

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА/TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEXDOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18> EDN: PLVMQZ**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ БИОДОБАВОК В ПОТОК ПОЛУЖИДКОГО НАВОЗА**

Научная статья

Трифанов А.В.^{1,*}, Гордеев В.В.², Плаксин И.Е.³, Слиган М.Е.⁴, Сошнев Д.А.⁵¹ ORCID : 0000-0002-3503-6148;² ORCID : 0000-0001-6181-396X;³ ORCID : 0000-0002-3695-0820;⁴ ORCID : 0009-0002-8064-3809;⁵ ORCID : 0000-0001-7891-8397;^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (trifanovav[at]mail.ru)

Предложена: 28.05.2026; Принята: 09.07.2026; Опубликовано: 20.07.2026

Аннотация

Целью работы являлось обоснование конструктивных параметров и режимов работы устройства для внесения биодобавок в полужидкий навоз при транспортировке по трубопроводу поршневым насосом. Исследования выполнены аналитическими методами гидравлики и сопротивления материалов, а также 3D-моделированием в среде SolidWorks. В результате определены оптимальные параметры инжектора в виде двухопорного ножа каплевидного сечения: внутренний канал 5,2 мм, толщина стенки 5 мм (наружный диаметр 15 мм), длина хорды 65 мм. Двухопорное крепление снижает напряжение изгиба в 20 раз по сравнению с консольной схемой, загромождение сечения трубы составляет 6,4%. Обоснован режим дозирования — подача добавки в интервале 10–85% от длительности такта нагнетания, синхронизированная с сигналом датчика давления, что обеспечивает коэффициент вариации распределения $v < 10\%$.

Ключевые слова: сельское хозяйство, животноводство, навозоудаление, навоз, биодобавки, разработка устройства.

THEORETICAL SUBSTANTIATION FOR THE DESIGN PARAMETERS OF A DEVICE FOR INTRODUCING BIOLOGICAL SUPPLEMENTS INTO A SEMI-LIQUID MANURE FLOW

Research article

Trifanov A.V.^{1,*}, Gordeev V.V.², Plaksin I.Y.³, Sligan M.Y.⁴, Soshnev D.A.⁵¹ ORCID : 0000-0002-3503-6148;² ORCID : 0000-0001-6181-396X;³ ORCID : 0000-0002-3695-0820;⁴ ORCID : 0009-0002-8064-3809;⁵ ORCID : 0000-0001-7891-8397;^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (trifanovav[at]mail.ru)

Suggested: 28.05.2026; Accepted: 09.07.2026; Published: 20.07.2026

Abstract

The aim of the work was to determine the design parameters and operating conditions for a device used to introduce dietary supplements into semi-liquid manure during transport via a pipeline using a piston pump. The research was carried out using analytical methods from the fields of hydraulics and strength of materials, as well as 3D modelling in SolidWorks. As a result, the optimal parameters for the injector, designed as a two-support blade with a teardrop-shaped cross-section, were determined: an internal channel of 5,2 mm, a wall thickness of 5 mm (outer diameter 15 mm), and a chord length of 65 mm. The two-point support arrangement reduces bending stress by a factor of 20 compared with a cantilever configuration, with a pipe cross-section obstruction of 6,4%. The dosing regime has been optimised: the supplement is fed over a period of 10–85% of the injection cycle duration, synchronised with the pressure sensor signal, ensuring a coefficient of variation in distribution $v < 10\%$.

Keywords: agriculture, animal husbandry, manure removal, manure, bio-supplements, device development.

Введение

Применение биодобавок является эффективным способом снижения эмиссии аммиака и парниковых газов при хранении и утилизации навоза крупного рогатого скота [13], [14], [15]. Однако традиционное внесение биопрепаратов в уже сформированные объёмы (лагуны, бурты) не обеспечивает их равномерного распределения: для смешения 1–5 литров препарата на 100 м³ навозной массы требуются длительная работа миксеров и значительные энергозатраты, при этом сохраняется риск образования «мёртвых зон» и донных отложений [6], [8]. Скорость микробиологической

переработки навоза в значительной степени зависит от температуры субстрата. При температуре ниже 25 °С (психрофильный режим) процесс растягивается на месяцы, при 30–40 °С (мезофильный) идёт быстрее, но требует недель, а наиболее интенсивно — при 45–55 °С (термофильный), когда полная деструкция возможна за 10–15 суток [9], [10], [11]. Однако поддержание таких температур в открытых лагунах или буртах технически сложно.

Альтернативным решением является внесение биодобавок в напорный трубопровод при транспортировке полужидкого навоза от животноводческого помещения до места хранения. Поток в трубе обеспечивает распределение препарата по всему объёму транспортируемой массы, а санитарный разрыв между коровником и навозохранилищем (не менее 60 м, сноска 1) создаёт достаточную длину для диффузии добавки [1], [2]. Однако отсутствуют научно обоснованные конструктивные параметры устройств для введения биодобавок в трубопровод с учётом реологии полужидкого навоза (влажность 88–92%, вязкость 5–10 Па·с) и импульсного характера потока, создаваемого поршневым насосом.

Научная новизна. Впервые теоретически обоснованы форма, геометрические размеры и режим работы инжектора для внесения биодобавок в трубопровод полужидкого навоза КРС на основе анализа гидравлических, прочностных и реологических закономерностей. Определены условия синхронизации дозирования с фазой нагнетания поршневого насоса, обеспечивающие коэффициент вариации распределения добавки $v < 10\%$.

Цель и задачи исследования. Цель работы — обоснование конструктивных параметров и режимов работы устройства для внесения биодобавок в полужидкий навоз при транспортировке по трубопроводу поршневым насосом. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- определить оптимальное место внесения биодобавки относительно поршневого насоса;
- разработать форму и рассчитать геометрические параметры инжектора (диаметр канала, толщину стенки, хорду);
- оценить прочность и гидравлическое сопротивление предложенной конструкции;
- обосновать режим синхронизации дозатора с тактами нагнетания поршневого насоса.

Статус работы. Представленные в статье результаты являются расчётно-теоретическим подготовительным этапом в рамках выполнения государственного задания № FGUN-2025-0010 «Разработать энергоресурсосберегающие машинные технологии и цифровые системы мониторинга и управления для экологически безопасного производства сельскохозяйственной продукции» (этап 3.1). Экспериментальная проверка разработанного устройства на лабораторном стенде и в производственных условиях запланирована на третий квартал текущего года и станет предметом отдельной публикации.

Методы и принципы исследования

Исходными данными служили результаты аналитических исследований, нормативно-техническая документация и опубликованные данные по реологическим свойствам полужидкого навоза КРС (влажность 88–92%). Для достоверного моделирования гидродинамических и прочностных характеристик инжектора необходимо располагать физико-механическими свойствами полужидкого навоза, полученными как из нормативной документации, так и из независимых литературных источников. В таблице 1 представлены значения основных параметров согласно отраслевому нормативу РД-АПК 3.10.15.01-17* [16].

Таблица 1 - Физико-механические свойства полужидкого навоза КРС согласно данным РД-АПК 3.10.15.01-17*

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18.1>

Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Вязкость, Па·с	Предельное напряжение сдвига, Па
86	1034,2	1,3	75
87	1032,2	1,2	60
88	1029,6	1,2	50
89	1026,9	0,8	40
90	1024,4	0,6	37
91	1021,8	0,45	14
92	1019,1	0,3	5

Для уточнения диапазонов свойств и учёта разброса, характерного для реальных животноводческих ферм, проведён анализ публикаций [2], [6], [9], [10], [11]. Обобщённые результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Обобщенные физико-механические свойства полужидкого навоза КРС по литературным данным

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18.2>

Параметр	Диапазон значений	Источник информации
Влажность, %	88-92	[2], [6]
Плотность, кг/м ³	1010-1100	[2], [9]
Вязкость, Па·с	5-10	[10], [11]

Параметр	Диапазон значений	Источник информации
Предельное напряжение сдвига, Па	25-40	[11]
Средний размер волокон, мм	10-50	[6]

Приведенные данные использованы в гидравлических и прочностных расчетах как базовые. Экспериментальная проверка запланирована в будущих работах.

Гидравлические параметры потока рассчитаны по методам трубопроводной гидравлики [2]. Прочностной расчет инжектора выполнен для консольной и двухопорной схем [3], гидродинамический анализ обтекания — по справочным данным коэффициентов лобового сопротивления [4]. Форма каплевидного сечения обоснована методами теории турбулентных струй [4]. 3D-моделирование проведено в SolidWorks. Оценка эффективности внесения биодобавок базировалась на анализе типовых технологических схем навозоудаления [1], [2], [6].

Основные результаты

Ниже представлены результаты обоснования места внесения биодобавок, расчёта геометрических параметров инжектора и режима синхронизации, выполненные с использованием физико-механических свойств полужидкого навоза (табл. 1, 2).

3.1. Обоснование места внесения и времени гомогенизации

При традиционной схеме навоз удаляется механическими скребками или роботами, накапливается в поперечных каналах, затем загружается в тракторные прицепы-цистерны (ПТС, МЖТ) и выгружается в лагуну. Предлагаемая технология (рис. 1) исключает тракторную транспортировку: навоз от роботов-уборщиков поступает в загрузочный бункер поршневого насоса, который перекачивает его по подземному трубопроводу (диаметр 300 мм, длина не менее 60 м) в навозохранилище. В поток на расстоянии 10 диаметров (3 м) от насоса вводится биодобавка через инжектор [1], [2].



Рисунок 1 - Технологическая схема процесса навозоудаления полужидкого навоза насосом с внесением биодобавок

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18.3>

Согласно санитарным нормам [18] и отраслевым рекомендациям [19], минимальный разрыв между коровником и хранилищем составляет 60 м, что соответствует длине трубопровода 200 диаметров (200D). После точки впрыска остаётся 190D (57 м). При средней скорости потока $v = 0,03$ м/с (производительность насоса 14 м³/ч, диаметр 300 мм) время движения массы от инжектора до хранилища равно:

$$t = 57 \text{ м} / 0,03 \text{ м/с} = 1900 \text{ с} = 32 \text{ мин.}$$

Этого времени достаточно для активации большинства биодобавок (согласно данным производителей [5], [8], активация занимает 15–30 мин). За счёт турбулентной диффузии и конвективного переноса коэффициент вариации распределения добавки по сечению трубы снижается до $v < 10\%$, что соответствует удовлетворительной гомогенности [12].

3.2. Конструктивные параметры инжектора

Максимальный расход добавки (при норме внесения 5 л/т навоза, производительности насоса 14 м³/ч и плотности навоза 1,1 т/м³):

$$Q_H = Q_N \cdot \rho_H \cdot N = 14 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 1,1 \text{ т/м}^3 \cdot 5 \text{ л/т} = 2,14 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимая скорость движения добавки в канале 1 м/с, минимальная площадь сечения канала:

$$S = \frac{Q_A}{v} = 21,4 \text{ мм}^2,$$

что соответствует внутреннему диаметру:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 21,4}{3,14}} = 5,2 \text{ мм.}$$

Приняты: внутренний канал 5,2 мм, толщина стенки 5 мм, наружный диаметр инжектора 15 мм.

Длина хорды каплевидного профиля (отношение толщины к хорде 1:4...1:5 [4]):

$$c = 15 \text{ мм} \cdot 4,5 = 65 \text{ мм.}$$

Коэффициент лобового сопротивления такого профиля $C_x = 0,045$ (в 10–12 раз меньше, чем у цилиндрической трубки [4]).

Степень загромождения сечения трубы инжектором:

$$K_{\text{загр}} = \frac{S_{\text{инж}}}{S_{\text{тр}}} \cdot 100\% = 6,4\%,$$

что не превышает допустимых 15% для напорных систем [2].

3.3. Прочностный расчет

На рисунке 2 представлена схема основных сил, действующих на консольный инжектор при взаимодействии с потоком полужидкого навоза: давление насоса P_n , сила тяжести F_t , сила трения $F_{\text{тр}}$, сила инерции массы $F_{\text{ин}}$, распределённая нагрузка q .

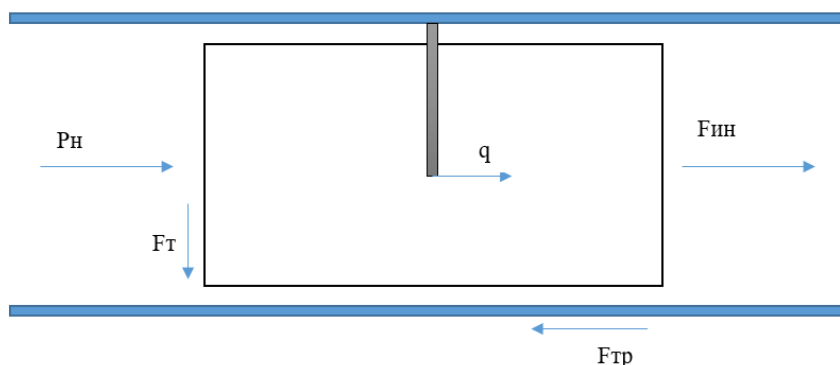


Рисунок 2 - Схема основных сил, действующих на консольный инжектор при взаимодействии с потоком полужидкого навоза

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18.4>

При давлении в трубопроводе 3 бар и наружном диаметре инжектора 15 мм распределённая нагрузка:

$$q = P \cdot D = 300\,000 \text{ Па} \cdot 15 \text{ м} = 4500 \text{ Н/м}$$

Для консольной схемы (длина инжектора $L = 150 \text{ мм}$ — до середины трубы) изгибающий момент и напряжение:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{2} = \frac{4500 \cdot 0,0225}{2} = 51 \text{ Н·м}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{51}{1 \cdot 10^{-6}} = 51 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Для двухопорной схемы (инжектор закреплён на двух опорах, длина между опорами $L = 300 \text{ мм}$):

$$M = \frac{4500 \cdot 0,09}{12} = 34 \text{ Н·м}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{34}{22 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Таким образом, двухопорное крепление снижает изгибающий момент в 1,5 раза, а напряжение изгиба — в 20 раз по сравнению с консольной схемой [3]. Материал инжектора — коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T, сварные швы отсутствуют.

3.4. Режим синхронизации дозатора с поршневым насосом

При частоте работы поршневого насоса 2 мин^{-1} ход нагнетания длится 15 секунд. Поршневой насос простого действия работает следующим образом: на ходе всасывания навоз поступает в камеру, на ходе нагнетания вытесняется в трубопровод. Впрыск биодобавки должен инициироваться датчиком давления в момент начала фактического движения массы (исключая холостой ход). Добавку целесообразно подавать после завершения фазы ускорения поршня (через 1,5–2 с от старта такта) и прекращать за 2–3 с до окончания хода, чтобы добавка попадала в поток с установившейся скоростью [2]. Подача полностью прекращается на ходе всасывания. Оптимальный режим — впрыск в интервале 10–85% от длительности хода нагнетания (активная фаза 2–13 с), синхронизированный с сигналом датчика давления. Такой режим исключает подачу добавки в неподвижную среду и локальное переобогащение, обеспечивая коэффициент вариации распределения $v < 10\%$ [2].

3.5. Эксплуатационные характеристики

Инжектор выполнен в виде фланцевого узла, что позволяет его демонтировать для периодической очистки. Для предотвращения засорения внутреннего канала (диаметр 5,2 мм) рекомендуется устанавливать перед насосом-дозатором сетчатый фильтр с ячейкой 1 мм. В случае забивания волокнистыми включениями предусмотрена обратная промывка водой через штатные штуцеры. Каплевидный профиль минимизирует налипание волокнистых включений; при длительном простое системы (более 2 суток) рекомендуется после остановки насоса промывать инжектор водой в течение 2–3 мин. Двухопорное крепление исключает резонансные вибрации в рабочем диапазоне частот насоса (до 3 Гц) [3]. Ресурс инжектора — не менее 8 лет при ежедневной эксплуатации.

Таким образом, определены и обоснованы все конструктивные параметры инжектора и режим его работы, достаточные для изготовления опытного образца.

Обсуждение

4.1. Сравнение с существующими техническими решениями

В промышленности для введения жидких добавок в трубопровод применяются инжекторы Вентури, шнековые дозаторы, игольчатые и форсуночные системы [1], [2], [4], [17]. Каждый из этих типов имеет ограничения при работе с полужидким навозом крупного рогатого скота.

Инжекторы Вентури создают разрежение за счёт сужения потока [17], однако их эффективность резко падает при высокой вязкости среды (5–10 Па·с, табл. 2) и при наличии волокнистых включений (до 15–18% по массе [16]), которые забивают суженное сечение. Шнековые дозаторы обеспечивают точное объёмное дозирование, но они чувствительны к абразивным частицам и длинным волокнам (размер до 50 мм, табл. 2), что приводит к быстрому износу и заклиниванию [2]. Игольчатые инжекторы просты конструктивно, однако при импульсной работе поршневого насоса (частота до 3 Гц) они испытывают знакопеременные изгибающие нагрузки и быстро выходят из строя из-за вибрационной усталости [17].

Предлагаемая конструкция двухопорного ножа каплевидного сечения сочетает достоинства игольчатого инжектора (простота, точечный впрыск) с повышенной прочностью и устойчивостью к засорению. Каплевидный профиль (коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,045$) в 10–12 раз снижает гидравлическое сопротивление по сравнению с цилиндрическим [4] и предотвращает образование «соломенных мостов» (налипания волокон) благодаря плавному обтеканию и смыканию потока за ножом. Двухопорное крепление, как показано в разделе «Результаты», уменьшает напряжение изгиба в 20 раз относительно консольной схемы [3] и исключает резонансные колебания (собственная частота ножа > 50 Гц, что значительно выше частоты возмущений от насоса).

4.2. Сопоставление расчётных параметров с требованиями

Полученные в разделе «Результаты» геометрические размеры инжектора (внутренний канал 5,2 мм, наружный диаметр 15 мм, хорда 65 мм) удовлетворяют двум ключевым критериям: пропускной способности (77 л/ч) и ограничению по загромождению сечения (6,4% при допустимых 15% для напорных систем [2]). Снижение напряжения изгиба в 20 раз гарантирует отсутствие пластических деформаций при рабочем давлении 3 бар и даже при кратковременных динамических пиках (до 5 бар) в моменты запуска насоса.

Время нахождения навоза в трубопроводе после точки впрыска (32 мин) рассчитано на основе средней скорости потока 0,03 м/с. Этот интервал соответствует периоду активации, указанному производителями биодобавок (15–30 мин для «Биосанвит-М» и «Навобакт» [5], [8]), что обеспечивает начало ферментативных процессов до поступления массы в хранилище. Таким образом, предлагаемая схема не только транспортирует навоз, но и выполняет функцию проточного биореактора начальной стадии.

4.3. Эксплуатационные аспекты и обслуживание

При проектировании устройства учтены реальные условия эксплуатации:

- Очистка и доступ: инжектор выполнен в виде фланцевого узла, что позволяет демонтировать его без разрезания трубы.
- Защита от засорения: перед насосом-дозатором рекомендуется устанавливать сетчатый фильтр с ячейкой 1 мм; внутренний канал инжектора (5,2 мм) проходим для частиц такого размера.
- Промывка: предусмотрена обратная промывка водой через штатные штуцеры; при длительном простое (> 2 суток) регламентирована промывка в течение 2–3 мин после остановки насоса.
- Вибрации и ресурс: двухопорное крепление жёстко фиксирует инжектор, отсутствие сварных швов и выбор коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т обеспечивают расчётный ресурс не менее 8 лет при ежедневной работе [3].

4.4. Ограничения и перспективы

Представленные в статье результаты являются расчётно-теоретическим обоснованием параметров инжектора. В работе не проводились натурные или лабораторные испытания, что является основным ограничением. Экспериментальная проверка на лабораторном стенде (прозрачный трубопровод, имитация потока навоза с использованием трассера для визуализации смешивания, измерение коэффициента вариации концентрации добавки) запланирована на следующий этап НИР в рамках государственного задания № FGUN-2025-0010. Натурные испытания на действующей ферме позволят:

- уточнить реальный коэффициент вариации распределения добавки при разных режимах работы насоса;
- оценить степень засорения фильтра и инжектора в длительной эксплуатации;
- разработать окончательный регламент технического обслуживания.

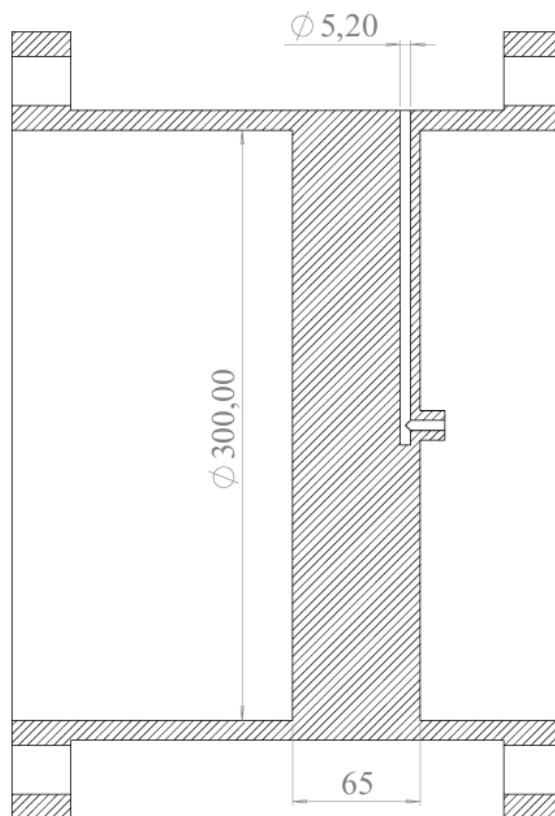
В настоящее время полученные геометрические и прочностные характеристики признаны достаточными для изготовления опытного образца инжектора и начала его стендовых испытаний. Предложенное устройство (двухопорный нож каплевидного сечения, рис. 3, 4) может быть рекомендовано для использования в системах трубопроводного транспорта полужидкого навоза как альтернатива существующим дозирующим устройствам, особенно в условиях высокой вязкости и засорённости среды.

Рисунок 3 - Чертеж двухопорного ножа каплевидного сечения в разрезе
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18.5>



Рисунок 4 - 3D модель инжектора-ножа каплевидного сечения
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.18.6>

Заключение



Для трубопровода диаметром 300 мм и длиной не менее 60 м оптимальным является внесение биодобавки после зоны стабилизации потока на расстоянии 10 диаметров (3 м) от поршневого насоса. Разработан двухопорный нож каплевидного сечения (внутренний канал 5,2 мм, толщина стенки 5 мм, хорда 65 мм), снижающий напряжение изгиба в 20 раз относительно консольной схемы при загромождении сечения 6,4%.



Дискретная подача добавки в интервале 10–85% от длительности такта нагнетания (активная фаза 2–13 с при частоте 2 мин⁻¹), синхронизированная с сигналом датчика давления, обеспечивает равномерное распределение препарата ($v < 10\%$). Учтены эксплуатационные аспекты: фильтрация, обратная промывка, вибрационная стойкость и ресурс.

Представленные результаты являются расчётно-теоретическим обоснованием; экспериментальная проверка запланирована на следующих этапах НИР. Разработанное устройство может быть использовано при проектировании систем навозоудаления на фермах крупного рогатого скота.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Солодун В.И. Сравнительная оценка поршневых установок для транспортирования навоза / В.И. Солодун, В.Ф. Вторый // *АгроЭкоИнженерия*. — 2000. — № 71. — С. 126–131.
2. Исаев А.П. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов / А.П. Исаев, Б.И. Сергеев, В.А. Дидур. — Москва : Агропромиздат, 1990. — 400 с.
3. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. — Киев : Наукова думка, 1988. — 736 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. — Москва : Машиностроение, 1992. — 672 с.
5. Литвинов А. Биосанвит-М — инновационный биодеструктор навоза / А. Литвинов // *Животноводство России*. — 2020. — № 1. — С. 34–35.
6. Брюханов А.Ю. Утилизация навоза/помета на животноводческих фермах для обеспечения экологической безопасности территории, наземных и подземных водных объектов в Ленинградской области / А.Ю. Брюханов, В.И. Могилевцев, Д.А. Максимов [и др.]. — Санкт-Петербург : Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, 2012. — 237 с.
7. Бондаренко А.М. Перспективные технологии переработки навоза в концентрированные органические удобрения / А.М. Бондаренко, Л.С. Качанова // *Агроинженерия*. — 2016. — № 1 (71). — С. 20–28.
8. Хемий И.В. Оценка эффективности препаратов для биоразложения / И.В. Хемий, В.Д. Бризицкая // *Актуальные исследования*. — 2020. — № 14 (17). — С. 24–26.
9. Мирошникова В.В. Современные технологические процессы утилизации навоза крупного рогатого скота / В.В. Мирошникова, М.А. Мирошников // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. — 2014. — № 2 (14). — С. 150–165.
10. Мирошникова В.В. Технология переработки навоза применительно к молочным фермам модульного типа / В.В. Мирошникова, А.М. Бондаренко // *Вестник аграрной науки Дона*. — 2013. — № 4 (24). — С. 4–13.
11. Качанова Л.С. Организационно-экономические аспекты технологии производства твердых органических удобрений на основе полужиткого навоза КРС / Л.С. Качанова, А.М. Бондаренко // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. — 2014. — № 4 (16). — С. 251–260.
12. Опимах Е.В. Оптимизация процесса смешивания жидкостей / Е.В. Опимах, А.Д. Левданский // *Техника и технология пищевых производств : материалы XII Международной научно-технической конференции*. — Могилев : Могилевский государственный университет продовольствия, 2018. — С. 32–33.
13. Owen J.J. Greenhouse gas emissions from dairy manure management: a review of field-based studies / J.J. Owen, W.L. Silver // *Global Change Biology*. — 2014. — № 21 (2). — P. 550–565.
14. Vorobel M. Reducing the emission of harmful gases from pig manure using different doses of biodestructors / M. Vorobel, M. Petryshyn, V. Kaplinskyi [et al.] // *Multidisciplinary Science Journal*. — 2024. — № 6 (9). — 8 p.
15. Васильев Э.В. Оценка эмиссии парниковых газов от животноводства с использованием прикладного программного обеспечения / Э.В. Васильев, Д.А. Максимов, Э.А. Папушин [и др.] // *Техника и технологии в животноводстве*. — 2025. — Т. 15. — № 4. — С. 83–93.
16. РД-АПК 3.10.15.01-17*. Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета. — Введ. 2017-09-01. — Москва : Минсельхоз России, 2017. — 189 с.
17. Пронин А.Н. Классификация дозирующих устройств и их ключевая роль в производстве / А.Н. Пронин // *Вестник НГИЭИ*. — 2023. — № 9 (148). — С. 43–50.
18. РД-АПК 1.10.15.02-17*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета (Изменение № 1). — Москва, 2020. — 181 с. — URL: <https://biokompleks.ru/upload/medialibrary/f3a/0oosm1vx4n5cwaoadqqidz7r975o9m99.pdf> (дата обращения: 26.05.2026).
19. Элементы теории смешивания. Оценка эффективности смешивания // *Хелпикс*. — 2016. — URL: <https://helpiks.org/8-80194.html> (дата обращения: 26.05.2026).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Solodun V.I. Sravnitel'naya otsenka porshnevikh ustanovok dlya transportirovaniya navoza [Comparative assessment of piston units for manure transportation] / V.I. Solodun, V.F. Vtoryi // *AgroEkoInzheneriya* [AgroEcoEngineering]. — 2000. — № 71. — P. 126–131. [in Russian]
2. Isaev A.P. Gidravlika i gidromekhanizatsiya selskokhozyaistvennykh protsessov [Hydraulics and hydromechanization of agricultural processes] / A.P. Isaev, B.I. Sergeev, V.A. Didur. — Moscow : Agropromizdat, 1990. — 400 p. [in Russian]
3. Pisarenko G.S. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook of strength of materials] / G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Matveev. — Kiev : Naukova dumka, 1988. — 736 p. [in Russian]
4. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistances] / I.E. Idelchik. — Moscow : Mashinostroyeniye, 1992. — 672 p. [in Russian]
5. Litvinov A. Biosanvit-M — innovatsionnii biodestruktor navoza [Biosanvit-M — an innovative biodestructor of manure] / A. Litvinov // *Zhivotnovodstvo Rossii* [Animal Husbandry of Russia]. — 2020. — № 1. — P. 34–35. [in Russian]
6. Bryukhanov A.Yu. Utilizatsiya navoza/pometa na zhivotnovodcheskikh fermakh dlya obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti territorii, nazemnykh i podzemnykh vodnykh ob'ektov v Leningradskoi oblasti [Manure/poultry litter management on livestock farms to ensure the ecological security of the territory, ground and underground water bodies in the Leningrad Region] / A.Yu. Bryukhanov, V.I. Mogilevtsev, D.A. Maksimov [et al.]. — Saint Petersburg : Northwest Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization and Electrification, 2012. — 237 p. [in Russian]
7. Bondarenko A.M. Perspektivnye tekhnologii pererabotki navoza v kontsentrirovannye organicheskie udobreniya [Advanced technologies for processing livestock manure into high-quality organic fertilizers] / A.M. Bondarenko, L.S. Kachanova // *Agroinzheneriya* [Agricultural Engineering]. — 2016. — № 1 (71). — P. 20–28. [in Russian]
8. Hemy I.V. Otsenka effektivnosti preparatov dlya biorazlozheniya [Evaluating the effectiveness of drugs for biodegradation] / I.V. Hemy, V.D. Brizitskaya // *Aktualnye issledovaniya* [Current Research]. — 2020. — № 14 (17). — P. 24–26. [in Russian]
9. Miroshnikova V.V. Sovremennye tekhnologicheskie protsessy utilizatsii navoza krupnogo rogatogo skota [Up-to-date technological processes for cattle manure utilization] / V.V. Miroshnikova, M.A. Miroshnikov // *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems]. — 2014. — № 2 (14). — P. 150–165. [in Russian]
10. Miroshnikova V.V. Tekhnologiya pererabotki navozov primenitelno k molochnim fermam modulnogo tipa [Manure processing technology at modular dairy farms] / V.V. Miroshnikova, A.M. Bondarenko // *Vestnik agrarnoi nauki Dona* [Don Agrarian Science Bulletin]. — 2013. — № 4 (24). — P. 4–13. [in Russian]
11. Kachanova L.S. Organizatsionno-ekonomicheskie aspekty tekhnologii proizvodstva tverdykh organicheskikh udobrenii na osnove poluzhitkogo navoza KRS [Organizational and economic aspects of production technology of solid organic fertilizers based on semiliquid manure of cattle] / L.S. Kachanova, A.M. Bondarenko // *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems]. — 2014. — № 4 (16). — P. 251–260. [in Russian]
12. Opimakh E.V. Optimizatsiya protsessa smeshivaniya zhidkostei [Optimization of liquid mixing process] / E.V. Opimakh, A.D. Levitskiy // *Tekhnika i tekhnologiya pishchevyykh proizvodstv* [Food Production Engineering and Technology] : proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference. — Mogilev : Mogilev State University of Food, 2018. — P. 32–33. [in Russian]
13. Owen J.J. Greenhouse gas emissions from dairy manure management: a review of field-based studies / J.J. Owen, W.L. Silver // *Global Change Biology*. — 2014. — № 21 (2). — P. 550–565.
14. Vorobel M. Reducing the emission of harmful gases from pig manure using different doses of biodestructors / M. Vorobel, M. Petryshyn, V. Kaplinskiy [et al.] // *Multidisciplinary Science Journal*. — 2024. — № 6 (9). — 8 p.
15. Vasilev E.V. Otsenka emissii parnikovykh gazov ot zhivotnovodstva s ispolzovaniem prikladnogo programmnoy obespecheniya [The assessment of livestock greenhouse gases emissions at applied software using] / E.V. Vasilev, D.A. Maksimov, E.A. Papushin [et al.] // *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve* [Machinery and technologies in livestock]. — 2025. — Vol. 15. — № 4. — P. 83–93. [in Russian]
16. RD-APK 3.10.15.01-17* Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu sistem udaleniya, obrabotki, obezzarazhivaniya, khraneniya i utilizatsii navoza i pometa [RD-APK 3.10.15.01-17* Guidelines for the design of systems for the removal, processing, disinfection, storage, and disposal of manure and droppings] — Introd. 2017-09-01. — Moscow : Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2017. — 189 p. [in Russian]
17. Pronin A.N. Klassifikatsiya doziruyushchikh ustroystv i ikh klyuchevaya rol v proizvodstve [Classification of dosing devices and their key role in production] / A.N. Pronin // *Vestnik NGIEI* [Bulletin of the NGIEI]. — 2023. — № 9 (148). — C. 43–50. [in Russian]
18. RD-APK 1.10.15.02-17*. Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu sistem udaleniya i podgotovki k ispol'zovaniyu navoza i pometa (Izmeneniye № 1) [RD-APK 1.10.15.02-17*. Methodological recommendations for the technological design of systems for removal and preparation for use of manure and poultry droppings (Amendment № 1)]. — Moscow, 2020. — 181 p. — URL: <https://biokompleks.ru/upload/medialibrary/f3a/0oosm1vx4n5cwaoadqqidz7r975o9m99.pdf> (accessed: 26.05.2026). [in Russian]
19. Elementy teorii smeshivaniya. Otsenka effektivnosti smeshivaniya [Elements of mixing theory. Evaluation of mixing efficiency] // *Helpiks*. — 2016. — URL: <https://helpiks.org/8-80194.html> (accessed: 26.05.2026). [in Russian]