Научная статья
УДК 636.087:66.069
doi:10.35694/YARCX.2026.73.1.013

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ХИМУСА ДЛЯ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ЖКТ СВИНЬИ

Елена Александровна Портнова
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
e.a.portnova@yandex.ru, ORCID 0009-0008-2990-1714

Реферат. Системы имитации ЖКТ животных являются перспективным инструментом разработки, изучения и оценки качества сельскохозяйственных кормов. Опыт практического использования подобной системы в экспериментальных условиях показал необходимость разработки нового устройства для эффективного перемешивания химуса в реакционной ёмкости, способного работать с высоковязкой низкодисперсной средой и обеспечивать высокую степень физиологического подобия при сохранении герметичности биореактора. Разработка устройства проводилась с использованием комплексного инженерного подхода на основе 3D-моделирования в системе автоматизированного проектирования Компас-3D с последующей 3D-печатью. В результате проведённых исследований было разработано и апробировано новое устройство для перемешивания химуса в биореакторе установки искусственного ЖКТ свиньи с системой управления на базе микроконтроллера. Проведённая апробация убедительно продемонстрировала надлежащую работоспособность устройства при перемешивании вязкой неоднородной кишечной среды. Разработанное устройство позволяет осуществлять эффективное перемешивание химуса в установленном режиме, в том числе на малых скоростях, не нарушая герметичности реакционной ёмкости и по ряду параметров превосходя существующие аналоги.

Ключевые слова: *система имитации ЖКТ свиньи, устройство для перемешивания, магнитный лопастной перемешиватель, вязкие искусственные среды, исследования in vitro*

DEVELOPMENT OF A CHYME MIXING DEVICE FOR A PIG GASTROINTESTINAL TRACT SIMULATION SYSTEM

Elena A. Portnova
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
e.a.portnova@yandex.ru, ORCID 0009-0008-2990-1714

Abstract. Animal gastrointestinal simulation systems are a promising tool for development, study and quality evaluation of agricultural feeds. The experience of practical use of such a system under experimental conditions has shown the need to develop a new device for effective mixing of the chyme in the reaction vessel, capable of working with a highly viscous low-dispersed medium and providing a high degree of physiological similarity while maintaining the tightness of the bioreactor. The device was developed using an integrated engineering approach based on 3D modeling in the Kompas-3D computer-aided design system with subsequent 3D printing. As a result of the research, a new device was developed and tested for mixing chyme in the bioreactor of an artificial gastrointestinal tract of a pig with a microcontroller-based control system. The testing performed convincingly demonstrated the proper performance of the device when mixing a viscous heterogeneous intestinal condition. The developed device allows effective mixing of the chyme in the established mode, including at low speeds, without disturbing the tightness of the reaction vessel and surpassing existing analogues in a number of parameters.

Keywords: *pig gastrointestinal tract simulation system, mixing device, magnetic paddle stirrer, viscous artificial environment, in vitro studies*

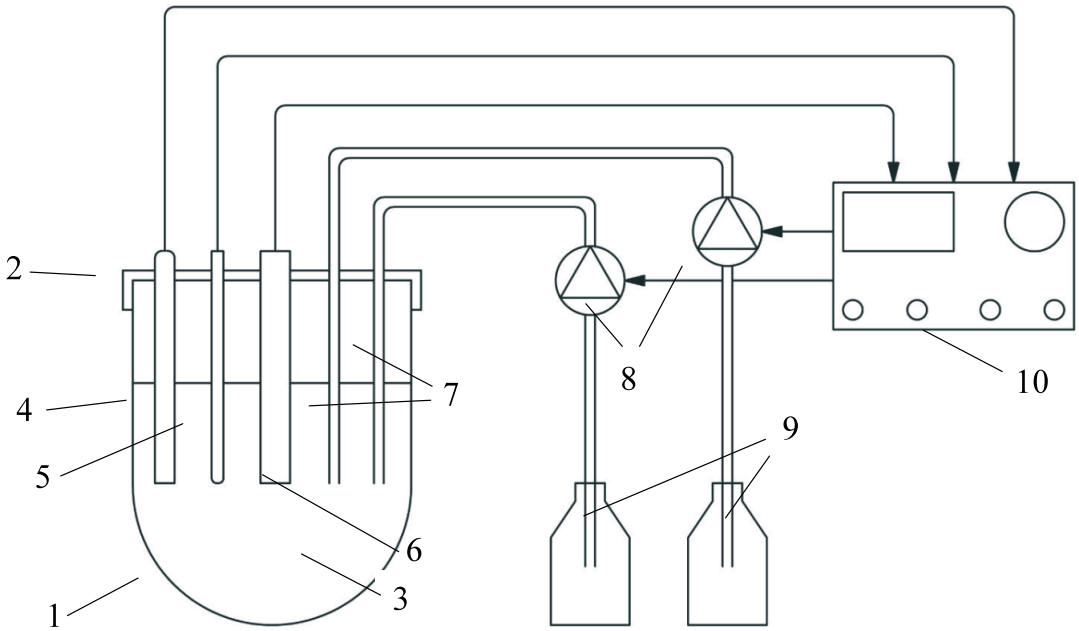
Финансирование: исследование проведено в рамках выполнения государственного задания «Молекулярные механизмы взаимодействия сообществ кишечных микроорганизмов in vivo и in vitro на базе автоматизированной системы имитации ЖКТ свиньи» (Рег. № 124111200008-4).

Введение. В настоящее время Российская Федерация находится в состоянии санкционного давления, что актуализирует задачи обеспечения технологического суверенитета и устойчивости национальной агропродовольственной системы [1]. В данных условиях повышение эффективности животноводства, в том числе за счёт оптимизации состава кормов, становится одним из приоритетных направлений продовольственной безопасности, так как напрямую влияет на себестоимость продукции, импортонезависимость и устойчивость мясного направления свиноводства [2]. Развитие экспериментальных и имитационных технологий в области кормопроизводства позволяет снижать зависимость от зарубежных технологий и реагентов, формировать собственную научно-техническую базу и ускорять внедрение результатов исследований в производственную практику [3]. Особое значение приобретает разработка лабораторных моделей пищеварительного тракта животных, позволяющих проводить высокоточные исследования кормов и кормовых добавок без увеличения объёмов дорогостоящих in vivo экспериментов [4].

Системы имитации пищеварительного тракта животных рассматриваются как перспективный инструмент в сельском хозяйстве для разработки новых рецептур кормов, оценки их питательной ценности, усвояемости и влияния на микробиоту кишечника. In vitro модели пищеварения свиней позволяют многократно снижать финансовые затраты и трудоёмкость исследований по сравнению с классическими in vivo испытаниями, ускорять этап предварительного отбора перспективных рецептур и уменьшать вариабельность результатов за счёт лучшего контроля экспериментальных условий. Использование таких моделей соответствует современной международной повестке по принципам 3R (replacement, reduction, refinement), позволяя сокращать количество подопытных животных, снижать этические риски и одновременно повышать воспроизводимость и безопасность исследований кормов и добавок [5].

Всё вышеизложенное обусловливает актуальность разработки системы имитации ЖКТ с целью внедрения в практику исследований кормов и кормовых добавок для животных. В связи с этим нами был разработан лабораторный прототип автоматизированной системы имитации ЖКТ свиньи, который был испытан в экспериментальных условиях [6; 7]. Разработанная модель показала надлежащую надёжность и работоспособность, но в ходе испытаний были выявлены недостатки системы перемешивания, реализованной с помощью лабораторной магнитной мешалки. Прежде всего, это проявлялось в недостаточном магнитном сцеплении якоря и ротора для работы со средами, характеризующимися низкой дисперсностью и высокой вязкостью.

В современном мире исследования в биомедицинской области требуют не только новой матери-



1 – реакционная ёмкость; 2 – крышка реакционной ёмкости; 3 – реакционная среда;
4 – датчик pH; 5 – датчик температуры; 6 – нагревательный элемент;
7 – магистрали подачи буферных растворов; 8 – перистальтические помпы буферных растворов;
9 – ёмкости с буферными растворами; 10 – блок автоматического управления параметрами секции и ЖКТ.

Рисунок 1 – Схема модульной секции искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи

ально-технической базы, но и новых технических решений. В связи с вышеизложенным научно-практический интерес представляет разработка альтернативного устройства перемешивания и оценка его работоспособности в системе имитации ЖКТ свиньи, что и явилось целью представленного исследования.

Цель работы – разработка устройства для эффективного перемешивания химуса в реакционной ёмкости системы имитации ЖКТ, способного обеспечить достаточный крутящий момент и высокую степень физиологического подобия при сохранении герметичности биореактора.

Материалы и методы исследований. Разработка и изучение устройства для перемешивания проводились на базе научно-образовательного центра «Медицинское приборостроение» ДГТУ с использованием лабораторного прототипа автоматизированной системы имитации ЖКТ [6; 7], разработанной научной группой в рамках выполнения государственного задания «Молекулярные механизмы взаимодействия сообществ кишечных микроорганизмов in vivo и in vitro на базе автоматизированной системы имитации ЖКТ свиньи» (Рег. № 124111200008-4). Для проведения исследований была использована одна секция установки, моделирующая тонкий кишечник свиньи, схема которой представлена на рисунке 1.

В ходе сравнительных испытаний различных устройств для перемешивания система заполнялась искусственной универсальной кишечной средой, ранее разработанной научной группой [8].

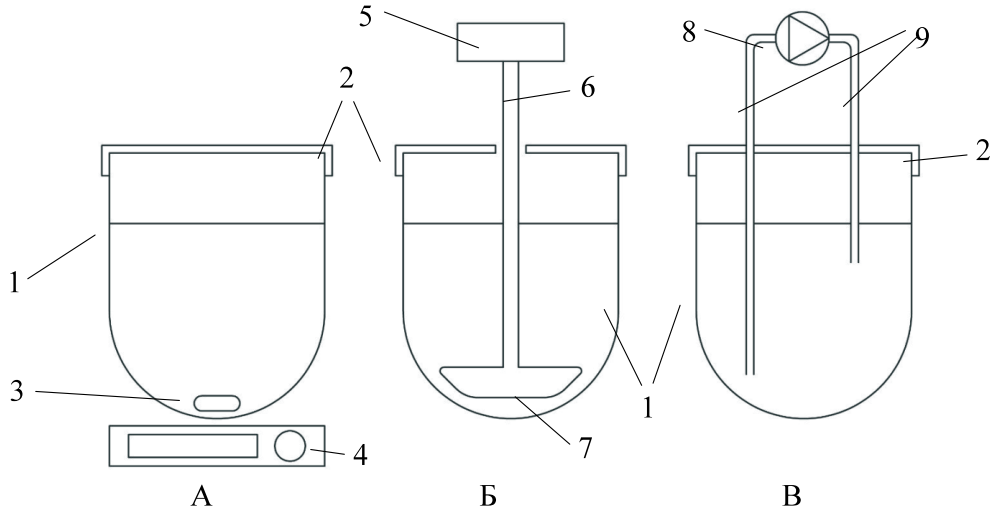
Основным объектом исследования является разработанный магнитный лопастной перемешиватель, состоящий из лопастного ротора, распорного кольца-направляющей, внешнего приводного кольца и неодимовых магнитов марки ЕН.

В качестве референтных объектов в системе имитации ЖКТ использовали существующие устройства перемешивания [9; 10], схемы которых представлены на рисунке 2.

Исследования и разработка устройства проводились с использованием комплексного инженерного подхода. Конструкционные детали получали путём 3D-моделирования в системе автоматизированного проектирования Компас-3D [11] с последующей печатью на 3D-принтере Creality K1C по технологии послойного наплавления из материала Ateco Creadur [12].

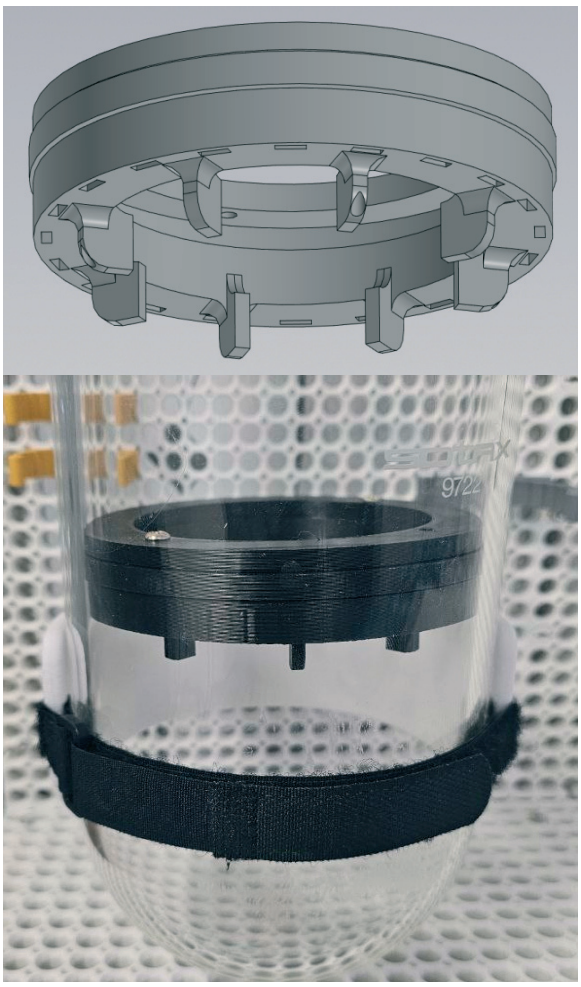
Разработка управляющей программы магнитного лопастного перемешивателя осуществлялась в среде Arduino IDE [13].

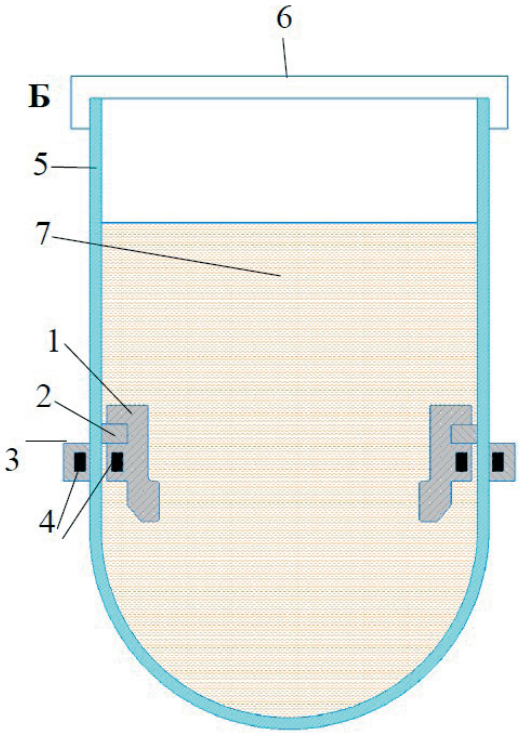
Результаты исследований. Как показала практика использования разработанной системы и ЖКТ, стандартные биотехнические методы перемешивания реакционной среды оказались неприменимы для низкодисперсных и высоковязких сред. Якорь магнитной мешалки терял сцепление с ротором и останавливался (рис. 2А). Верхнеприводная мешалка требовала дополнительного отверстия в крышке биореактора для вала ротора (рис. 2Б), что даже при использовании уплотнительных элементов не обеспечивает достаточную герметичность и надёжность. Способ перемешивания с помощью внешнего циркуляционного насоса (рис. 2В) показал себя вполне состоятельным, однако постоянная циркуляция среды хотя и приводит к эффективному перемешиванию, но не обес-



А – магнитная мешалка; Б – верхнеприводная мешалка; В – циркуляционный насос;
1 – реакционная ёмкость; 2 – крышка реакционной ёмкости; 3 – якорь магнитной мешалки;
4 – привод магнитной мешалки; 5 – двигатель верхнеприводной мешалки; 6 – вал; 7 – лопасти;
8 – циркуляционный насос; 9 – магистрали циркуляционного насоса.

Рисунок 2 – Существующие виды перемешивающих устройств в системах имитации ЖКТ





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 – Лопастной магнитный перемешиватель

печивает достаточную степень физиологического подобия процессам, протекающим в ЖКТ животных. К тому же применённый насос подвержен засорению при использовании в системе с низкодисперсной средой, а также не предназначен для высокотемпературной стерилизации, в связи с этим могут возникать сложности при подготовке к эксперименту.

Для решения проблемы перемешивания было разработано новое устройство – лопастной магнитный перемешиватель. Оно представляет собой кольцевую вставку в реакционную колбу, которая устанавливается в распор на необходимой глубине и является орбитальной направляющей для лопастного ротора. В роторе, в свою очередь, радиально закреплены неодимовые магниты марки EH 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 перемешиванием осуществляется на базе микроконтроллера, программа которого поддерживает работу трёх видов электродвигателей – шагового, бесколлекторного и коллекторного.

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 Ateco и магнитам марки EH, 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.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики перемешивающих устройств

Сравнительный параметр	Перемешиватель магнитный лопастной	Мешалка магнитная	Верхнеприводная мешалка	Насос циркуляционный
Возможность работы с вязкой средой	Да	Нет	Да	Да
Возможность работы с низкодисперсной средой	Да	Нет	Да	Нет
Возможность работы на низкой скорости (<100 об./мин.)	Да	Нет	Нет	Нет
Возможность реверса	Да	Нет	Нет	–
Обеспечение герметичности реакционной ёмкости	Да	Да	Нет	Да
Перемешивание с высокой степенью физиологического подобия	Да	Нет	Нет	Нет
Возможность температурной стерилизации	Да	Да	Да	Нет

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

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика разработанного и существующих видов перемешивающих устройств, применяемых в системах имитации ЖКТ. Анализ сравнительных параметров свидетельствует о преимуществах разработанного устройства по сравнению с референтными объектами. Как видно из таблицы 1, предложенное устройство позволяет работать с вязкими и низкодисперсными средами за счёт возможности передачи высокого крутящего момента на лопастной ротор, в том числе при частоте вращения ниже 100 об./мин. с возможностью реверса при сохранении герметичности биореактора. Кроме того, разработанная система управления на базе микроконтроллера может осуществлять низкочастотные возвратно-вращательные движения, что позволяет воспроизводить пищеварительные процессы животного с высокой степенью физиологического подобия.

В ходе предварительного тестирования устройство показало свою надёжность и пригодность для выполнения задачи по перемешиванию реакционной среды и имитации перистальтических движений ЖКТ.

Выводы. Проведённые исследования позволили разработать и апробировать новое устройство для перемешивания химуса в биореакторе установки искусственного ЖКТ свиньи с системой управления на базе микроконтроллера. Разработанное устройство позволяет осуществлять эффективное перемешивание химуса в установленном режиме, в том числе на малых скоростях, не нарушая герметичности реакционной ёмкости. Достоинствами устройства также являются высокая степень физиологического подобия и возможность температурной стерилизации.

Для обеспечения работы устройства в разных режимах перемешивания была разработана система управления на базе микроконтроллера, а также программное обеспечение [14].

Проведённая апробация убедительно продемонстрировала надлежащую работу устройства при перемешивании вязкой неоднородной кишечной среды и готовность к экспериментальным исследованиям по изучению сельскохозяйственных кормов.

Список источников

1. Иванов В. А. Аграрный сектор и продовольственная безопасность в условиях санкций // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2025. Т. 5, № 1. С. 13-24. DOI 10.34130/2070-4992-2025-5-1-13. EDN TZIOSQ.

2. Минаков И. А. Эффективность производства продукции животноводства // Наука и образование. 2023. Т. 6, № 3. ISSN 2658-5642. URL: https://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/6049/6094 (дата обращения: 17.03.2026).

3. Тихомиров А. И. Развитие животноводства: от продуктового импортозамещения к технологическому лидерству // Комбикорма. 2025. № 12. С. 16–18. DOI 10.69539/2413-287X-2025-12-1-254. EDN ALAKCU.

4. Shebeko S. K., Drobot H. Yu., Koshchaev A. G. [et al.] Application of Artificial Gastrointestinal Tract Models in Veterinary Medicine // *Animals.* 2025. Vol. *15, Is. 9.* DOI 10.3390/ani15091222.

5. Kim H. Y., Moon J.-O., Kim S. W. 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 // Animal Nutrition. 2024. Vol. 17. P. 265–282. DOI 10.1016/j.aninu.2024.01.006.

6. Ханукаев М. М., Шебеко С. К., Ярамышев М. Я. Разработка прототипа модульной секции искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи // Инновационные технологии в науке и образовании : сб. науч. тр. XII Международ. науч.-практ. конф., с. Дивноморское, 02–08 сентября 2024 года. Ростов-на-Дону : ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2024. С. 75–77. DOI 10.23947/itse.2024.75-77. EDN SNZCVL.

7. Ханукаев М. М., Портнова Е. А., Ярамышев М. Я., Мороз К. А. Оптимизация прототипа системы искусственного желудочно-кишечного тракта свиньи // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2025») : материалы XVII Международ. науч.-технич. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых, Пенза, 06–07 ноября 2025 года. Пенза : Пензенский государственный университет, 2025. С. 88–91. EDN FZZEML.

8. 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. EDN JKLCUQ.

9. Van de Wiele T., Van den Abbeele P., Ossieur W. [et al.] The Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®) // The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models / eds. K. Verhoeckx, P. Cotter, I. López-Expósito [et al.]. Cham (CH) : Springer, 2015. Chapter 27. DOI 10.1007/978-3-319-16104-4_27.

10. Minekus M. The TNO Gastro-Intestinal Model (TIM) // The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models / eds. K. Verhoeckx, P. Cotter, I. López-Expósito, C. Kleiveland [et al.]. Cham (CH) : Springer, 2015. DOI 10.1007/978-3-319-16104-4.

11. КОМПАС-3D. Обучающие материалы. ООО «АСКОН – Системы проектирования», 2024. URL: https://kompas.ru/publications/docs/ (дата обращения: 20.01.2026).

12. Рэдвуд Б., Шофер Ф., Гаррэт Б. 3D-печать. Практическое руководство / пер. с англ. М. А. Райтмана. М. : ДМК Пресс, 2020. 220 с. ISBN 978-5-97060-738-1.

13. Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1. URL: https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/ (date of access: 20.01.2026).

14. Программа для ЭВМ 2026617349. Программный модуль управления перемешивателем лабораторным магнитным лопастным / М. М. Ханукаев, Е. А. Портнова, В. В. Долгов ; правообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». № 2026616334; заявл. 05.03.2026 ; опубл. 16.03.2026, Бюл. № 3.

References

1. Ivanov V. A. Agrarnyj sektor i prodovol'stvennaya bezopasnost' v usloviyah sankcij // Korporativnoe upravlenie i innovacionnoe razvitie ekonomiki Severa: Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo centra korporativnogo prava, upravleniya i venchurnogo investirovaniya Syktyvkarskogo gosudarstvennogo universiteta. 2025. T. 5, № 1. S. 13-24. DOI 10.34130/2070-4992-2025-5-1-13. EDN TZIOSQ.

2. Minakov I. A. Effektivnost' proizvodstva produkcii zhivotnovodstva // Nauka i obrazovanie. 2023. T. 6, № 3. ISSN 2658-5642. URL: https://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/6049/6094 (data obrashcheniya: 17.03.2026).

3. Tikhomirov A. I. Razvitie zhivotnovodstva: ot produktovogo importozameshcheniya k tekhnologicheskomu liderstvu // Kombikorma. 2025. № 12. S. 16–18. DOI 10.69539/2413-287X-2025-12-1-254. EDN ALAKCU.

4. Shebeko S. K., Drobot H. Yu., Koshchaev A. G. [et al.] Application of Artificial Gastrointestinal Tract Models in Veterinary Medicine // *Animals*. 2025. Vol. *15, Is. 9.* DOI 10.3390/ani15091222.

5. Kim H. Y., Moon J.-O., Kim S. W. 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 // Animal Nutrition. 2024. Vol. 17. P. 265–282. DOI 10.1016/j.aninu.2024.01.006.

6. Khanukaev M. M., Shebeko S. K., Yaramyshev M. Ya. Razrabotka prototipa modul'noj sekcii iskusstvennogo zheludochno-kishechnogo trakta svin'i // Innovacionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii : sb. nauch. tr. XII Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf., s. Divnomorskoe, 02–08 sentyabrya 2024 goda. Rostov-na-Donu : OOO «DGTU-PRINT», 2024. S. 75–77. DOI 10.23947/itse.2024.75-77. EDN SNZCVL.

7. Khanukaev M. M., Portnova E. A., Yaramyshev M. Ya., Moroz K. A. Optimizaciya prototipa sistemy iskusstvennogo zheludochno-kishechnogo trakta svin'i // Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noj informacii («Shlyandinskie chteniya – 2025») : materialy XVII Mezhdunarod. nauch.-tekhnich. konf. s elementami nauchnoj shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skih rabot dlya obuchayushchihsya i molodyh uchenyh, Penza, 06–07 noyabrya 2025 goda. Penza : Penzenskij gosudarstvennyj universitet, 2025. S. 88–91. EDN FZZEML.

8. Shebeko S. K., Tikhmeneva Yu. A., Sandulyan K. V., Ermakov A. M. Razrabotka unificirovannoj kishechnoj sredy dlya mikrobiologicheskih issledovanij v veterinarnoj medicine // Mezhdunarodnyj vestnik veterinarii. 2024. № 4. S. 26–34. DOI 10.52419/issn2072-2419.2024.4.26. EDN JKLCUQ.

9. Van de Wiele T., Van den Abbeele P., Ossieur W. [et al.] The Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®) // The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models / eds. K. Verhoeckx, P. Cotter, I. López-Expósito [et al.]. Cham (CH) : Springer, 2015. Chapter 27. DOI 10.1007/978-3-319-16104-4_27.

10. Minekus M. The TNO Gastro-Intestinal Model (TIM) // The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models / eds. K. Verhoeckx, P. Cotter, I. López-Expósito, C. Kleiveland [et al.]. Cham (CH) : Springer, 2015. DOI 10.1007/978-3-319-16104-4.

11. KOMPAS-3D. Obuchayushchie materialy. OOO «ASKON – Sistemy proektirovaniya», 2024. URL: https://kompas.ru/publications/docs/ (data obrashcheniya: 20.01.2026).

12. Redvud B., Shofer F., Garret B. 3D-pechat'. Prakticheskoe rukovodstvo / per. s angl. M. A. Rajtmana. M. : DMK Press, 2020. 220 s. ISBN 978-5-97060-738-1.

13. Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1. URL: https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/ (date of access: 20.01.2026).

14. Programma dlya EVM 2026617349. Programmnyj modul' upravleniya peremeshivatelem laboratornym magnitnym lopastnym / M. M. Khanukaev, E. A. Portnova, V. V. Dolgov ; pravoobladatel' FGBOU VO «Donskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». № 2026616334; zayavl. 05.03.2026 ; opubl. 16.03.2026, Byul. № 3.

Сведения об авторе

Елена Александровна Портнова – аспирант кафедры техники и технологий пищевых производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», spin-код: 3077-9595.

Information about the author

Elena A. Portnova – postgraduate student of the Department of Department of Food Production Engineering and Technology, Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education Don State Technical University, spin-code: 3077-9595.