

УДК 636.4:631.46

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

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА СВИНЬИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОРМОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ**

Портнова Елена Александровна  
аспирант кафедры «Проектирование и технический сервис транспортно-технологических систем»

ORCID: 0009-0008-2990-1714

[e.a.portnova@yandex.ru](mailto:e.a.portnova@yandex.ru)

*ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия*

Статья посвящена разработке и апробации автоматизированной модульной системы имитации желудочно-кишечного тракта свиньи для изучения кормов и кормовых добавок в агропромышленном комплексе. Разработан прототип с фрагментацией отделов ЖКТ (желудок, тонкий и толстый кишечник), системой автоматического управления температурой (38–39,5 °С) и pH (2,0–8,0), осуществлением перемешивания магнитными мешалками и инновационной системой дозирования агентов на базе медицинских помп долгосрочной инфузии. Эксперименты подтвердили стабильность температуры и pH при динамических нагрузках. Предложенное решение повышает воспроизводимость результатов по сравнению со статическими моделями, соответствует биоэтическим принципам 3R и ГОСТам оценки кормов (Р 56912-2016 и др.), перспективно для оценки кормов и кормовых добавок, а также для доклинических испытаний ветеринарных препаратов

Ключевые слова: ИСКУССТВЕННЫЙ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНЫЙ ТРАКТ, IN VITRO МОДЕЛЬ, АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА, ПИЩЕВАРЕНИЕ, ОЦЕНКА КОРМОВ, СВИНОВОДСТВО

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-035>

**Введение.** С 2014 года, на фоне западных санкций, продовольственная безопасность выделилась в число ключевых приоритетов государственной политики России, что выявило слабость отечественного производства в основных продовольственных сегментах.

<http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/35.pdf>

UDC 636.4:631.46

4.3.1 Technologies, machines, and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED MODULAR SYSTEM SIMULATING THE SWINE GASTROINTESTINAL TRACT FOR FEED EVALUATION IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

Portnova Elena Alexandrovna  
graduate student at the Department of "Design and Technical Service of Transport and Technological Systems"

ORCID: 0009-0008-2990-1714

[e.a.portnova@yandex.ru](mailto:e.a.portnova@yandex.ru)

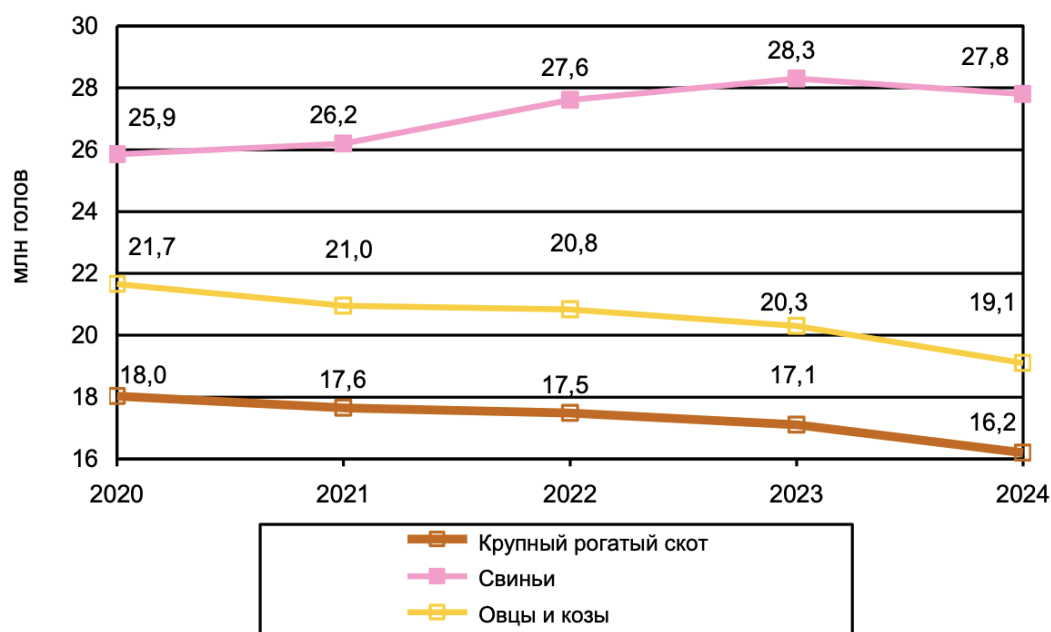
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University", Rostov-on-Don, Russia*

The article is devoted to the development and testing of an automated modular system simulating the swine gastrointestinal tract for studying feeds and feed additives in the agro-industrial complex. A prototype has been developed with fragmentation of the gastrointestinal tract sections (stomach, small and large intestine), an automatic temperature control system (38–39.5 °C) and pH (2.0–8.0), magnetic stirring, and an innovative agent dosing system based on long-term infusion medical pumps. Experiments confirmed the stability of temperature and pH under dynamic loads. The proposed solution improves the reproducibility of results compared to static models, complies with the 3R bioethical principles and GOST standards for feed evaluation (GOST R 56912-2016 and others), and is promising for evaluating feeds and feed additives, as well as for preclinical testing of veterinary drugs

Keywords: ARTIFICIAL GASTROINTESTINAL TRACT, IN VITRO MODEL, AUTOMATED SYSTEM, DIGESTION, FEED EVALUATION, PIG FARMING

Это подтолкнуло активное развитие стратегических продуктовых подотраслей и направлений пищевой промышленности, критически важных для укрепления продовольственной независимости [1].

За последнее десятилетие свиноводство показало впечатляющий прогресс: Россия полностью покрывает внутренний спрос на свинину с избытком и активно наращивает экспортные возможности в этой сфере [2]. В 2024 году поголовье свиней приблизилось к 27,8 млн голов, а производство достигло 4,9 млн тонн в убойном весе. Такие результаты стали возможны благодаря созданию мощных вертикально интегрированных агрохолдингов, которые с помощью государственных субсидий и инвестиций возвели передовые комплексы полного технологического цикла [3].



Источник: Росстат

Рисунок 1. Поголовье скота (на конец года; в хозяйствах всех категорий; миллионов голов)

Кормление выступает ключевым фактором, определяющим рост, развитие и продуктивность свиней, их способность адаптироваться к

внешним условиям, а также конечное качество туш и химический состав мышечных тканей. В современных условиях, как в частном хозяйстве, так и в промышленном свиноводстве, при откорме активно применяют разнообразные стимуляторы роста: ферменты, кормовые антибиотики, гормоны, антимикробные средства и прочие биологически активные добавки. С конца XX века особое внимание уделяется сокращению использования в животноводстве антибиотиков, поскольку обостряется проблема из-за риска формирования антибиотикорезистентных штаммов у животных, которые могут представлять опасность для человека. Корректируя рацион и режим кормления, удается существенно модифицировать качество мяса свиней [4].

Оценка кормов в Российской Федерации проводится в соответствии с национальными стандартами. Требования к качеству зеленых и пастбищных кормов предъявляются по ГОСТ Р 56912-2016 и ГОСТ Р 57482-2017, сена и сенажа — ГОСТ Р 55452-2013, силоса и силажа — ГОСТ Р 55986-2014, зерносенажа и зерносилажа — по ГОСТ Р 58145-2018, травяных, искусственно высушенных кормов, — ГОСТ Р 56383-2015. Основу исследований составляют анализы по органолептическим и физико-химическим показателям. Переваримость сухого вещества кормов устанавливается методом *in vitro* или *in situ*, а органического вещества — расчетным способом, то есть по содержанию нейтрально-детергентной клетчатки [5].

Несмотря на разработанную систему стандартов и применяемые лабораторные методы, существующие подходы к оценке кормов остаются трудоёмкими, затратными, требуют большого количества биологического материала и живых тест-систем. В этом контексте использование моделей искусственного желудочно-кишечного тракта (иЖКТ) рассматривается как перспективное направление, однако такие модели пока не стандартизированы и в основном применяются в рамках отдельных

экспериментальных исследований, что ограничивает их широкое внедрение в практику оценки кормов. Модели ЖКТ позволяют воспроизводить процессы переваривания в контролируемых условиях, получать данные о питательной ценности и биодоступности компонентов рациона и прогнозировать эффективность кормления без проведения длительных и трудоёмких испытаний на животных, что потенциально способствует снижению затрат и оптимизации кормовых составов [6].

Таким образом, при всей значимости проводимых исследований, современная система оценки кормов в свиноводстве характеризуется низкой скоростью получения данных, высокой себестоимостью анализов и ограниченной воспроизводимостью результатов. Отсутствие стандартизированного, научно обоснованного подхода к моделированию пищеварительных процессов у свиней затрудняет сопоставимость данных при разработке кормовых рационов и снижает достоверность прогнозов кормовой эффективности. Это формирует актуальную научно-практическую задачу — разработку и валидацию модели искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи, предназначенной для комплексной оценки свойств кормов и кормовых добавок в животноводстве.

**Методология разработки конструкции и постановки исследования.** К разрабатываемой системе предъявляются ключевые требования: биофизиологическая адекватность (имитация параметров ЖКТ свиньи — температуры, рН, ферментативной активности), контролируемость и воспроизводимость исследовательских условий, аналитическая информативность получаемых данных и модульность конструкции, отражающая анатомо-функциональное строение желудочно-кишечного тракта. Обеспечение этих принципов позволит создать научно обоснованный инструмент для оптимизации кормовых рационов и повышения эффективности свиноводческого производства.

Разработка лабораторных прототипов отдельных модулей и автоматизированной системы, имитирующих ЖКТ свиньи проводилась в соответствии со следующей методологической последовательностью:

1. Формулировка технического задания: на основе анализа патентно-технической литературы были сформулированы целевые показатели для разработки модели искусственного ЖКТ свиньи [7];

2. Выявление ключевой проблемы: существующие модели ЖКТ преимущественно статичны, ориентированы на человека и не воспроизводят динамику свиного пищеварения (перистальтику, микробиоту, трансмембранный транспорт). Это ограничивает точность оценки кормов и биодоступности добавок, требуя перехода от *in vivo* к динамическим *in vitro* системам [8].

3. Формулировка концепции: предложена модульная динамическая модель, имитирующая основные отделы ЖКТ свиньи, включающая воспроизведение перистальтики, ферментативных реакций, микробиоты, поддерживающая физиологичный температурный режим и необходимый уровень рН, а также обеспечивает этичность исследований по принципу 3R (replacement, reduction, refinement) [9].

4. Конструкторская реализация: разработка прототипа автоматизированной системы, имитирующей ЖКТ свиньи, была осуществлена с помощью инженерного подхода на основе результатов анализа и обобщения научных данных о конструкционных особенностях различных искусственных пищеварительных систем, применяемых в медико-биологических исследованиях [6, 10].

5. Качественная верификация: предварительную оценку работоспособности установки проводили в эксперименте по изучению сообществ кишечной микробиоты свиньи [11] с использованием универсальной искусственной кишечной среды, разработанной нашей исследовательской группой для применения в системах иЖКТ [12].

При сборке прототипа системы имитации ЖКТ свиньи были использованы следующие компоненты (табл. 1).

Таблица 1. – Перечень компонентов, использованных при сборке лабораторного прототипа системы имитации ЖКТ свиньи.

Компонент	Модель/номинал	Количество
Дисплей	OLED 1,3”	3
Потенциометр	10 кОм	6
Датчик рН	PH0-14	3
Основание системы креплений	200x300x10 мм	6
Профиль конструкционный с набором креплений	20x20x1000 мм	6
Колба реакционная	1 л	1
Колба реакционная	0,5 л	1
Колба реакционная	1,5 л	1
Мешалка магнитная	500-2500 об/мин	3
Термостат	W1209	3
Термистор	47 кОм	3
Помпа долгосрочной инфузии	Uniqueflow 200 мл	2
Помпа долгосрочной инфузии	Uniqueflow 100 мл	1
Термогильза	8x200 мм	3
Клапан электромагнитный	12 В	6
Микроконтроллер	Atmel Atmega 328P	3
Реле электромагнитное	12 В	6
Удлинитель линии инфузионной	1 м	3
Блок питания	12 В; 150 Вт	1
Лента термоизоляционная	40x5x1000	1
Нагреватель плёночный	12 В; 17 Вт	3

Компоненты системы монтировали на лабораторном стенде, выполненном на базе соединяемых блоков быстрого монтажа.

Часть необходимых конструкционных деталей получали путем 3D-моделирования в программе САПР Компас 3D [13] с последующей печатью на 3D-принтере Creality K1C из термопластичного полиуретана, ABS по технологии послойного наплавления [14].

Разработка управляющей программы для обеспечения автоматизации работы прототипа системы ЖКТ осуществлялась в среде Arduino IDE [15].

**Результаты и обсуждение.** Основной задачей устройств *in vitro*, моделирующих работу отделов ЖКТ животных или человека является

поддержание в системе температуры и уровня рН в некоторых пределах, адекватных для живого организма. Для свиньи диапазон колебаний температуры желудочно-кишечного тракта здорового животного составляет от 38,0 до 39,5 °С и практически не меняется от ротовой полости до прямой кишки. Диапазон изменения рН составляет от 2,0-3,0 в желудке животного до 7,0-8,0 в подвздошной кишке. Традиционная схема построения устройств *in vitro* строится на базе трёх независимых биореакторов, условно моделирующих желудок, тонкий кишечник и толстый кишечник и подразумевает ручной перенос реакционной среды. Такая концепция не удовлетворяет запросам современных исследований. Для получения более достоверных результатов необходимо повышать уровень физиологического соответствия путем большей фрагментации условных отделов желудочно-кишечного тракта. Например, рН отдела тонкого кишечника растёт по направлению к толстому кишечнику. И его целесообразно 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 можно 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). К тому же такая система должна обладать возможностью автоматического переноса содержимого между биореакторами.

Учитывая изложенное, был разработан прототип секции искусственного ЖКТ свиньи с возможностью модульного масштабирования и автоматическим транспортом реакционной среды. Схема разработанного устройства представлена на рисунке 2.

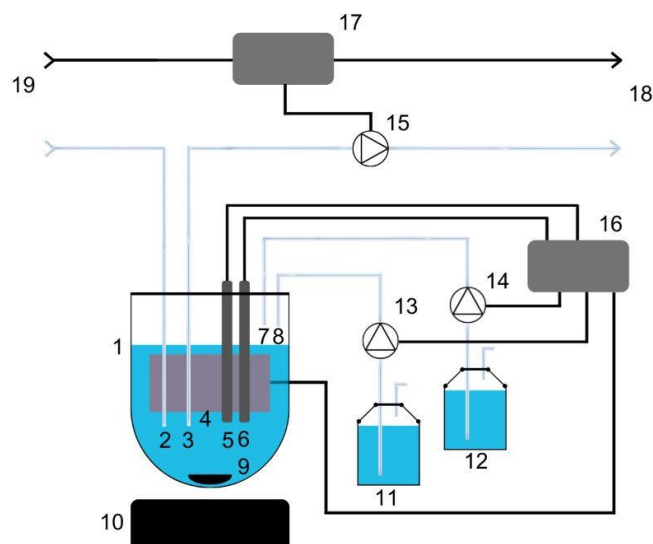


Рисунок 2. Схема модульной секции искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи.

Примечания: 1 – реакционная ёмкость; 2 – магистраль подачи содержимого от предыдущего отдела; 3 – магистраль подачи в следующий отдел; 4 – нагревательный элемент; 5 – датчик pH; 6 – датчик температуры; 7 – магистраль подачи щелочного агента; 8 – магистраль подачи кислотного агента; 9 – якорь магнитной мешалки; 10 – привод магнитной мешалки; 11 – ёмкость с кислотным агентом; 12 – ёмкость с щелочным агентом; 13 – помпа кислотного агента; 14 – помпа щелочного агента; 15 – помпа транспорта между секциями устройства; 16 – устройство автоматического управления параметрами секции; 17 – устройство автоматического управления транспортом между секциями; 18 – подключение к следующей секции; 19 – подключение к предыдущей секции.

Для удобства размещения компонентов системы, последующей модификаций и масштабирования, был разработан стенд на базе соединяемых блоков быстрого монтажа. Рама стенда выполнена из профиля конструкционного 20x20 мм с v-пазом. Эскиз поперечного сечения профиля представлен на рисунке 3.

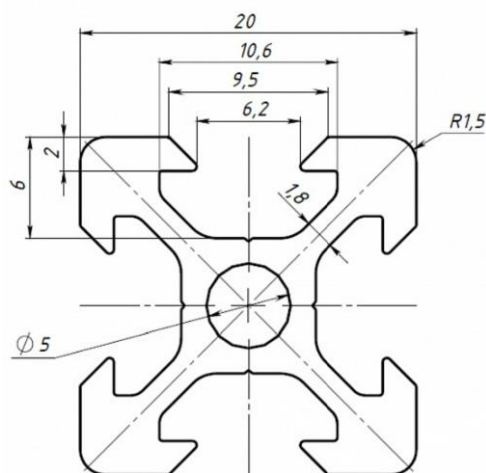


Рисунок 3. Поперечное сечение профиля конструкционного.

На рисунке 4 представлен внешний вид собранного стенда. Следует отметить, что благодаря выбранной конструкции размер стенда может быть легко адаптирован согласно количеству секций, имитирующих ЖКТ свиньи.



Рисунок 4. внешний вид стенда установки (А – рама из конструкционного профиля Б – стенд в сборе).

В качестве ёмкости для реакционной среды использовалась колба из боросиликатного стекла со сферическим дном ёмкостью 1.5 л. Для закрепления колбы на стенде в САПР Компас 3D был смоделирован кронштейн (рисунок 5). Далее кронштейн был распечатан на 3D принтере по технологии послойного наплавления из пластика ABS.

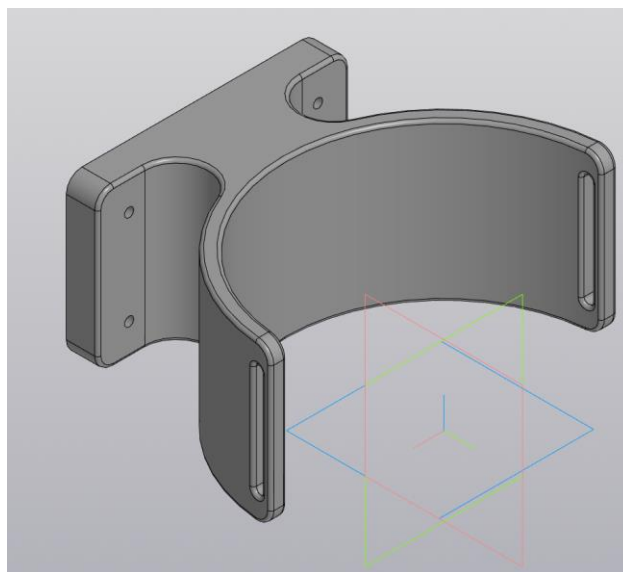


Рисунок 5. Модель кронштейна крепления колбы к стенке стенда.

Для нагрева реакционной среды использовался плёночный электронагреватель 190x35 мм мощностью 17 Вт, с номинальным напряжением 12 В. Нагреватель был смонтирован на поверхности кронштейна колбы через прослойку термоизоляционной ленты из вспененного полиуретана толщиной 5 мм, как показано на рисунке 6. Надёжный контакт колбы и нагревательного элемента, а также удержание колбы в кронштейне обеспечивается ремнём с фиксаторами типа Velcro.

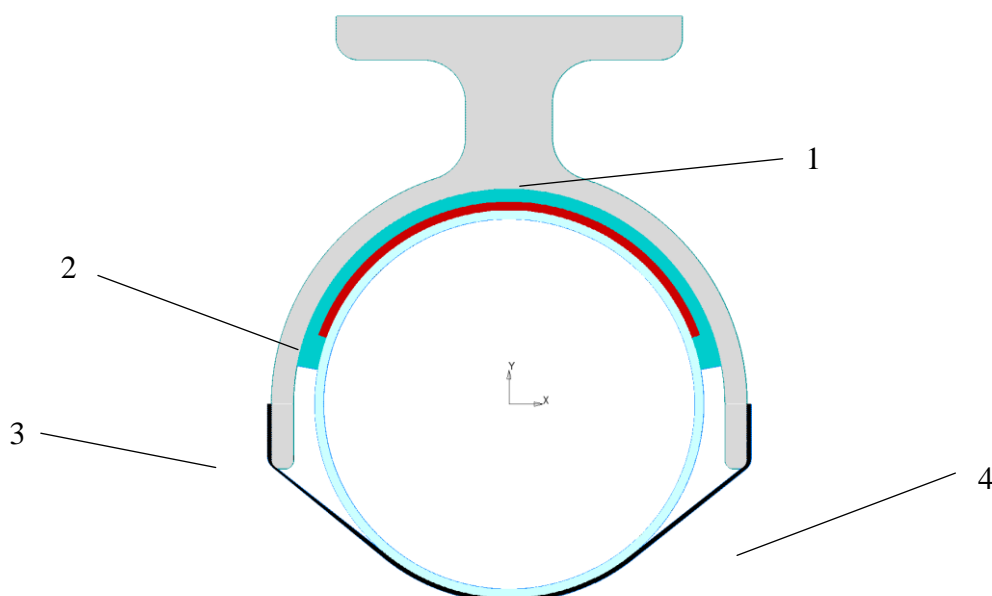


Рисунок 6. Схема монтажа нагревательного элемента.

Примечания: 1 – кронштейн колбы; 2 – нагревательный элемент; 3 – теплоизоляционный слой; 4 – колба; 5 – удерживающий ремень.

Для обеспечения герметичности реакционной среды и монтажа датчиков и штуцеров подключения была смоделирована крышка колбы с набором отверстий. Данная деталь была распечатана из термопластичного полиуретана. Этот материал обладает достаточной эластичностью для обтюрации элементов, помещенных в отверстия детали, а также имеет температуру эксплуатации до 150° С, что позволяет подвергать его температурной стерилизации. Модель крышки колбы представлена на рисунке 7.

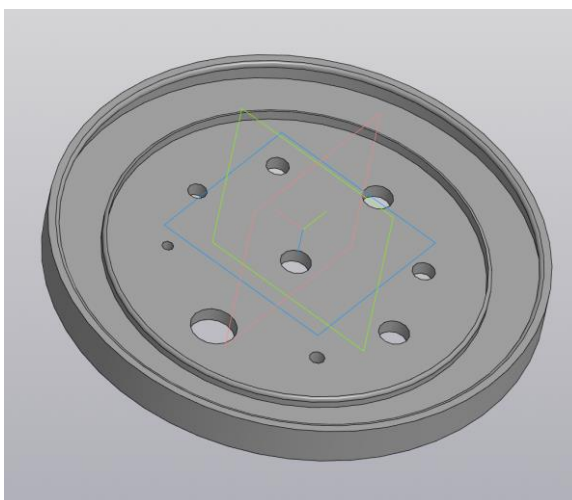


Рисунок 7. Модель крышки колбы для реакционной среды.

Для помещения датчика температуры в реакционную среду использовалась слепая трубка из нержавеющей стали марки ANSI 304. Для более корректного измерения температуры между трубкой и телом датчика была помещена термопроводящая паста КПТ-8, как показано на рисунке 8.

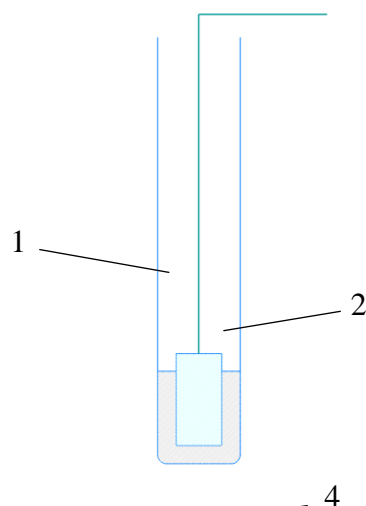


Рисунок 8. Датчик температуры.

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

Устройство автоматического управления параметрами биореактора было построено на базе микроконтроллера Atmega 328, который каждый цикл работы программы получает текущие значения от датчиков температуры и кислотности. В случае выхода этих значений за диапазон установленных порогов, система регулирует параметры путем включения нагревателя или перистальтической помпы, подкачивающей в резервуар кислотный или щелочной агент. Для обеспечения однородности параметров, содержимое резервуара постоянно перемешивается с помощью магнитной мешалки. Для удобства функционального объединения модульных секций, было разработано отдельное устройство автоматического управления транспортом содержимого. Функцией этого устройства является включение соответствующей помпы через необходимый промежуток времени. В качестве датчика рН был выбран сенсор потенциометрического типа Р4РМ, а в качестве датчика температуры – Dallas DS18B20. Благодаря модульной конструкции разработанное устройство позволяет легко изменять степень фрагментации модели искусственного желудочно-кишечного тракта путем последовательного подключения подобных секций, отличающихся

установочными параметрами. При этом моделируемые биологические процессы происходят изолированно от окружающей среды за счет отдельного устройства автоматического управления транспортом между секциями. Такой подход позволяет увеличить уровень соответствия реальному биологическому объекту.

Общий вид колбы биореактора, закреплённой на стенде представлен на рисунке 9.

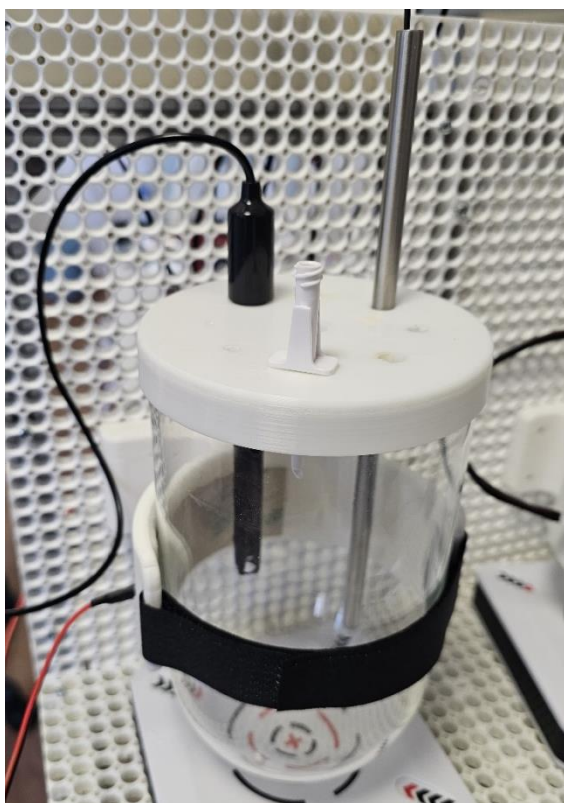


Рисунок 9. Колба биореактора на стенде.

В ходе испытаний в колбу биореактора была помещена дистиллированная вода, установлена целевая температура  $38^{\circ}\text{C}$ , перистальтические помпы не подключались, показания датчика рН выводились в виде графика. В качестве источника питания использовался блок с выходным напряжением 12 В и мощностью 100 Вт. Несмотря на многократный запас мощности, при включении нагревателя, на графике рН наблюдалось резкое падение показаний на 0,2-0,3 единицы и восстановление до первоначальных значений при отключении нагревателя.

Это связано с падением напряжения питающей сети и, как следствие, падением опорного напряжения датчика рН. Для обеспечения нормальной работы тракта измерения рН было принято решение не только использовать отдельное питание, но и организовать функцию поддержания заданной температуры на отдельном устройстве. В качестве такого устройства был выбран термостат W1209, который поддерживает нагреватели мощностью до 60 Вт и обеспечивает точность управления  $0,1^{\circ}$  С. Для удобства оператора устройство управления кислотностью дополнено жидкокристаллическим экраном с диагональю 1,3", на который выводится текущее значение рН, а также его верхний и нижний пределы, для управления которыми предусмотрены два потенциометра. Все компоненты системы управления были размещены в смоделированном и распечатанном на 3D-принтере корпусе (рисунок 10), который был закреплен на стенде.

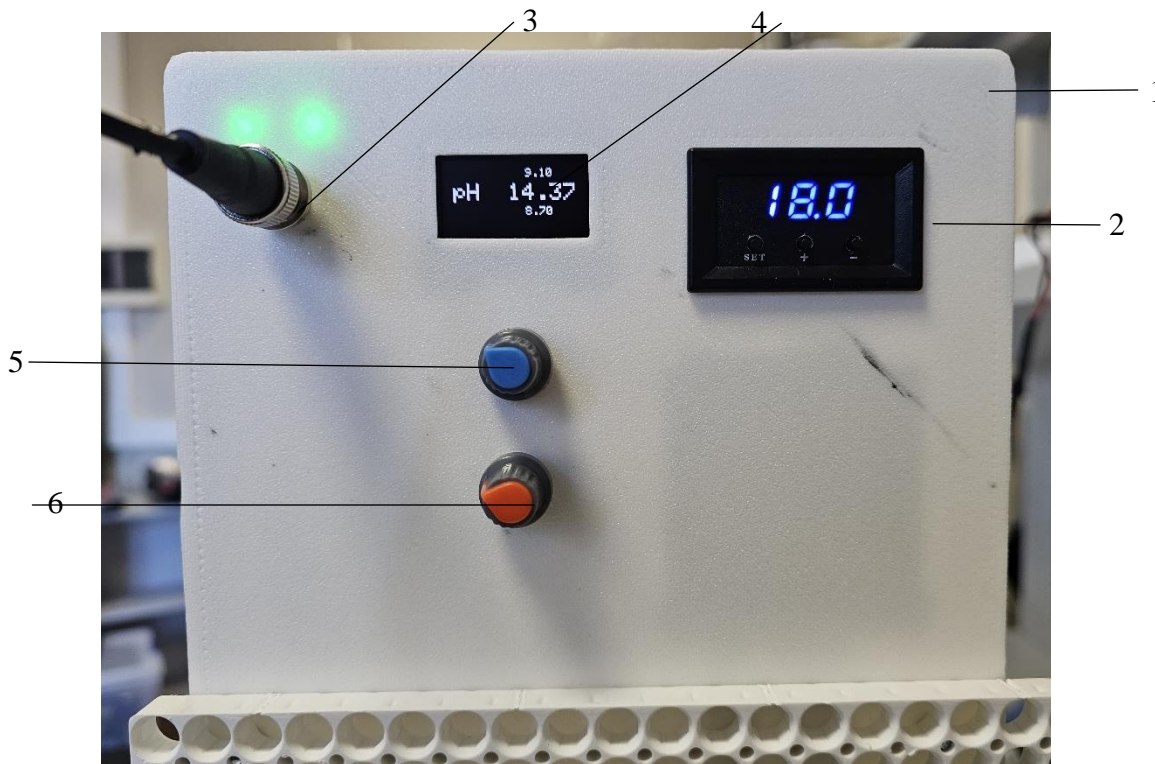


Рисунок 10. Система управления секцией биореактора.

Примечания: 1 – корпус; 2 – термостат с отображением текущей температуры; 3 – разъём подключения датчика рН; 4 – экран с отображением текущего значения и пределов рН; 5 – ручка управления верхним пределом рН; 6 – ручка управления нижним порогом рН.

Для подачи в реакционную среду кислотного и щелочного агентов с целью регулирования уровня рН применялись перистальтические помпы с приводом от двигателя постоянного тока. Как показали эксперименты, управлять такой помпой с необходимой точностью и повторяемостью дозировки агентов проблематично. Фактический объём добавленного вещества зависит от положения роликов помпы в начале и конце движения, напряжения питающей сети, времени, прошедшего после предыдущего включения, износа сегмента помпы и т. д. Эта особенность не только негативно влияет на статистические параметры экспериментов, но и может приводить к потере устойчивости системы управления и входу ее в режим автоколебаний. Возможно, повысить точность дозировки можно было заменой привода помпы на шаговый двигатель, однако это повлекло бы значительное усложнение системы и увеличение количества компонентов. В связи с этим было принято решение переработать систему подачи агентов и отказаться от перистальтических помп. Разработанная система устроена следующим образом: кислотный или щелочной агент помещается в резервуар с эластичной стенкой, которая, растягиваясь создаёт давление на жидкость. В разрыв магистрали, соединяющей этот резервуар с колбой биореактора, устанавливается нормально закрытый электромагнитный клапан, управляемый микроконтроллером через реле. Таким образом, объём добавляемого агента регулируется временем, на которое микроконтроллер открывает клапан. В качестве эластичного резервуара была применена медицинская помпа долгосрочной инфузии (Рисунок 11). Такие устройства имеют эластичную часть с постоянным комплаенсом, поэтому формируют давление, а, следовательно, и поток

инфузии, не зависящие от степени заполнения помпы. На проводящей магистрали находится коннектор luer lock с обратным клапаном, который позволяет проводить дозаправку помпы буферным агентом в любое время, не прерывая её работу и не нарушая соединение с биореактором. К тому же, являясь медицинским изделием поставляется в стерильном виде, выполнена из материалов, соответствующих области применения в проекте и оснащена универсальными коннекторами luer lock, что позволяет её напрямую подключать к большинству элементов системы (иглы, магистрали, шприцы, тройники). Следует отметить, что при анализе литературных источников подобное решение не обнаружено.

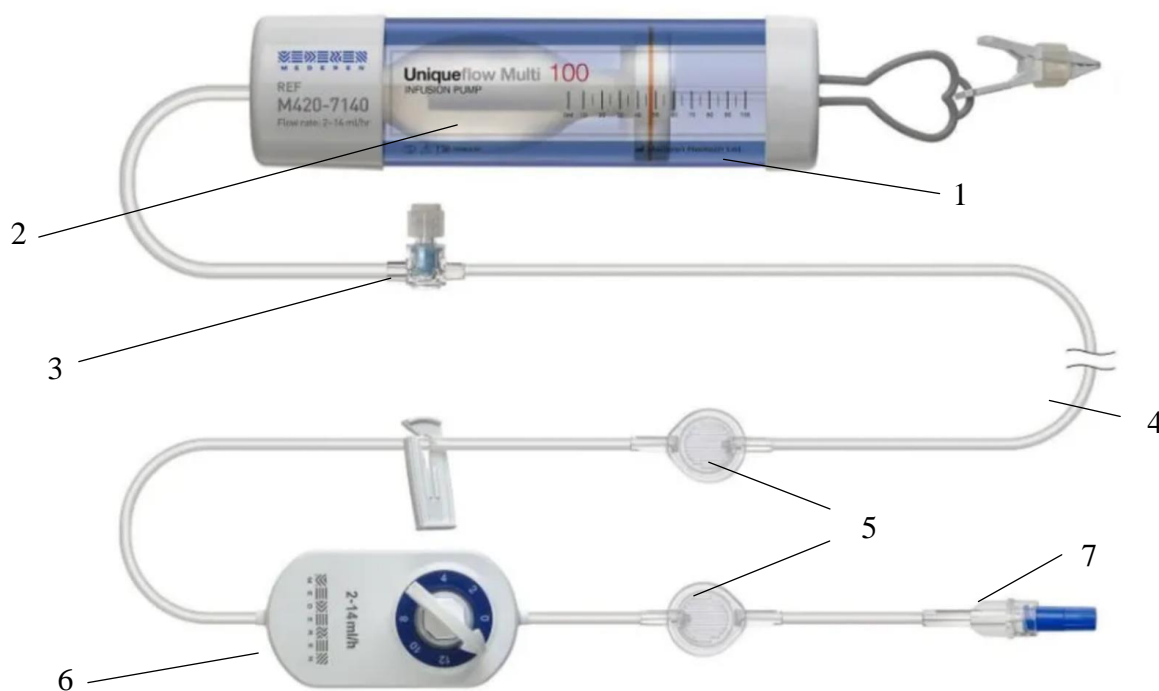


Рис. 11. Медицинская помпа долгосрочной инфузии

Примечания: 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.

Помпа долгосрочной инфузии электромагнитный клапан и корпус системы управления были закреплены на стенде. Проводящая магистраль подключена к биореактору, закреплённому в кронштейне над приводом магнитной мешалки. Общий вид собранной секции стенда представлен на рисунке 12. Для проведения апробации системы управления в колбу была залита дистиллированная вода, а в помпу заправлен щелочной агент в виде 1,0 М раствора NaOH.

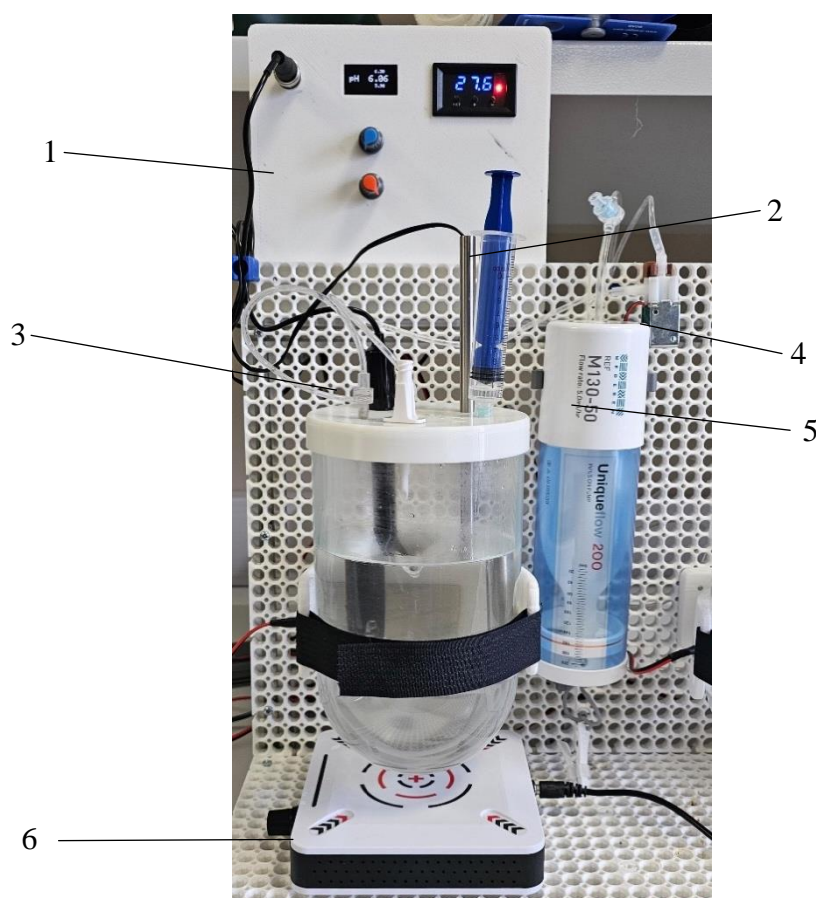


Рисунок 12. Общий вид секции стенда.

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

Далее, с помощью 1 М раствора HCl, добавляемого в колбу лабораторным дозатором, имитировалось подкисление среды микробиотой и наблюдалась реакция системы. При выходе текущего значения pH за нижний предел, микроконтроллер открывает электромагнитный клапан и закрывает его через заданный промежуток времени, изначально выставленный на 1 с. Этот интервал определяет объём агента, доставленный в биореактор системой управления за один цикл программы. От момента закрытия клапана до момента следующего цикла программы также проходит интервал 1 с. Этот интервал необходим для того, чтобы добавленный системой управления агент успевал размешаться магнитной мешалкой и привести к изменению pH реакционной среды. При первом испытании установки наблюдалось сильное перерегулирование. Для борьбы с ним время открытия клапана было уменьшено до 300 мс, а время между закрытием клапана и следующим циклом программы увеличено до 1,5 с. Нижний предел кислотности установлен на 5,9, введен кислотный агент для понижения pH ниже нижнего предела. Система управления отреагировала добавлением кислотного агента, уровень pH установился на значении 6,0 (Рисунок 13), что отличается от установленного значения на 0,1 и полностью удовлетворяет предъявленным требованиям.

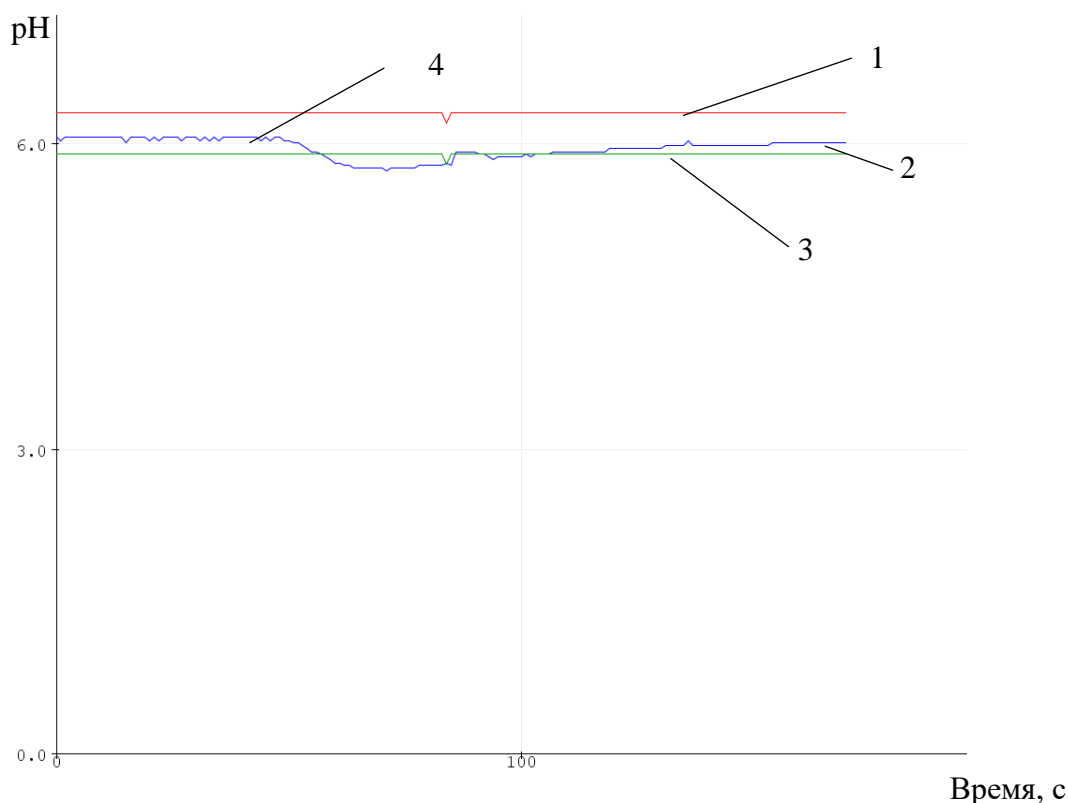


Рис. 13. Реакция системы управления на подкисление.

Примечания: 1 – верхний предел pH; 2 – кривая текущего значения pH; 3 – нижний предел pH; 4 - момент введения кислотного агента.

Для обеспечения вышеописанной автоматической работы системы управления биореактором была разработана управляющая программа микроконтроллера, зарегистрированная в ФИПС [16].

**Выводы.** Разработана автоматизированная модульная система имитации желудочно-кишечного тракта свиньи, обеспечивающая динамическое моделирование ключевых физиологических процессов пищеварения с точным контролем температуры (38–39,5 °С) и pH (от 2,0–3,0 в желудке до 7,0–8,0 в кишечнике). Система включает секции для отдельных отделов ЖКТ (желудок, двенадцатиперстная, толстая кишка), магнитные мешалки, термостаты, датчики pH и температуры, а также инновационную систему дозирования агентов на базе медицинских помп

долгосрочной инфузии с электромагнитными клапанами.

Критический анализ существующих подходов выявил их ключевые недостатки: статичность, отсутствие полной автоматизации транспорта среды, недостаточную фрагментацию отделов ЖКТ, а также низкую доступность на рынке коммерческих систем и расходных материалов к ним. Эти ограничения снижают биофизиологическую адекватность моделей, воспроизводимость полученных результатов и возможности их применения в отечественных условиях.

Таким образом, предложенная система преодолевает указанные ограничения и представляет собой перспективный прототип модульной установки для имитации пищеварительного тракта свиньи. В дальнейших исследованиях она станет основой комплексной искусственной пищеварительной системы, позволяющей моделировать физиологические процессы ЖКТ в зависимости от научных целей. Планируется ее масштабирование до 5 отделов, доработка, оптимизация и внедрение в научно-исследовательскую практику для изучения кормов и кормовых добавок для животных.

**Финансирование:** *Исследование проведено 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).*

### Литература:

1. Никитинская Ю.В., Бочкарева Т.Н. Развитие сельского хозяйства как основа механизма обеспечения продовольственной безопасности России в современных условиях // Современная экономика: проблемы и решения. 2024. Т. 12, № 12. С. 87–101. DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/12/87-101.
2. Головина А., Деркач Н., Зюкин Д. Развитие экспорта продуктов питания для обеспечения экономической безопасности // Экономика: проблемы и решения XXI века. 2020. № 11-12 (185). С. 75–85. EDN: OKMSXD.

3. Плаксин И.Е., Плаксин С.Ж., Трифанов А.В. Тенденции и перспективы развития свиноводства в России // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 1 (110). С. 155–165. DOI: 10.24412/2713-2641-2022-1-110-155-168. EDN: LMINSBE13.

4. Зубкова А.С. Влияние кормления на продуктивность свиней / А. С. Зубкова // *Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития* : сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 12 авг. 2021 г. / Петрозаводск : Межд. центр науч. партнерства «Новая наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2021. С. 63–67. EDN: GGWNKK.

5. Вильвер М.С. Оценка откормочных качеств и показателей роста молодняка свиней // *Актуальные проблемы ветеринарии и интенсивного животноводства* : сб. трудов междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 1–2 июня 2023 г. Т. 3. Брянск : Брян. гос. аграр. ун-т, 2023. С. 29–34.

6. Application of Artificial Gastrointestinal Tract Models in Veterinary Medicine / S.K. Shebeko, N.Y. Drobot, A.G. Koshchaev, S.D. Todorov, A.M. Ermakov // *Animals*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 1222. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15091222>.

7. Донской Д.Ю., Лукьянов А.Д., Филипович В., Астен Т.Б. Математическая модель системы управления рН в in vitro модели желудочно-кишечного тракта домашней птицы // *Advanced Engineering Research* (Ростов-на-Дону). 2023. Т. 23, № 1. С. 95–106. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-1-95-106.

8. Чанг Ч.-Ч., Крум Дж., Чуанг С.-Т., Чиоу П. В. С., Ю Б. Разработка динамической системы, имитирующей пищеварение в желудке свиньи // *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 2008. Vol. 21. P. 1522–1528. DOI: 10.5713/ajas.2008.70640.

9. Страте А.Б., Данфёр А., Хвалибог А. Динамическая модель пищеварения и абсорбции у свиней // *Animal Feed Science and Technology*. 2008. Vol. 143, iss. 1–4. P. 328–371. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2007.05.018.

10. Шебеко С. К., Тихменева Ю. А., Ермаков А. М. Искусственные пищеварительные системы в медико-биологических исследованиях: история, опыт и перспективы применения // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024. № 114. С. 283–301. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77734795> (дата обращения: 18.02.2026).

11. Тихменева Ю. А. Изучение сообществ кишечной микробиоты свиньи с использованием искусственной кишечной среды // *Ветеринария Северного Кавказа*, 2025. № 11. С. 387–396. DOI: 10.24412/cl-37120-2025-11-387-396. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-soobschestv-kishechnoy-mikrobioty-svini-s-ispolzovaniem-isskustvennoy-kishechnoy-sredy> (дата обращения: 16.02.2026).

12. Шебеко С. К., Тихменева Ю. А., Сандулян К. В., Ермаков А. М. Разработка унифицированной кишечной среды для микробиологических исследований в ветеринарной медицине // *Международный вестник ветеринарии*. 2024. № 4. С. 26–34. DOI: 10.52419/issn2072-2419.2024.4.26.

13. КОМПАС-3D. Обучающие материалы [Электронный ресурс] // ООО «АСКОН – Системы проектирования». 2024. URL: <https://kompas.ru/publications/docs/> (дата обращения: 18.02.2026).

14. Рэдвуд Б., Шофер Ф., Гаррет Б. 3D-печать. Практическое руководство. 3D HUBS, 2019. 220 с.

15. Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1 [Электронный ресурс] // Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/> (дата обращения: 20.01.2026).

16. Ханукаев М. М., Портнова Е. А., Долгов В. В. Программный комплекс управления кислотностью, температурой и механическим переносом содержимого в секциях искусственного желудочно-кишечного тракта животных (на примере свиней)

: программа для ЭВМ. Свид. о гос. рег. № 2025693481 Рос. Федерация; зарег. 28.11.2025 ; опубл. 28.11.2025, Бюл. № 12.

### References:

1. Nikitinskaya Yu.V., Bochkareva T.N. Razvitie sel'skogo khozyaystva kak osnova mekhanizma obespecheniya prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossii v sovremennykh usloviyakh // *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*. 2024. T. 12, № 12. S. 87–101. DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/12/87-101.

2. Golovina A., Derkach N., Zyukin D. Razvitie eksporta produktov pitaniya dlya obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti // *Ekonomika: problemy i resheniya XXI veka*. 2020. № 11-12 (185). S. 75–85. EDN: OKMSXD.

3. Plaksin I.Ye., Plaksin S.Zh., Trifanov A.V. Tendencii i perspektivy razvitiya svinovodstva v Rossii // *AgroEkoInzheneriya*. 2022. № 1 (110). S. 155–165. DOI: 10.24412/2713-2641-2022-1-110-155-168. EDN: LMINSBE13.

4. Zubkova A.S. Vliyanie kormleniya na produktivnost' svinoy / A.S. Zubkova // *Fundamental'naya i prikladnaya nauka: sostoyanie i tendencii razvitiya: sb. st. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Petrozavodsk, 12 avg. 2021 g. / Petrozavodsk: Mezhd. centr nauch. partnerstva «Novaya nauka» (IP Ivanovskaya Irina Igorevna), 2021. S. 63–67. EDN: GGWNKK.*

5. Vil'ver M.S. Ocenka otkormochnykh kachestv i pokazateley rosta molodnyaka svinoy // *Aktual'nye problemy veterinar ii i intensivnogo zhivotnovodstva: sb. trudov mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Bryansk, 1–2 iyunya 2023 g. T. 3. Bryansk: Bryan. gos. agrar. un-t, 2023. S. 29–34.*

6. Application of Artificial Gastrointestinal Tract Models in Veterinary Medicine / S.K. Shebeko, H.Y. Drobot, A.G. Koshchaev, S.D. Todorov, A.M. Ermakov // *Animals*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 1222. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15091222>.

7. Donskoy D.Yu., Luk'yanov A.D., Filippovich V., Asten T.B. Matematicheskaya model' sistemy upravleniya pH v in vitro modeli zheludочно-kishechnogo trakta domashney pticy // *Advanced Engineering Research (Rostov-na-Donu)*. 2023. T. 23, № 1. S. 95–106. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-1-95-106.

8. Chang Ch.-Ch., Krum Dz h., Chuang S.-T., Chiou P. V. S., Yu B. Razrabotka dinamicheskoy sistemy, imitiruyushchey pishchevarenie v zheludke svin'i // *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 2008. Vol. 21. P. 1522–1528. DOI: 10.5713/ajas.2008.70640.

9. Strate A.B., Danfer A., Khvalibog A. Dinamicheskaya Model' pishchevareniya i absorpcii u svinoy // *Animal Feed Science and Technology*. 2008. Vol. 143, iss. 1–4. P. 328–371. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2007.05.018.

10. Shebeko S.K., Tihmeneva Yu.A., Ermakov A.M. Iskusstvennye pishchevaritel'nye sistemy v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh: istoriya, opyt i perspektivy primeneniya // *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024. № 114. S. 283–301. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77734795> (data obrashcheniya: 18.02.2026).

11. Tihmeneva Yu.A. Izuchenie soobshchestv kishechnoy mikrobioty svini s ispol'zovaniem iskusstvennoy kishechnoy sredy // [Veterinariya Severnogo Kavkaza] <https://cyberleninka.ru/journal/n/veterinariya-severnogo-kavkaza>, 2025. № 11. S. 387–396. DOI: 10.24412/cl-37120-2025-11-387-396. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-soobshchestv-kishechnoy-mikrobioty-svini-s-ispolzovaniem-isskustvennoy-kishechnoy-sredy> (data obrashcheniya: 16.02.2026).

12. Shebeko S.K., Tihmeneva Yu.A., Sandulyan K.V., Ermakov A.M. Razrabotka unificirovannoy kishechnoy sredy dlya mikrobiologicheskikh issledovaniy v veterinarney

medicine // Mezhdunarodnyy vestnik veterinarii. 2024. № 4. S. 26–34. DOI: 10.52419/issn2072-2419.2024.4.26.

13. KOMPAS-3D. Obuchayushchie materialy [Elektronnyy resurs] // ООО «ASKON – Sistemy projektirovaniya». 2024. URL: <https://kompas.ru/publications/docs/> (data obrashcheniya: 18.02.2026).

14. Redvud B., Shofer F., Garret B. 3D-pechat'. Prakticheskoe rukovodstvo. 3D HUBS, 2019. 220 s.

15. Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1 [Elektronnyy resurs] // Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/> (data obrashcheniya: 20.01.2026).

16. Hanukaev M.M., Portnova E.A., Dolgov V.V. Programmnyy kompleks upravleniya kislotnost'yu, temperaturoy i mehanicheskim perenosom sodержimogo v sekciyah iskusstvennogo zheludochno-kishechnogo trakta zhivotnyh (na primere svinyey) : programma dlya EVM. Svid. o gos. reg. № 2025693481 Ros. Federaciya; zareg. 28.11.2025; opubl. 28.11.2025, Byul. № 12.