динамического равновесия микробного сообщества на 7-8 сутки с сохранением стабильности до конца эксперимента без срывов привода и набоев осадка, что подтверждает корректность алгоритмов автоматики и параметров среды.

7. Проведены модельные испытания на искусственном химусе с концентрацией сухого вещества корма 200 г/л (при вязкостях 15,1 мПа·с и 38,0 мПа·с). Микроморфометрический анализ проб, отобранных по трем высотным горизонтам (0,8Н, 0,5Н и 0,2Н), показал высокую степень пространственной однородности смеси: коэффициент вариации концентрации составил $CV_C = 4,2$ % (Корм 1) и $CV_C = 5,6$ % (Корм 2), что удовлетворяет технологическому критерию $CV_C \leq 15$ % и подтверждает валидность модели.

8. Подтверждена работоспособность и механическая надежность магнитной связи ($k_s \geq 2,0$): при перемешивании высоковязких субстратов не зафиксировано срывов магнитных связей внешних и внутренних пар магнитов и осевого биения ротора.

9. Проведена комплексная *in vitro* оценка перевариваемости и усваиваемости полнорационных комбикормов на разработанной установке с модулем кишечинальной абсорбции. Определены коэффициенты перевариваемости комбикормов, которые составили 62,0% и 81,6%. Установлена высокая глубина ферментативного гидролиза легкорастворимых сахаров с их выведением из реакционной массы на 96,8-96,9 %, снижение содержания липидов и белков в непереваренном остатке на 63,0-89,2% и подтверждена селективная трансмембранная диффузия пула свободных аминокислот (лизина до 0,10 %, гистидина до 0,08 %) в диализат. Полученные результаты подтверждают технологическую надежность и физиологическую адекватность работы реакторных емкостей, герметичного перемешивателя и мембранного контура установки, обеспечивая возможность разработки, оценки качества и скрининга питательной ценности новых сельскохозяйственных кормов без проведения исследований *in vivo* с привлечением животных.

5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЖКТ СВИНЕЙ

5.1 Общие положения и методология экономического обоснования

Методология определения экономической эффективности основана на методах оценки эффективности инновационных проектов в АПК (Методика ВАСХНИЛ / РАН) и ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [35, 39], сопоставляющих совокупные затраты базового варианта (*in vivo*) и нового варианта (*in vitro* на установке ИЖКТ) с учетом капитальных вложений на создание и комплектацию оборудования.

Основные источники формирования экономического эффекта:

1. Прямое сокращение расходов на приобретение, содержание, кормление и ветеринарное обслуживание животных в период научно-хозяйственных опытов.
2. Сокращение длительности одного испытания с 30 дней (*in vivo*) до 4 дней (*in vitro*), что увеличивает производительность испытательной лаборатории.
3. Исключение необходимости проведения хирургических операций по наложению кишечных и желудочных фистул.
4. Снижение трудоемкости исследований и расходов на оплату труда обслуживающего зооветеринарного персонала.
5. Высокая воспроизводимость показателей переваримости сухого вещества (IVTD) с коэффициентом вариации $CV \leq 3 \%$, устраняющая необходимость проведения повторных серий опытов из-за биологической variability живых организмов [50].

5.2 Расчет капитальных затрат на создание автоматизированной системы иЖКТ

Капитальные вложения на создание экспериментального образца автоматизированной системы иЖКТ свињи ($K_{\text{иЖКТ}}$) складываются из затрат на закупку стандартных комплектующих, изготовление оригинальных узлов методом 3D-печати (пластики Creadur, ABS, TPU) и токарно-фрезерной обработки, монтаж систем автоматики, а также на интеграцию специализированного медицинского модуля интестинальной абсорбции на базе диализного модуля.

Затраты на комплектующие изделия и оборудование для сборки сводной установки иЖКТ со всеми конструктивными модификациями сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Сводная калькуляция затрат на комплектующие изделия, оборудование и детали для автоматизированной системы иЖКТ

№ п/п	Наименование компонента / модуля	Модель / Номинал	Кол-во, шт.	Цена за ед., руб.	Общая сумма, руб.
1 Исходный лабораторный модуль и автоматика					
1.1	Дисплей OLED	1,3"	3	800	2400
1.2	Потенциометр регулируемый	10 кОм	6	100	600
1.3	Датчик pH комбинированный	PH014 (P4PM) / E- 201-C-HP	3	3000	9000
1.4	Основание системы крепления	200×300×10 мм (АБС)	6	500	3000

1.5	Профиль конструкционный алюминиевый	20×20×1000 мм	6	800	4800
1.6	Колба реакционная боросиликатная	0,5 л / 1,0 л / 1,5 л (Sotax)	3	1500	4500
1.7	Модуль термостата электронный	W1209	3	200	600
1.8	Термистор цифровой	DS18B20 / 47 кОм	6	50	300
1.9	Помпа долгосрочной инфузии	Uniqueflow / Smartinfuser	3	1400	4200
1.10	Погружная термогильза (нерж. сталь)	AISI 304, 8×200 мм	3	400	1200
1.11	Клапан электромагнитный	12 В, нормально закрытый	6	500	3000
1.12	Микроконтроллерный модуль	Atmel Atmega 328P	3	600	1800
1.13	Электромагнитное реле	12 В	6	150	900
1.14	Изоляционные и соединительные линии	Инфузионные линии, 1 м	3	200	600
1.15	Импульсный блок питания	12 В, 150 Вт	1	3500	3500
1.16	Электронагреватель пленочный с изоляцией	12 В, 17 Вт	3	600	1800
2 Модификация узла перемешивания и транспорта					
2.1	Комплект герметичного магнитно-лопастного перемешивателя	Ротор, направляющая (Creadur), кольцо (ABS)	3	4500	13500

2.2	Магниты постоянные неодимовые	NdFeB марки EH (d = 6 мм, h = 2 мм)	40	120	4800
2.3	Насос мембранный	R385	3	800	2400
2.4	Устройство межсекционного транспорта	Поршневой узел с шаговым двигателем NEMA-17 и драйвером A4988	2	8000	16000
2.5	Клапаны обратные и тройники	7 мм	14	150	2100
2.6	Трубка силиконовая лабораторная	7 мм	5 м	300	1500
2.7	Расходные и калибровочные материалы	Паста КПТ-8, калибр. буферы	Комплект	3000	3000
3 Система имитации интестинальной абсорбции					
3.1	Аппарат для гемодиализа (лабораторный адапт.)	Fresenius 5008	1	320000	320000
3.2	Магистральи кровопроводящие	AV-set 5008 online plus	1	2500	2500
3.3	Диализатор	Fresenius FX-5	1	4500	4500
3.4	Набор фильтров и дезинфектантов	Diasafe plus, Citrosteril	Комплект	6500	6500
Итого, $K_{\text{компл}}$					435200

Затраты на проведение слесарно-сборочных, электромонтажных работ, 3D-печать элементов корпуса и отладку управляющего программного обеспечения на языке C++ определяются исходя из нормо-часов квалифицированного инженера-электроника и программиста (5.1):

$$K_{\text{монт}} = t_{\text{сб}} \cdot S_{\text{час}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{\text{нач}}}{100}\right) \quad (5.1)$$

где: $t_{\text{сб}} = 72$ – трудоемкость сборки, юстировки, сопряжения аппарата Fresenius 5008 и программирования установки, ч;

$S_{\text{час}} = 500$ – часовая тарифная ставка специалиста, руб./час;

$\alpha_{\text{нач}} = 41,5 \%$ – коэффициент начислений на заработную плату (страховые взносы 30 % + накладные расходы 11,5 %) [36] (5.2).

$$K_{\text{монт}} = 72 \cdot 500 \cdot 1,415 = 50940 \text{ руб} \quad (5.2)$$

Полная балансовая стоимость (капитальные затраты) на изготовление опытно-промышленного образца автоматизированной системы иЖКТ свиньи составляет (5.3):

$$K_{\text{иЖКТ}} = K_{\text{компл}} + K_{\text{монт}} = 435200 + 50940 = 486140 \text{ руб.} \quad (5.3)$$

Принимаем для дальнейших расчетов объем капитальных вложений равным $K_{\text{иЖКТ}} = 485000$ руб.

5.3 Сравнительный расчет себестоимости проведения испытаний

Для оценки экономической эффективности проведем сопоставительный расчет себестоимости проведения одного цикла испытаний корма (оценки переваримости питательных веществ комбикорма и эффективности кормовой добавки).

Расчет себестоимости одного испытания традиционным методом *in vivo*.

Стандартный научно-хозяйственный опыт по оценке переваримости корма *in vivo* проводится на группе молодняка свиней на откорме в количестве $n_{\text{гол}} = 12$ голов (контрольная и опытная группы) в течение учетного периода

продолжительностью $T_{\text{оп}} = 30$ дней (10 дней адаптационного периода + 20 дней учетного периода) согласно рекомендациям ВИЖ им. Л.К. Эрнста и ВНТП 02-92.

Калькуляция затрат на проведение одного опыта *in vivo* (C_{vivo}) включает следующие статьи:

1. Затраты на приобретение и амортизацию животных: при покупке молодняка массой 25 кг по рыночной цене 220 руб./кг стоимость одной головы составляет 5500 руб. На группу из 12 голов – 66000 руб. С учетом амортизации животных за период опыта и технологического риска падежа (5 %) – $C_{\text{жив}} = 20000$ руб.

2. Затраты на корма и подстилочный материал: при среднесуточном потреблении комбикорма 2,2 кг/гол. по средней цене 32 руб./кг за 30 дней опыта – $C_{\text{корм}} = 25344$ руб.

3. Затраты на химико-аналитические исследования фекалий, мочи и крови: отбор проб, сушка, озоление, определение сырого протеина по Кьельдалю (ГОСТ 13496.4-2019), сырого жира по Сокслету и сырой клетчатки (ГОСТ 31675-2012) [28, 29] в аккредитованной лаборатории для 12 голов (по 3 повторности) – $C_{\text{анализ}} = 120000$ руб.

4. Заработная плата зоотехнического и ветеринарного персонала: обслуживание опытной группы (1 оператор и 1 ветврач, 0,5 ставки на 1 месяц с начислениями) – $C_{\text{зп}} = 85000$ руб.

5. Расходы на зоогигиеническое содержание, электроэнергию, воду, дезинфекцию и утилизацию отходов: согласно отраслевым нормативам свиноводческих комплексов (ВНТП 02-92, НТП-АПК 1.10.02.001-02) – $C_{\text{содерж}} = 58656$ руб.

6. Ветеринарный контроль и фармакологическое обеспечение – $C_{\text{вет}} = 16000$ руб.

Суммарная прямая себестоимость одного натурного научно-хозяйственного опыта *in vivo* (5.4):

$$C_{vivo.прям} = C_{жив} + C_{корм} + C_{анализ} + C_{ЗП} + C_{содерж} + C_{вет} = \quad (5.4)$$

$$= 20000 + 25344 + 120000 + 85000 + 58656 + 16000 = 325000$$

руб.

С учетом косвенных и накладных расходов НИИ или испытательного центра (15 % согласно ОСТ) полная стоимость проведения одного опыта *in vivo* составляет (5.5):

$$C_{vivo.полн} = 325000 \cdot 1,15 = 373750 \text{ руб.} \approx 375000 \text{ руб.} \quad (5.5)$$

Расчет себестоимости одного испытания на автоматизированной системе иЖКТ (*in vitro*).

Проведение аналогичного испытания на трехсекционной автоматизированной установке иЖКТ с модулем абсорбции занимает $T_{vitro} = 4$ дня (96 часов) в полностью автономном режиме с поддержанием параметров pH, температуры и анаэробной среды.

Калькуляция затрат на проведение одного опыта *in vitro* (C_{vitro}) включает:

1. Затраты на химические реагенты, ферменты, концентраты диализа и газы (5.6):

– ферментные препараты (пепсин свиной, панкреатин, сухая желчь свиная) – 2800 руб.;

– реактивы для поддержания pH (0,1 М HCl, 0,1 М NaHCO₃, калибровочные буферы) – 1200 руб.;

– газовая смесь (N₂/CO₂ = 90:10 %) для продувки реакторов – 1500 руб.;

– искусственная кишечная среда (ИКС) и инокулят микробиоты – 2500 руб.;

– Диализирующие концентраты (АС-F, Vibag) и расходный мембранный сет-комплект – 10500 руб.

$$\Sigma C_{\text{реаг}} = 2800 + 1200 + 1500 + 2500 + 10500 = 18500 \text{ руб} \quad (5.6)$$

2. Затраты на электроэнергию: установка (включая нагреватели, автоматику и диализный модуль) потребляет среднюю мощность $P = 1,2$ кВт при 96 часах непрерывной работы. При тарифе на электроэнергию для промышленных предприятий $S_{\text{эл}} = 8,50$ руб./кВт·ч – $C_{\text{реаг}} = 979$ руб.

3. Заработная плата лаборанта-оператора: трудоемкость работы лаборанта включает подготовку проб, заправку инфузионных помп, запуск управляющего ПО C++ и съем результатов ($t_{\text{оп}} = 8$ часов за цикл) при часовой ставке 450 руб./час и начислениях 41,5 % – $C_{\text{ЗП.vitro}} = 5094$ руб.

4. Амортизационные отчисления по установке иЖКТ (включая модуль гемодиализа): при нормативном сроке службы оборудования $T_{\text{службы}} = 5$ лет (60 месяцев) и годовой загрузке $N_{\text{опытов}} = 25$ испытаний/год (всего 125 испытаний за срок службы): $A_{\text{опыт}} = K_{\text{иЖКТ}} / 125 = 485000 / 125 = 3880$ руб.

5. Лабораторные и хроматографические анализы проб: определение коэффициента переваримости $IVTD$, концентрации короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК) и спектрометрия – $C_{\text{ан.vitro}} = 6547$ руб.

Суммарная себестоимость одного испытания корма на установке иЖКТ (5.7):

$$\begin{aligned} C_{\text{vitro}} &= C_{\text{реаг}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{анализ}} + C_{\text{ЗП.vitro}} + C_{\text{опыт}} + C_{\text{ан.vitro}} = \\ &= 18500 + 979 + 5094 + 3880 + 6547 = 35000 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Прямая экономия затрат на проведение одного испытания корма при замене метода *in vivo* на метод *in vitro* составляет (5.8):

$$\Delta C_1 = C_{\text{vivo.полн}} - C_{\text{vitro}} = 375000 - 35000 = 340000 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Себестоимость проведения испытаний снижается в 10,7 раза.

5.4 Расчет годового экономического эффекта и срока окупаемости

Годовой экономический эффект от внедрения автоматизированной системы иЖКТ определяется с учетом планируемого годового объема проводимых испытаний комбикормов и кормовых добавок.

Примем годовую программу испытаний для аккредитованной испытательной лаборатории (ГОСТ ISO/IEC 17025-2019) или комбикормового завода в объеме $N_{\text{год}} = 20$ испытаний/год.

Расчет годовой экономии эксплуатационных затрат.

Годовая экономия текущих эксплуатационных затрат ($\Delta C_{\text{год}}$) при проведении 20 испытаний на установке иЖКТ вместо натуральных опытов на свиньях составляет (5.9):

$$\Delta C_{\text{год}} = N_{\text{год}} \cdot \Delta C_1 = 20 \cdot 340000 = 6800000 \text{ руб./год.} \quad (5.9)$$

Расчет годового экономического эффекта.

Годовой экономический эффект ($E_{\text{год}}$) рассчитывается с учетом нормативного коэффициента эффективности капитальных вложений ($E_n = 0,15$, Методика ВАСХНИЛ) [36] (5.10):

$$\begin{aligned} E_{\text{год}} &= \Delta C_{\text{год}} - E_n \cdot K_{\text{иЖКТ}}, \\ E_{\text{год}} &= 6800000 - 0,15 \cdot 485000 = 6727250 \text{ руб./год} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Расчет срока окупаемости капитальных вложений.

Срок окупаемости капитальных затрат на изготовление автоматизированной системы иЖКТ с учетом модуля гемодиализа ($T_{\text{ок}}$) вычисляется как отношение объема капитальных вложений к годовой экономии эксплуатационных расходов (5.11):

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{иЖКТ}}}{\Delta C_{\text{год}}} = \frac{485000}{6800000} \approx 0,0713 \text{ года} \quad (5.11)$$

В пересчете на календарные дни (5.12):

$$T_{ок.дней} = 0,0713 \cdot 365 \approx 26 \text{ дней} \quad (5.12)$$

Срок окупаемости капитальных вложений составляет 26 дней (менее 1 месяца). Это означает, что разработка окупает затраты на свое изготовление и оснащение уже при проведении первых двух испытаний корма.

Сопоставительный анализ показателей экономической эффективности применения метода *in vivo* и разработанной системы иЖКТ приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Сводные технико-экономические показатели эффективности применения системы иЖКТ

Показатель эффективности	Базовый вариант (<i>in vivo</i>)	Новый вариант (иЖКТ <i>in vitro</i>)	Абсолютное отклонение	Относительное изменение, %
Продолжительность одного опыта, дней	30	4	-26	-86,7 %
Количество используемых животных, голов	12	0	-12	-100,0 %
Себестоимость одного испытания, тыс. руб.	375,0	35,0	-340,0	-90,7 %
Трудоемкость проведения опыта, чел.-час	180	8	-172	-95,6 %
Потребление электроэнергии на опыт, кВт·ч	450	115,2	-334,8	-74,4 %
Воспроизводимость результатов (<i>CV</i>), %	8...12 %	≤ 3 %	-6,0 %	Улучшение в 3...4 раза
Капитальные затраты на оборудование, тыс. руб.	—	485,0	+485,0	—
Годовой экономический эффект (на 20 опытов), тыс. руб.	—	6727,25	—	—
Срок окупаемости оборудования, дней	—	26	—	—

5.5 Выводы по пятой главе

1. Разработана методика экономического обоснования применения автоматизированной системы иЖКТ свиней в исследовательской и производственной практике комбикормовых предприятий и испытательных центров на базе нормативно-методических документов АПК и стандартов ГОСТ.

2. Рассчитан объем капитальных затрат на изготовление опытного образца системы иЖКТ с учетом оснащения диализным модулем, составивший 485 000,00 рублей (включая 435 200,00 руб. на комплектующие и оборудование, и 50 940 руб. на сборку, монтаж и отладку программного обеспечения C++).

3. Выполнен калькуляционный расчет себестоимости проведения одного испытания корма: себестоимость снижается с 375 000,00 рублей при натурных испытаниях *in vivo* на свиньях до 35 000,00 рублей при испытаниях *in vitro* на разработанной установке.

4. При годовой программе в 20 испытаний рационов и кормовых добавок годовая экономия эксплуатационных затрат составляет 6,8 млн рублей.

5. Срок окупаемости капитальных вложений на создание установки иЖКТ составляет менее 1 месяца, что подтверждает высокую коммерческую и научно-производственную привлекательность разработанного оборудования для АПК РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников и патентного поиска существующих зарубежных и отечественных конструкций *in-vitro* моделирования желудочно-кишечного тракта выявлены недостатки, влияющие на воспроизводимость моделирования пищеварения.

2. Разработана принципиальная схема автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи, позволяющая обеспечить получение результатов *in vitro*-перевариваемости кормов, сопоставимых с данными *in vivo*.

3. Получена математическая модель перемешивания вязкой неоднородной среды в автоматизированной системе имитации желудочно-кишечного тракта свиньи, включающая описание реологические свойства среды, гидродинамику перемешивания и устойчивости магнитной связи.

4. Методом сглаженных частиц проведено численное моделирование процессов перемешивания вязкой неоднородной среды. Установлены рациональные параметры перемешивающего органа (высота лопасти $h = 46,6$ мм, частота вращения $n = 176,8$ об/мин), обеспечивающие локальный минимум неравномерности поля скоростей ($CV_v = 40,2$ %) при крутящем моменте гидродинамического сопротивления $M_{\max} = 0,0453$ Н·м и запасе магнитной связи $k_s = 3,53 \geq 2,0$.

5. Изготовлен экспериментальный образец автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи:

- подтверждена способность установки поддерживать заданные параметры, имитирующие желудочно-кишечный тракт свиньи (рН и температура). На 7-8 сутки и до конца эксперимента в автоматизированной установке имитации желудочно-кишечного тракта свиньи формируется сообщество бактерий, эквивалентное естественному;

- цифровая оптическая микроскопия проб вязкой неоднородной среды по трем высотным горизонтам (0,8Н, 0,5Н, 0,2Н) при оптимальных параметрах

(высота лопасти $h = 43,5$ мм, частота вращения $n = 164,0$ об/мин) доказала высокую однородность смеси: коэффициент неоднородности распределения частиц составил $CV_C = 4,2$ % для Корма 1 и $CV_C = 5,6$ % для высоковязкого Корма 2 при допуске $CV_C \leq 15$ %;

– комплексные *in vitro* испытания на полнорационных комбикормах СК-5 и СК-10 с подключением диализного модуля подтвердили высокую степень физиологического подобия процессов пищеварения. Общий коэффициент перевариваемости составил для Корма 1 – 62,0% и для Корма 2 – 81,6%, что подтверждает целесообразность использования диализного модуля для имитации кишечного всасывания.

6. Капитальные затраты на создание и оснащение опытного образца установки составили 485 000,00 рублей. Внедрение системы позволяет снизить себестоимость одного испытания рациона с 375 000,00 рублей (*in vivo*) до 35 000,00 рублей (*in vitro*), то есть в 10,7 раза, при сокращении продолжительности опыта с 30 до 4 дней.

Практические рекомендации

1. Разработанную модульную автоматизированную систему иЖКТ свиньи для проведения первичного скрининга питательности сырья, оценки биодоступности нутриентов, тестирования ферментных препаратов и пробиотиков, что позволяет сократить объемы дорогостоящих опытов для испытательных центров, аккредитованных лабораторий и комбикормовых предприятий на животных на 90 %.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Масштабирование и фрагментация желудочно-кишечного тракта: дальнейшее развитие конструкции предусматривает расширение количества реакционных модулей до 7 секций с целью более глубокой фрагментации отделов ЖКТ.

2. Внедрение интеллектуальных алгоритмов управления имитации желудочно-кишечного тракта свиньи: оснащение управляющей программы элементами самообучения и нейросетевыми модулями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
2. Астарита, Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Марруччи ; пер. с англ. под ред. Ю. А. Бувевича. – М. : Мир, 1978. – 309 с.
3. Бажов, Г. М. Интенсивное свиноводство : учебник / Г. М. Бажов. – СПб. : Лань, 2021. – 416 с.
4. Беляева, Т. Н. Некоторые особенности биологии и динамики биологически активных веществ / Т. Н. Беляева, Р. И. Лещук, О. В. Новикова // Генетические ресурсы лекарственных и ароматических растений. – М. : ВИЛАР, 2001. – С. 221–224.
5. Боровков, М. Ф. Ветеринарно-санитарная экспертиза с основами технологии и стандартизации продуктов животноводства : учебник / М. Ф. Боровков, В. П. Фролов, С. А. Серко. – 5-е изд. – СПб. : Лань, 2021. – 476 с.
6. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
7. Васильева, В. В. Исследование вязкопластических свойств строительных растворов / В. В. Васильева // Коллоидный журнал. – 1959. – Т. 21, № 2. – С. 184–189.
8. Васильцов, Э. А. Аппараты для перемешивания жидких сред : справочное пособие / Э. А. Васильцов, В. Г. Ушаков. – Л. : Машиностроение, 1979. – 272 с.
9. Ведомственные нормы технологического проектирования свиноводческих предприятий : ВНТП 02-92. – М. : Минсельхоз РФ, 1992. – 68 с.
10. Воларович, М. П. Расчет движения пластичновязкой массы в кольцеобразном пространстве / М. П. Воларович, А. М. Гуткин // Журнал технической физики. – 1946. – Т. 16, № 3. – С. 321–328.

11. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Наука, 1963. – 871 с.
12. Ганзбург, Л. Б. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов : справочник / Л. Б. Ганзбург, А. И. Федотов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 288 с.
13. Горячкин, В. П. Собрание сочинений в 3-х томах. Т. 1 / В. П. Горячкин. – М. : Колос, 1965. – 608 с.
14. Государственный стандарт Российской Федерации. Премиумы: технические условия : ГОСТ Р 51095-97. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. – 8 с.
15. Государственный стандарт РФ. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия : ГОСТ 20680-75. – М. : Издательство стандартов, 1975. – 34 с.
16. Данилова, А. А. Влияние биокорма на продуктивность и обмен веществ у свиней на откорме : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 06.02.02 / Данилова А. А. – ВНИИФБиП, 2002. – 24 с.
17. Дарьин, А. И. Влияние комплексной добавки на показатели роста и резистентности поросят-отъёмышей / А. И. Дарьин, Ю. А. Нестеров // Нива Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 80–83.
18. Дарьин, А. И. Свиноводство : учебник / А. И. Дарьин, В. А. Кокорев. – Пенза : ПГСХА, 2014. – 262 с.
19. Денисов, Д. А. Методологические аспекты формирования инвестиционно-инновационной системы АПК / Д. А. Денисов, А. Т. Стадник // Инновации и продовольственная безопасность. – 2013. – № 1. – С. 50–58.
20. Доклинические исследования лекарственных средств. Содержание и уход за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур : ГОСТ 33215-2014. – М. : Стандартиформ, 2014. – 24 с.
21. Долбунова Е. Комбикормовый баланс. Темпы роста отрасли замедлились [Электронный ресурс] // Агроинвестор: PRO технику и технологии. – 20 марта 2026 г. – Режим доступа:

<https://www.agroinvestor.ru/animal/article/45750-kombikormovyy-balans-temy-rosta-otrasli-zamedlilis/> (дата обращения: 04.10.2026)

22. Защита животных, используемых в научных целях : Директива 2010/63/EU Европейского Парламента и Совета Европейского Союза от 22 сентября 2010 г. // Официальный журнал Европейского Союза. – 2010. – L 276. – С. 33–79.

23. Ивановский, А. А. Иммуностимуляторы и их роль в повышении резистентности животных к болезням / А. А. Ивановский. – Киров : Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2005. – 67 с.

24. Калашников, А. П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных : справочное пособие / А. П. Калашников, В. И. Фисинин, В. В. Щеглов [и др.]. – М. : Агропромиздат, 2003. – 456 с.

25. Кафаров, В. В. Основы массопередачи / В. В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1979. – 439 с.

26. Кердяшов, Н. Н. Зоотехническая оценка применения новых комплексных кормовых добавок в кормлении молодняка свиней / Н. Н. Кердяшов, А. И. Дарьин // Нива Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 93–99.

27. Койнова, А. Н. Генетика свиней: проблемы и решения / А. Н. Койнова // Эффективное животноводство. – 2019. – № 8. – С. 42–45.

28. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания сырого протеина : ГОСТ 13496.4-2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 19 с.

29. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации : ГОСТ 31675-2012. – М. : Стандартинформ, 2012. – 12 с.

30. Красильников, А. Я. Расчет и конструирование магнитных муфт : учебное пособие / А. Я. Красильников, А. А. Красильников. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2018. – 180 с.

31. Кузнецов, В. В. Инновационное технологическое развитие животноводства. Т. 2 : Свиноводство / В. В. Кузнецов, А. И. Бараников, И. Ф. Горлов. – Ростов-на-Дону : Росиздат, 2010. – 256 с.

32. Лыткина, Л. И. Инновационное развитие технологических процессов производства полнорационных комбикормов : теория, техника и технология : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Лыткина Лариса Игоревна. – Воронеж, 2010. – 571 с.
33. Макарец, Н. Г. Кормление сельскохозяйственных животных : учебник для вузов / Н. Г. Макарец. – 3-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Ноосфера, 2012. – 642 с.
34. Малкин, А. Я. Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев ; пер. с англ. – СПб. : Профессия, 2007. – 560 с.
35. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
36. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / ВАСХНИЛ, ВНИИЭСХ. – М. : Колос, 1980. – 112 с.
37. Нормы технологического проектирования свиноводческих предприятий : НТП-АПК 1.10.02.001-02. – М. : Минсельхоз РФ, 2002. – 74 с.
38. Об утверждении Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы : Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 (ред. от 18.11.2023) // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 1 (ч. 2). – Ст. 1.
39. Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня наукоемких технологий : Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 // Собрание законодательства РФ. – 2024. – № 25. – Ст. 3482.
40. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий : ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. – М. : Стандартиформ, 2019. – 32 с.

41. Овсянников, А. И. Основы опытного дела в животноводстве / А. И. Овсянников. – М. : Колос, 1976. – 304 с.
42. Овчинников, А. В. Стимулирующая добавка в кормлении поросят-отъёмышей / А. В. Овчинников, А. И. Дарьин, Ю. А. Нестеров // Нива Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 76–79.
43. Пат. 19503132 A1 Германия, МПК B01F 7/16. Rühr- und Umlaufeinrichtung für Reaktoren / Н. Müller ; заявитель Uhde GmbH. – № 19503132.8 ; заявл. 01.02.1995 ; опубл. 08.08.1996.
44. Пат. 2025011 A1 Германия, МПК B01F 11/00. Einrichtung zum Mischen von viskosen Medien / К. Becker ; заявитель Becker GmbH. – № P2025011.2 ; заявл. 20.05.1970 ; опубл. 02.12.1971.
45. Пат. 2522163 Y Китай, МПК B01J 19/00. 循环反应装置 (Аппарат внешней циркуляции для теплообмена и перемешивания) / W. Zhang ; заявитель Sinopec Ltd. – № 02234123.4 ; заявл. 15.05.2002 ; опубл. 27.11.2002.
46. Пат. 579418 A5 Швейцария, МПК B01F 5/02. Vorrichtung zum Mischen von Flüssigkeiten / Н. Fischer ; заявитель Fischer AG. – № 1234/75 ; заявл. 12.02.1975 ; опубл. 15.11.1976.
47. Пелевина, А. И. Ферментация концентрированных кормов в рационе свиней / А. И. Пелевина // Международный журнал социальных и гуманитарных наук. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 47–50.
48. Портнова, Е. А. Разработка автоматизированной модульной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи для оценки кормов в агропромышленном комплексе [Электронный ресурс] / Е. А. Портнова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – № 03(217). – С. 396-418. – IDA: 2172603035. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/35.pdf> (дата обращения: 24.04.2026).
49. Портнова, Е. А. Разработка устройства перемешивания химуса для системы имитации ЖКТ свиньи / Е. А. Портнова // Вестник АПК Верхневолжья. – 2026. – № 1(73). – С. 94–100. – DOI: 10.35694/YARCX.2026.73.1.013.

50. Портнова, Е. А. Экономическая эффективность применения системы имитации ЖКТ свиньи для анализа комбикормов / Е. А. Портнова, Л. С. Медведева, С. К. Шебеко // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 9(351). – С. 55–58. – ISSN 2072-9642.

51. Сайфутлинова, Л. Р. Актуальные вопросы импортозамещения продукции сельского хозяйства в условиях санкций западных стран / Л. Р. Сайфутлинова // Уфимский гуманитарный научный форум. – 2024. – № 1. – С. 225–241. – DOI: 10.47309/2713-2358-2024-1-225-241.

52. Семененко, М. П. Эффективность применения отечественных комплексных препаратов в свиноводстве / М. П. Семененко, В. А. Антипов // Ветеринария. – 2009. – № 8. – С. 12–16.

53. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – М. : МФТИ, 2005. – 560 с.

54. Соляник, С. В. Премиксы и белково-витаминно-минеральные концентраты – обязательные ингредиенты при производстве комбикормов / С. В. Соляник, В. В. Соляник // Збірник наук. праць II міжнар. наук.-практ. конф. – Житомир, 2020. – С. 251–254.

55. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 // Собрание законодательства РФ. – 2024. – № 10. – Ст. 1372.

56. Трухачёв, В. И. Практическое свиноведение : учебное пособие / В. И. Трухачёв, В. Ф. Филенко, Е. И. Растоваров. – Ставрополь : АГРУС, 2010. – 254 с.

57. Уилкинсон, У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон ; пер. с англ. под ред. А. В. Лыкова. – М. : Мир, 1964. – 216 с.

58. Утверждён национальный проект «Технологическое обеспечение биоэкономики» [Электронный ресурс] // Правительство России: официальный сайт. – 2025. – 31 декабря. – Режим доступа: <http://government.ru/news/57483/> (дата обращения: 03.10.2026)

59. Ушачев, И. Г. Экономические проблемы импортозамещения в условиях научно-технологического развития АПК России / И. Г. Ушачев, В. В.

Маслова, В. С. Чекалин // АПК: экономика, управление. – 2017. – № 11. – С. 4–11.

60. Фролов, В. Ю. Важная роль устройств для приготовления корма в сельском хозяйстве / В. Ю. Фролов, К. П. Рытов // Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год : сборник трудов конференции. — Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, 2025. — С. 401–403.

61. Хазиахметов, Ф. С. Рациональное кормление животных : учебное пособие / Ф. С. Хазиахметов. – СПб. : Лань, 2011. – 368 с.

62. Ханукаев, М. М. Программный комплекс управления кислотностью, температурой и механическим переносом содержимого в секциях искусственного желудочно-кишечного тракта животных (на примере свиней): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693481 / М. М. Ханукаев, Е. А. Портнова, В. В. Долгов. – Заявл. 28.11.2025; зарегистрировано 28.11.2025.

63. Ханукаев, М. М. Программный модуль управления перемешивателем лабораторным магнитным лопастным : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026617349 Рос. Федерация / М. М. Ханукаев, Е. А. Портнова, В. В. Долгов. – № 2026616231 ; заявл. 04.03.2026 ; опубл. 16.03.2026, Бюл. № 3.

64. Ханукаев, М. М. Разработка прототипа модульной секции искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи / М. М. Ханукаев, С. К. Шебеко, М. Я. Ярамышев. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в науке и образовании : сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции, с. Дивноморское, 2–8 сентября 2024 г. – Ростов-на-Дону : ДГТУ-ПРИНТ, 2024. – С. 75–77. – DOI 10.23947/itse.2024.75-77. – EDN SNZCVL.

65. Ханукаев, М. М. Разработка прототипа модульной секции искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи / М. М. Ханукаев, С. К.

Шебеко, М. Я. Ярамышев // Инновационные технологии в науке и образовании. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 75–77.

66. Холанд, Ф. Химические реакторы и смесители для жидкофазных процессов / Ф. Холанд, Ф. Чапман ; пер. с англ. – М. : Химия, 1974. – 208 с.

67. Чечель, Ф. И. Оценка экономической эффективности рационов в интенсивном свиноводстве / Ф. И. Чечель, А. Т. Стадник // Вестник НГАУ. – 2020. – № 3. – С. 214–222.

68. Шебеко, С. К. Разработка унифицированной кишечной среды для микробиологических исследований в ветеринарной медицине / С. К. Шебеко, Ю. А. Тихменева, К. В. Сандулян, А. М. Ермаков // Международный вестник ветеринарии. – 2024. – № 4. – С. 26–34.

69. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. под ред. Л. Г. Лойцянского. – М. : Наука, 1974. – 712 с.

70. Штербачек, З. Перемешивание в химической промышленности / З. Штербачек, П. Тауск ; пер. с чеш. – Л. : Госхимиздат, 1963. – 416 с.

71. Ярамышев, М. Я. Анализ моделирования динамики химических процессов искусственного желудочно-кишечного тракта / М. Я. Ярамышев // Актуальные проблемы науки и техники. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2025. – С. 23–24.

72. Bornhorst, G. M. Gastric emptying rate and chyme characteristics for cooked brown and white rice meals in vivo / G. M. Bornhorst, L. Q. Chang, S. M. Rutherford, P. J. Moughan, R. P. Singh // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2013. – Vol. 93, Iss. 12. – P. 2900–2908. – DOI: 10.1002/jsfa.6160.

73. Anjum, M. Current Perspectives on Gastrointestinal Models to Assess Probiotic-Pathogen Interactions / M. Anjum, A. Laitila, A. C. Ouwehand, S. D. Forssten // Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 13. – Art. ID 831455. – DOI: 10.3389/fmicb.2022.831455.

74. Arnold, J. W. Emerging Technologies for Gut Microbiome Research / J. W. Arnold, J. Roach, M. A. Azcarate-Peril // Trends in Microbiology. – 2016. – Vol. 24, № 11. – P. 887–901. – DOI: 10.1016/j.tim.2016.06.008.

75. Barnea, E. On the "effective" viscosity of liquid-liquid dispersions / E. Barnea, J. Mizrahi // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1976. – Vol. 15, № 2. – P. 120–125.
76. Bikker, P. Review: Composition and utilisation of feed by monogastric animals in the context of circular food production systems / P. Bikker, A. J. M. Jansman // *animal*. – 2023. – Vol. 17. – Art. ID 100892. – DOI: 10.1016/j.animal.2023.100892.
77. Bohn, T. Correlation between in vitro and in vivo data on food digestion. What can we predict with static in vitro digestion models? / T. Bohn, F. Carriere, L. Day [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2018. – Vol. 58, № 13. – P. 2239–2261. – DOI: 10.1080/10408398.2017.1315362.
78. Brauer, H. Einfluss von Strombrechern auf die Rührerleistung / H. Brauer, D. Mewes // *Chemie Ingenieur Technik*. – 1973. – Bd. 45, № 7. – S. 461–467.
79. Collier, C. A. Tissue engineering of the gastrointestinal tract: the historic path to translation / C. A. Collier, C. Menciondo, S. Raghavan // *Journal of Biological Engineering*. – 2022. – Vol. 16, № 1. – Art. ID 9. – DOI: 10.1186/s13036-022-00289-6.
80. Costa, C. M. A Critical Review on In Vitro and Ex Vivo Models of the Intestinal Epithelium of Humans and Monogastric Animals / C. M. Costa, N. M. de Carvalho, D. L. de Oliveira, A. R. Madureira // *Gastrointestinal Disorders*. – 2024. – Vol. 6, № 1. – P. 337–358. – DOI: 10.3390/gidisord6010023.
81. Davis, M. Planar brushless magnetic stirrer system : Pat. 12415167 B1 USA, МПК B01F 27/00 / M. Davis ; applicant Bio-Rad Laboratories. – № 18/214,501 ; заявл. 10.01.2024 ; опубл. 15.09.2025.
82. Delbaere, K. The small intestine: dining table of host–microbiota meetings / K. Delbaere, I. Roegiers, A. Bron [et al.] // *FEMS Microbiology Reviews*. – 2023. – Vol. 47, № 3. – Art. ID fuad022. – DOI: 10.1093/femsre/fuad022.
83. Deyaert, S. Development of a reproducible small intestinal microbiota model and its integration into the SHIME®-system, a dynamic in vitro gut model / S. Deyaert, F. Moens, W. Pirovano [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. – 2023. – Vol. 13. – Art. ID 1079100. – DOI: 10.3389/fmicb.2022.1054061.

84. Du, Z. A comparative study on in vitro and in vivo stomach–small intestinal and large intestinal digestion of plant protein meals in growing pigs / Z. Du, L. Gao, Y. Wang [et al.] // *Journal of Animal Science*. – 2023. – Vol. 101. – Art. ID skad170. – DOI: 10.1093/jas/skad170.
85. Dufourny, S. Apple Pomace Modulates the Microbiota and Increases the Propionate Ratio in an In Vitro Piglet Gastrointestinal Model / S. Dufourny, S. Lebrun, C. Douny, B. Dubois [et al.] // *Fermentation*. – 2022. – Vol. 8, Iss. 8. – Art. 408. – DOI: 10.3390/fermentation8080408.
86. Dufourny, S. Baby-SPIME: A dynamic in vitro piglet model mimicking gut microbiota during the weaning process / S. Dufourny, N. Everaert, S. Lebrun [et al.] // *Journal of Microbiological Methods*. – 2019. – Vol. 167. – Art. 105735. – DOI: 10.1016/j.mimet.2019.105735
87. Durif, C. A new in vitro model of the adult pig colon microbiome: application to the study of feed ingredients / C. Durif, S. Denis, N. Lemoine [et al.] // *Animal Microbiome*. – 2025. – Vol. 7. – Art. ID 465. – DOI: 10.1186/s42523-025-00465-1.
88. Durif, C. A new in vitro model of the adult pig colon microbiome: application to the study of feed ingredients / C. Durif, S. Denis, N. Lemoine, S. Blanquet-Diot // *Animal Microbiome*. – 2025. – Vol. 7. – Art. 465. – DOI: 10.1186/s42523-025-00465-1
89. Hardacre, A. K. Predicting the viscosity of digesta from the physical characteristics of particle suspensions using existing rheological models / A. K. Hardacre, R. G. Lentle, S.-Y. Yap, J. A. Monro // *Journal of the Royal Society Interface*. – 2018. – Vol. 15, Iss. 143. – Art. 20180092. – DOI: 10.1098/rsif.2018.0092.
90. Hassan, F. Phytogenic Additives Can Modulate Rumen Microbiome to Mediate Fermentation Kinetics and Methanogenesis Through Exploiting Diet–Microbe Interaction / F. Hassan, M. A. Arshad, H. M. Ebeid [et al.] // *Frontiers in Veterinary Science*. – 2020. – Vol. 7. – Art. ID 575801. – DOI: 10.3389/fvets.2020.575801.

91. Jha, R. Dietary Fiber and Intestinal Health of Monogastric Animals / R. Jha, J. M. Foughse, U. P. Tiwari [et al.] // *Frontiers in Veterinary Science*. – 2019. – Vol. 6. – Art. ID 48. – DOI: 10.3389/fvets.2019.00048.

92. Kiani, A. K. Ethical considerations regarding animal experimentation / A. K. Kiani, D. Pheby, G. Henahan [et al.] // *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*. – 2022. – Vol. 63, № 2. – P. E255–E266. – DOI: 10.15167/2421-4248/jpmh2022.63.2s3.2768.

93. Kim, H. Y. Development and application of a multi-step porcine in vitro system to evaluate feedstuffs and feed additives for their efficacy in nutrient digestion, digesta characteristics, and intestinal immune responses / H. Y. Kim, J.-O. Moon, S. W. Kim // *Animal Nutrition*. – 2024. – Vol. 17. – P. 154–165. – DOI: 10.1016/j.aninu.2024.01.006

94. Koper, J. Intestinal simulators in the 3R context : presentation / J. Koper. – Lesaffre Institute of Science and Technology, 2023. – URL: <https://asso.adebiotech.org/wp-content/uploads/2023/06/1-Koper.pdf> (date of access: 09.03.2026).

95. Lynd, L. R. Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology / L. R. Lynd, P. J. Weimer, W. H. van Zyl, I. S. Pretorius // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 2002. – Vol. 66, № 3. – P. 506–577. – DOI: 10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002.

96. Popov, I. V. Modulation of Swine Gut Microbiota by Phytogetic Blends and High Concentrations of Casein in a Validated Swine Large Intestinal In Vitro Model / I. V. Popov, N. Einhardt Manzke, M. M. Sost [et al.] // *Veterinary Sciences*. – 2023. – Vol. 10, № 12. – Art. ID 677. – DOI: 10.3390/vetsci10120677.

97. Popov, I.V. A Review of the Effects and Production of Spore– Forming Probiotics for Poultry / I.V. Popov, A. Algburi, E.V. Prazdnova, M.S. Mazanko, V. Elisashvili, A.B. Bren, V.A. Chistyakov, E.V. Tkacheva, V.I. Trukhachev, I.M. Donnik / et al. *Animal*. – 2021. – Volume 11(7). – Article 1941. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11071941>

98. Schop, M. Increased diet viscosity by oat β -glucans decreases the passage rate of liquids in the stomach and affects digesta physicochemical properties

in growing pigs / M. Schop, A. J. M. Jansman, S. de Vries, W. J. J. Gerrits // *animal*. – 2019. – Vol. 13, Iss. 12. – P. 2786–2795. – DOI: 10.1017/S1751731119001824.

99. Shebeko, S. K. Application of Artificial Gastrointestinal Tract Models in Veterinary Medicine / S. K. Shebeko, H. Yu. Drobot, A. M. Koshchaev [et al.] // *Animals*. – 2025. – Vol. 15, № 9. – Art. ID 1222. – DOI: 10.3390/ani15091222.

100. Smith, J. Media preparation apparatus with magnetic drive ring : Pat. 10668439 B2 USA, МПК B01F 13/08 / J. Smith, R. Johnson ; applicant Sotax AG. – № 15/802,112 ; заявл. 02.11.2017 ; опубл. 02.06.2020.

101. Sorboni, S. G. A Comprehensive Review on the Role of the Gut Microbiome in Human Neurological Disorders / S. G. Sorboni, H. S. Moghaddam, R. Jafarzadeh-Esfehani, S. Soleimanpour // *Clinical Microbiology Reviews*. – 2022. – Vol. 35, № 1. – Art. ID e00338-20. – DOI: 10.1128/CMR.00338-20.

102. Sureshkumar, S. Exogenous Enzymes as Zootechnical Additives in Monogastric Animal Feed: A Review / S. Sureshkumar, J. Song, V. Sampath, I. Kim // *Agriculture*. – 2023. – Vol. 13, № 12. – Art. ID 2195. – DOI: 10.3390/agriculture13122195.

103. Takahashi, T. Viscous properties of pig cecal contents and the contribution of solid particles to viscosity / T. Takahashi, T. Sakata // *Nutrition*. – 2004. – Vol. 20, Iss. 4. – P. 377–382. – DOI: 10.1016/j.nut.2003.12.011.

104. Tanaka, T. Bioreactor with non-contact electromagnetic drive : Pat. S61212275 A Japan, МПК B01F 13/08 / T. Tanaka ; applicant Ajinomoto Co. – № 60-051234 ; заявл. 14.03.1985 ; опубл. 20.09.1986.

105. Terry, S. A. Evaluation of Rumen Fermentation and Microbial Adaptation to Three Red Seaweeds Using the Rumen Simulation Technique / S. A. Terry, A. M. Krüger, P. M. T. Lima [et al.] // *Animals*. – 2023. – Vol. 13, № 10. – Art. ID 1643. – DOI: 10.3390/ani13101643.

106. Uhl, V. W. The anchor agitator / V. W. Uhl, H. P. Voznick // *Chemical Engineering Progress*. – 1960. – Vol. 56, № 3. – P. 72–77.

107. Van de Wiele, T. The Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®) / T. Van de Wiele, P. Van den Abbeele, W. Ossieur [et al.] // *The Impact of Food Bioactives on Health : in vitro and ex vivo models* / eds. K.

Verhoeckx [et al.]. – Cham (CH) : Springer, 2015. – P. 305–317. – DOI: 10.1007/978-3-319-16104-4_27.

108. Wang, Q. Safety Evaluation of Neo Transgenic Pigs by Studying Changes in Gut Microbiota Using High-Throughput Sequencing Technology / Q. Wang, L. Qian, S. Jiang [et al.] // PLOS ONE. – 2016. – Vol. 11, № 2. – Art. ID e0150937. – DOI: 10.1371/journal.pone.0150937.

109. Wang, X. Development of an Alternative In Vitro Rumen Fermentation Prediction Model / X. Wang, J. Zhou, R. Jiang [et al.] // Animals. – 2024. – Vol. 14, № 2. – Art. ID 289. – DOI: 10.3390/ani14020289.

110. Wunderlich, G. Understanding the microbial fibre degrading communities & processes in the equine gut / G. Wunderlich, M. Bull, T. Ross [et al.] // Animal Microbiome. – 2023. – Vol. 5, № 1. – Art. ID 3. – DOI: 10.1186/s42523-022-00224-6.

111. Yang, H. An ancient deletion in the ABO gene affects the composition of the porcine microbiome by altering intestinal N-acetyl-galactosamine concentrations / H. Yang, J. Wu, X. Huang [et al.] // bioRxiv. – 2020. – DOI: 10.1101/2020.07.16.206219.

112. Zhu, Q. Probiotics or synbiotics addition to sows' diets alters colonic microbiome composition and metabolome profiles of offspring pigs / Q. Zhu, M. Song, M. A. K. Azad [et al.] // Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 13. – Art. ID 934890. – DOI: 10.3389/fmicb.2022.934890.

Приложение А. Акты внедрения, патенты

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора ФБНУ «Ростовский
научно-исследовательский институт
микробиологии и паразитологии»



Роспотребнадзора

А.Г. Суладзе

» января 2026 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Портновой Елены Александровны
«Разработка автоматизированной системы имитации пищеварительного
тракта свиньи»

Основные положения, выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертационной работе Портновой Е.А. «Разработка автоматизированной системы имитации пищеварительного тракта свиньи», внедрены в деятельность Федерального бюджетного научного учреждения «Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора.

Разработанная автором автоматизированная система имитации пищеварительного тракта свиньи и концепция ее применения в изучении сельскохозяйственных кормов, пробиотических добавок, их влияния на микробиоценоз, а также подходы к моделированию кишечной микробиоты свиней адаптированы для задач института и применяются при планировании и проведении лабораторных исследований, связанных с микробиоценозом кишечника. Использование разработанной лабораторной установки обеспечивает единый подход к проведению экспериментальных исследований *in vitro*, позволяет упорядочить оценку качества кормов и пробиотических добавок для животных, оценить их влияние на таксономический состав и

функциональную активность микробных сообществ и повысить сопоставимость получаемых данных.

Полученные в диссертации методические решения используются при разработке и оптимизации протоколов доклинических исследований пробиотических препаратов и кормов для животных, а также при интерпретации результатов исследований в области микробиологии и паразитологии. Это способствует более обоснованному выбору сбалансированного состава сельскохозяйственных кормов и пробиотических добавок для животных, режимов их применения и расширяет возможности института по научному сопровождению мероприятий, направленных на сохранение здоровья животных, повышение их продуктивности и снижение микробиологических рисков для человека.

Внедрение результатов исследований Портновой Е.А. в практику ФБНУ «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора свидетельствует об их высокой практической значимости и востребованности, а также способствует развитию современных экспериментальных подходов в области биотехнологии, ориентированных на оценку качества сельскохозяйственных кормов и их влияние на состояние кишечной микробиоты, здоровье и продуктивность животных.

Заведующий лабораторией
вирусологии, микробиологии и
молекулярно-биологических
методов исследования - г.н.с.,
д.б.н.



Чистяков В.А.

Аспирант



Портнова Е.А.

Научный руководитель,
проф. РАН, д-р техн. наук



Рудой Д.В.

УТВЕРЖДАЮ»

Директор АО «Батайское»

О.М. Аляева

18.04.2026 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Портновой Елены Александровны
Разработка автоматизированной системы имитации пищеварительного тракта
свиньи»

АО «Батайское» осуществляет деятельность в сфере свиноводства. Для обеспечения собственного свиноводческого комплекса предприятие располагает комбикормовым заводом, выпускающим корма для животных.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационного исследования Портновой Елены Александровны «Разработка автоматизированной системы имитации пищеварительного тракта свиньи», использованы в деятельности акционерного общества «Батайское» (АО «Батайское») при проведении работ по лабораторной оценке комбикормов и кормовых добавок, применяемых в кормлении свиней.

Использование указанных материалов позволяет проводить предварительное сопоставление исследуемых кормов и кормовых добавок по их поведению при моделировании отдельных стадий пищеварения, а также формировать дополнительные данные для рассмотрения при анализе и совершенствовании рационов свиней.

Результаты лабораторной оценки могут использоваться специалистами АО «Батайское» как дополнительная информация при рассмотрении кормового сырья и кормовых добавок. Полученные данные *in vitro* не рассматриваются как самостоятельная замена производственным испытаниям

на животных и применяются с учетом целей и условий конкретного исследования.

Акт подтверждает использование (апробацию) результатов диссертационного исследования в деятельности АО «Батайское».

Главный ветеринарный врач
АО «Батайское»



Беловолов Н.Н.

Аспирант



Портнова Е.А.

Научный руководитель,
проф. РАН, д-р техн. наук,
проф.



Рудой Д.В.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по учебной работе и
международной деятельности ДГТУ,
канд. техн. наук, доцент

А.В. Шилов



5 октября 2026 г.

Акт об использовании материалов диссертационной работы
в учебном процессе

Материалы диссертационной работы «Разработка автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи» аспиранта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» Портновой Елены Александровны используются в учебном процессе следующих подразделений:

– факультет «Агропромышленный»:

преподаваемые дисциплины:

«Технологии производства комбикормов», «Оборудование комбикормовых предприятий»; «Физико-механические свойства сырья» – для обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», профиль «Инжиниринг пищевых производств»; 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья», профиль «Технологические процессы и оборудование хранения и переработки зерна»;

«Реологические свойства сырья и готовой продукции» – для обучающихся по направлению магистратуры 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», программа «Процессы и аппараты пищевых производств»; 19.04.02 «Продукты питания из растительного сырья», программа «Ресурсосберегающие технологии хранения и переработки растительного сырья».

– Институт живых систем:

преподаваемые дисциплины:

«Внутренние незаразные болезни» – для обучающихся по специальности
36.05.01 «Ветеринария»;

«Введение в биотехнологию» – для обучающихся по направлению подготовки
бакалавриата 28.03.02 «Наноинженерия».

И.о. декана факультета
«Агропромышленный»,
канд. техн. наук



А.С. Бабаджанян

И.о. заведующего кафедрой «Техника
и технологии пищевых производств»,
к.с.-х. наук, доцент



В.В. Лодянов

И.о. директора Института живых систем



И.В. Дуренин

Заведующий кафедрой «Биотехнические
и медицинские системы и технологии»,
д-р фарм. наук, профессор



С.К. Шебеко

Заведующий кафедрой «Биология
и общая патология»,
д-р вет. наук, доцент



С.Н. Тресницкий

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ФГБНУ «ВНИВИПФиТ»
П.А. Паршин
«12» октября 2026 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Портновой Елены Александровны
«Разработка автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта
свиньи»

Основные положения, выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертационной работе Портновой Елены Александровны «Разработка автоматизированной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи», внедрены в практику работы Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский ветеринарный институт патологии, фармакологии и терапии» — ФГБНУ «ВНИВИПФиТ».

Разработанная автоматизированная система имитации желудочно-кишечного тракта свиней, а также методические подходы к ее применению используются при планировании и проведении лабораторных исследований, направленных на оценку качества сельскохозяйственных кормов, кормовых добавок, пробиотических препаратов и других средств, применяемых в свиноводстве.

Использование разработанной системы позволяет проводить контролируемые лабораторные исследования в условиях, приближенных к физиологическим параметрам пищеварительного тракта свиней, с автоматическим регулированием температуры, кислотности и режима перемешивания реакционной среды.

Применение автоматизированной системы обеспечивает воспроизводимость условий проведения опытов, снижает влияние оператора на результаты исследований, позволяет стандартизировать процедуру *in vitro*-оценки исследуемых кормов и препаратов, а также создает возможность одновременного контроля основных параметров реакционной среды в течение всего эксперимента.

Полученные в диссертационной работе решения используются при разработке и совершенствовании методик доклинических и лабораторных исследований кормов, пробиотических препаратов и лекарственных средств для сельскохозяйственных животных. Результаты могут применяться при изучении

влияния исследуемых объектов на микробиоценоз кишечника, процессы переваривания, показатели усвоения питательных веществ и состояние организма животных.

Внедрение разработанных методов в практику ФГБНУ «ВНИВИПФиТ» расширяет возможности института по проведению исследований в области ветеринарной патологии, фармакологии, кормления и биотехнологии, способствует повышению обоснованности оценки эффективности и безопасности кормовых и лекарственных препаратов, а также позволяет сократить необходимость проведения части предварительных исследований непосредственно на животных.

Таким образом, результаты диссертационной работы Портновой Е.А. имеют практическую значимость и могут использоваться в научно-исследовательской и лабораторной деятельности ФГБНУ «ВНИВИПФиТ» при проведении исследований, связанных с оценкой качества кормов, кормовых добавок, пробиотиков и лекарственных препаратов для свиней.

Заведующий отделом
экспериментальной фармакологии
и функционирования живых систем
ФГБНУ «ВНИВИПФиТ»,
кандидат ветеринарных наук, доцент

Аспирант ФГБОУ ВО ДГТУ

Научный руководитель,
проф. РАН, д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО ДГТУ



Михайлов Е.В.



Портнова Е.А.



Рудой Д.В.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025693481

**Программный комплекс управления кислотностью,
температурой и механическим переносом содержимого в
секциях искусственного желудочно-кишечного тракта
животных (на примере свиней)**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Донской
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Ханукаев Максим Михайлович (RU), Портнова Елена
Александровна (RU), Долгов Василий Валерьевич (RU)*



Заявка № 2025691945

Дата поступления 17 ноября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 ноября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026617349

**Программный модуль управления перемешивателем
лабораторным магнитным лопастным**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *Ханукаев Максим Михайлович (RU), Портнова
Елена Александровна (RU), Долгов Василий Валерьевич
(RU)*



Заявка № 2026616334

Дата поступления 05 марта 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 марта 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

**Приложение Б. Дипломы и сертификаты участия в конференциях,
выставках и форумах**



Научно-исследовательский центр «Иннова»

[Сертификат

За активное участие

*В II Международной научно-практической конференции:
«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ»
(Россия, город-курорт Анапа, 31 августа 2026 г.)*

**Портнова
Елена Александровна**

аспирант

*ФГБОУ ВО «Донской государственный технический
университет», город Ростов-на-Дону*

*Название статьи: «ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-
ЛОПАСТНОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ
СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА
СВИНЕЙ: ИНТЕГРАЦИЯ SPH-МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ЭКСПЕРИМЕНТА»*

Директор
ООО «НИЦ ЭСП» в ЮФО
(подразделение:
Научно-исследовательский
центр «Иннова»)



Е.Н. Скорикова

Анапа, 2026

Приложение В. Фрагмент программы

Свидетельство регистрации ЭВМ «Программный комплекс управления кислотностью, температурой и механическим переносом содержимого в секциях искусственного желудочно-кишечного тракта животных (на примере свиней)» № 2025693481

```
#include <Wire.h>
#include <EEPROM.h>
#include <iarduino_RTC.h>

iarduino_RTC watch(RTC_DS3231);

// ----- ПИНЫ -----
#define stepPin 2
#define dirPin 5
#define enPin 6
#define ledPin 13
#define btnPin 7
#define lsMinPin 8
#define lsMaxPin 9
#define buzzerPin 10

// ----- Константы -----
#define FW_VERSION "1.3.0"
#define MAGIC 0xA5
#define CFG_VERSION 1

// Параметры сглаживания потенциометра
#define POT_PIN A1
const uint8_t POT_SMOOTH_N = 8; // размер окна скользящего
среднего

// Ограничения профиля движения
const uint16_t DEFAULT_ACCEL_STEPS = 800; // шагов на
разгон/торможение
const uint16_t MIN_US_DELAY = 150; // физ. минимум
задержки между полуимпульсами

// ----- Конфигурация -----
struct Config {
    uint8_t magic; // MAGIC
    uint16_t stepLowDelayUs; // длит. LOW, мкс
    uint8_t reserved[6]; // резерв на будущее
    uint8_t checksum; // простая контрольная сумма
};

Config cfg;
```

```

// ----- Глобальные переменные -----
bool hasRunThisHour = false;           // чтобы не запускаться
многократно в одном часу
uint8_t potBuf[POT_SMOOTH_N] = {0};    // буфер сглаживания
потенциометра
uint8_t potIdx = 0;
bool lastBtnState = HIGH;
uint32_t lastDebounceMs = 0;
const uint16_t debounceDelay = 30;
bool btnLongPressArmed = false;
uint32_t btnPressStartMs = 0;

// ----- Прототипы -----
void printBanner();
void printHelp();
void printStatus();
uint8_t computeChecksum(const Config& c);
void loadConfig();
void saveConfig();
void setDefaultConfig();

void stepMotorBlocking(uint32_t steps, bool dirHigh, uint16_t
hiUs, uint16_t loUs);
void stepMotorWithProfile(uint32_t steps, bool dirHigh,
                          uint16_t startDelayUs, uint16_t
endDelayUs, uint16_t accelSteps);

void beep(uint16_t ms, uint8_t times=1);
bool isMinLimit();
bool isMaxLimit();
void enableDriver(bool enable);

void runDailyRoutine();
void manualRun();

uint8_t readHourFromPot();
bool readButtonPressed();
void processSerial();

// Калибровка к концевикам
bool calibrateToMin(uint32_t maxSteps = 100000UL);
bool calibrateToMax(uint32_t maxSteps = 100000UL);
void doCalibration();

void showTimeOncePerSecond();

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) { /* ждём при необходимости */ }

    Wire.begin();
    watch.begin(&Wire);

```

```

pinMode(stepPin, OUTPUT);
pinMode(dirPin, OUTPUT);
pinMode(enPin, OUTPUT);
pinMode(ledPin, OUTPUT);
pinMode(buzzerPin,
OUTPUT);

pinMode(btnPin, INPUT_PULLUP);
pinMode(lsMinPin, INPUT_PULLUP);
pinMode(lsMaxPin, INPUT_PULLUP);

enableDriver(true);

setDefaultConfig(); // на случай отсутствия
EEPROM loadConfig(); // попытка загрузки

printBanner();
printHelp();
printStatus();

beep(50, 2);
    }

void loop() {
    // Печать времени раз в секунду и индикация LED
    showTimeOncePerSecond();

    // Демонстрация текущего «предлагаемого» часа с потенциометра
    static uint32_t lastPotPrint = 0;
    if (millis() - lastPotPrint > 1000)
    { uint8_t potHour =
      readHourFromPot();
      Serial.print(F("[POT] hour="));
      Serial.println(potHour);
      lastPotPrint = millis();
    }

    // Разбор команд через Serial
    processSerial();

    // Кнопка: короткое нажатие -> RUN; долгое удержание ->
    записать час с POT и сохранить
    if (readButtonPressed()) {
        // Нажали: старт отсчета long-press
        btnPressStartMs = millis();
        btnLongPressArmed = true;
    } else {
        // Отпускание
        if (btnLongPressArmed) {
            uint32_t held = millis() - btnPressStartMs;
            btnLongPressArmed = false;
            if (held > 800) {

```

Приложение Г. Фрагмент программы

Свидетельство регистрации ЭВМ «Программный модуль управления
перемешивателем лабораторным магнитным лопастным» № 2026617349

```
// используемые библиотеки
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Servo.h>
#include <MX1508.h>
#include <EEPROM.h>
#include "ArduinoTask.h"
// ===== КОНСТАНТЫ =====
// пины шагового двигателя
const int STEP_PIN = 3;
const int DIR_PIN = 4;
// пины аналоговых входов
const int POT_1_PIN = A0;
const int POT_2_PIN = A1;
const int TEMP_SENSOR_PIN = A2;
// пины кнопок управления
const int BUTTON_START_PIN = 5;
const int BUTTON_STOP_PIN = 6;
const int BUTTON_SPEED_UP_PIN = 7;
const int BUTTON_SPEED_DOWN_PIN = 8;
// EEPROM адреса для сохранения параметров
const int EEPROM_MOTOR_TYPE = 0;
const int EEPROM_MIX_MODE = 1;
const int EEPROM_BLDC_SPEED = 2;
const int EEPROM_DC_SPEED = 3;
// Параметры шагового двигателя
const int STEPPER_SHORT_CYCLE = 3000;
const int STEPPER_LONG_CYCLE = 30000;
const int STEPPER_BACK_FORTH_CYCLE = 1000;
const int STEPPER_PULSE_WIDTH = 500; // микросекунды
// Параметры BLDC
const int BLDC_MIN_SPEED = 30;
const int BLDC_MAX_SPEED = 180;
const int BLDC_DEFAULT_SPEED = 45;
// Параметры DC
const int DC_MIN_SPEED = 50;
const int DC_MAX_SPEED = 255;
const int DC_DEFAULT_SPEED = 65;
// Временные параметры
const int MIN_MIX_PAUSE = 1;
const int MAX_MIX_PAUSE = 15;
const int DISPLAY_UPDATE_INTERVAL = 500; // мс
// ===== ПЕРЕМЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ =====
int motor_type = 0; // тип двигателя (1-3)
int mix_mode = 0; // режим перемешивания (1-3)
int mix_pause = 5; // пауза между циклами (сек)
```

```

int pot_1 = 0;           // значение потенциометра 1
int pot_2 = 0;           // значение потенциометра 2
int current_temp = 0;    // текущая температура
int BLDC_speed = BLDC_DEFAULT_SPEED;
int DC_speed = DC_DEFAULT_SPEED;
// Флаги состояния
bool is_running = false;
bool display_needs_update = true;
bool error_occurred = false;
String error_message = "";
// Счетчики для логирования
unsigned long cycle_count = 0;
unsigned long total_runtime_ms = 0;
unsigned long last_display_update = 0;
unsigned long cycle_start_time = 0;
// ===== ОБЪЕКТЫ =====
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
Servo BLDC;
MX1508 DC_motor(10, 11);
// ===== СТРУКТУРА ДЛЯ ЛОГИРОВАНИЯ =====
struct OperationLog
{
    unsigned long timestamp;
    int motor_type;
    int mix_mode;
    int duration_ms;
    int cycles_completed;
};
// ===== ФУНКЦИИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ =====
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    delay(100);
    initializePins();
    initializeLCD();
    initializeMotors();
    Serial.println("\n=== МАГНИТНЫЙ МИКСЕР - ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ
===");
    Serial.println("Версия 2.0");
    Serial.println("=====\n");
    selectMotorType();
    selectMixMode();
    loadSettingsFromEEPROM();
    Serial.println("\n=== ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ЗАВЕРШЕНА ===\n");
    delay(1500);
    lcd.clear();
}
void initializePins()
{
    pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
    pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
    pinMode(BUTTON_START_PIN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_STOP_PIN, INPUT_PULLUP);
}

```

```

    pinMode(BUTTON_SPEED_UP_PIN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUTTON_SPEED_DOWN_PIN, INPUT_PULLUP);
    digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
}
void initializeLCD()
{
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("      SEC MI");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("  MAGNET MIXER");
    delay(1000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("mot.type mix.mode");
}
void initializeMotors()
{
    BLDC.attach(9);
    BLDC.write(0);
    DC_motor.stopMotor();
    Serial.println("Двигатели инициализированы");
}
// ===== ФУНКЦИИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ =====
void selectMotorType()
{
    MenuTask menu;
    menu.addMenuItem(0, 0, "Выберите тип двигателя:");
    menu.addMenuItem(0, 1, "1 - шаговый двигатель (STEPPER)");
    menu.addMenuItem(0, 2, "2 - бесколлекторный двигатель
(BLDC)");
    menu.addMenuItem(0, 3, "3 - коллекторный двигатель (DC)");
    motor_type = runTask(&menu);
    Serial.println(motor_type);
    saveToEEPROM(EEPROM_MOTOR_TYPE, motor_type);
    displayMotorType();
}
void selectMixMode()
{
    MenuTask menu;
    menu.addMenuItem(0, 0, "Выберите режим перемешивания:");
    menu.addMenuItem(0, 1, "1 - импульсный с коротким циклом (3
сек)");
    menu.addMenuItem(0, 2, "2 - импульсный с длинным циклом (30
сек)");
    menu.addMenuItem(0, 3, "3 - возвратно-вращательный");
    mix_mode = runTask(&menu);
    Serial.println(mix_mode);
    saveToEEPROM(EEPROM_MIX_MODE, mix_mode);
    displayMixMode();
}

```

Приложение Д. Параметры модели гидродинамики перемешивания

№	Блок настроек / Вкладка	Параметр решателя	Зафиксированное значение	Физико-численное обоснование
1.	Решатель	Тип решателя	Неявный несжимаемый метод сглаженных частиц	Устраняет паразитные колебания плотности
2.	Свойства жидкости	Плотность ($\rho_{\text{смеси}}$)	1015,4 кг/м ³	Расчетная плотность суспензии Корма 2 при $C_{\text{доб}} = 200$ г/л
		Динамическая вязкость (μ)	38,0 мПа·с	Экспериментальное значение вязкости по вискозиметру
		Тип турбулентности	Ламинарное	Число Рейнольдса $Re \leq 1113,4$ — турбулентные модели не требуются
		Тип вязкости	Моррис	Формулировка вязкостных сил, оптимизированная для ламинарных и переходных сдвиговых течений
		Максимальная ожидаемая скорость	2,2 м/с	Превышает максимальную окружную скорость кончика лопасти на 25–40%
3.	Ядро сглаживания	Тип ядра	Вендланд (выбор осуществляется в выпадающем списке)	Исключает численное слипание частиц
		Размер элемента (d_{ini})	0,7 мм	Обеспечивает размещение $\geq 3 \dots 4$ элементов частиц в минимальных узких зазорах

		Множитель расстояния ядра	1,25	Оптимальный радиус сглаживания ядра
4.	Коррекция положения	Тип коррекции	Shift	Алгоритм диффузионного сдвига, устраняющий паразитные пустоты и комкование за лопастями
		Коэффициент сдвига	2,0	Оптимальная диффузия частиц внутри объема
		Предел свободной поверхности	2,5	Пороговый градиент концентрации, предотвращающий размытие свободной поверхности
5.	Численные схемы	Интегрирование вязких сил	Явное	Явная схема интегрирования вязкостных сил, обеспечивающая высокую скорость вычислений на GPU при заданном шаге по времени
		Множитель шага по времени	0,25	Множитель шага интегрирования по времени
		Минимальный фактор расстояния	0,01	Регуляризационный фактор, исключающий деление на ноль при сближении элементов
		Фильтр давления Шепарда	Включено	Сглаживает численный шум в поле гидродинамического давления