



Влияние гибридной плазмы коронных и искровых разрядов на выбросы анаэробно сброженных сточных вод

Александр Анатольевич Белов¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: belalexan85@gmail.com;

Дмитрий Александрович Ковалев¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: kovalev_da80@mail.ru;

Алексей Семенович Дорохов¹,
доктор технических наук, академик Российской
академии наук, главный научный сотрудник,
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

Дмитрий Юрьевич Павкин¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;

Мария Юрьевна Карелина²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: karelinamu@mail.ru

Андрей Александрович Ковалев¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: kovalev_ana@mail.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

²Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация

Работа подготовлена при выполнении исследования в рамках соглашения № 075-15-2024-542 от 25.04.2024 г. к Гранту Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе создания программно-аппаратных комплексов и интеллектуальных платформенных цифровых решений в сфере развития агропромышленных технологий полного жизненного цикла».

Реферат. Интеграция в производственные цепочки животноводческих предприятий технологии анаэробного сбраживания сталкивается с проблемой утилизации органических сточных вод (эффлюента). Существующие способы утилизации могут сопровождаться побочными выбросами нежелательных веществ, что требует значительных затрат на материалы и оборудование. Альтернативной технологией ограничения выбросов является обработка стока плазмой, при которой возникает ряд нерешенных проблем. (Цель исследования) Изучение влияния плазмы разрядов на эффлюент. (Материалы и методы) Использовалась лабораторная установка с гибридной плазмой надводных коронных и подводных искровых разрядов. В качестве субстрата использовался мезофильный эффлюент свиноводческого предприятия. (Результаты и обсуждение) Применение гибридной плазмы приводило к снижению водородного показателя с 9 до 6, увеличению электропроводности с 1 до 2 миллисименсов на сантиметр и окислительно-восстановительного потенциала с 300 до 600 милливольт, что коррелировало со смягчающим выбросы газов эффектом. Наблюдалась прямая корреляция между снижением водородного показателя и повышением содержания нитратов с 0 до 600 миллиграммов на литр, что связано с их стабильностью и низкой реакционной активностью. Обратная взаимосвязь изменения показателя кислотности и двуокиси азота обусловлена ее участием в реакциях с кислородом с образованием пероксинитрита. Увеличение окислительно-восстановительного потенциала смещает химическое равновесие аммиак-аммоний в нелетучую форму, что приводит к снижению выбросов аммиака в окружающий воздух. Искровые разряды оказывали малое влияние на эффлюент, однако в составе гибридной плазмы их вклад был более значимым как в изменении электрохимических свойств (3-20 процентов), так и в приросте активных форм кислорода и азота на 7-9 процентов в сравнении с коронными разрядами. (Выводы) Повышенная экологичность, отсутствие образования побочных вредных химических соединений, сокращение выбросов газов, предотвращение пенообразования, масштабируемость являются преимуществами обработки гибридной плазмой разрядов в сравнении с существующими способами утилизации сточных вод.

Ключевые слова: животноводство, утилизация отходов, сточные воды, анаэробное сбраживание, подкисление, искровые и коронные разряды, гибридная плазма, аммиак, метан.

■ **Для цитирования:** Белов А.А., Ковалев Д.А., Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Карелина М.Ю., Ковалев А.А. Влияние гибридной плазмы коронных и искровых разрядов на выбросы анаэробно сброженных сточных вод // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-4-13. EDN: NMYYNK.

The Effect of Hybrid Corona–Spark Discharges Plasma on Emissions of Anaerobically Digested Wastewater

Alexander A. Belov¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: belalexan85@gmail.com;

Dmitry A. Kovalev¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: kovalev_da80@mail.ru;

Alexey S. Dorokhov¹,
Dr.Sc.(Eng.), member of the Russian Academy
of Sciences, chief researcher,
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

Dmitry Yu. Pavkin¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;

Maria Yu. Karelina²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail:karelinamu@mail.ru;

Andrey A. Kovalev¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: kovalev_ana@mail.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²State University of Management, Moscow, Russian Federation

The work was prepared as part of research carried out under Agreement No. 075-15-2024-542 dated 25 April 2024 and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the grant “Ensuring National Food Security through the Development of Software and Hardware Complexes and Intelligent Platform-Based Digital Solutions for Full-Lifecycle Agro-Industrial Technologies.

Abstract. The integration of anaerobic digestion technology into the production chains of livestock enterprises is associated with the challenge of managing organic wastewater (effluent). Existing disposal methods can generate by-product emissions and require substantial material and equipment costs. Plasma treatment of effluent represents a promising alternative technology for reducing such emissions, although several issues remain unresolved. (*Research purpose*) The study aimed to investigate the effect of discharge plasma on effluent. (*Materials and methods*) A laboratory setup generating hybrid plasma produced by above-water corona discharges and underwater spark discharges was used. Mesophilic effluent obtained from a pig-breeding enterprise was used as the substrate. (*Results and discussion*) The use of hybrid plasma resulted in a decrease in the potential of hydrogen from 9 to 6 and an increase in electrical conductivity from 1 to 2 millisiemens per centimeter, while the oxidation–reduction potential rose from 300 to 600 millivolts. These changes correlated with a reduction in gas emissions. A direct correlation was observed between the decrease in the potential of hydrogen and the increase in nitrate concentration from 0 to 600 milligrams per liter, which is associated with nitrate stability and low reactivity. The inverse relationship between acidity changes and nitrogen dioxide content is explained by its participation in reactions with oxygen to produce peroxyxynitrite. The increase in oxidation–reduction potential shifts the ammonia–ammonium chemical equilibrium toward a non-volatile form, thereby reducing ammonia emissions into the ambient air. When used separately, spark discharges had only a limited effect on the effluent; however, as part of the hybrid plasma system, their contribution was more pronounced, both in changing the electrochemical properties by 3–20 percent, and in increasing the concentration of reactive oxygen and nitrogen species by 7–9 percent compared with corona discharges. (*Conclusions*) Improved environmental safety, the absence of harmful chemical by-products, reduced gas emissions, foam prevention, and scalability are the main advantages of treatment with hybrid discharge plasma compared with existing wastewater disposal methods.

Keywords: livestock farming, waste disposal, wastewater, anaerobic digestion, acidification, spark and corona discharges, hybrid plasma, ammonia, methane.

■ **For citation:** Belov A.A., Kovalev D.A., Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Karelina M.Yu., Kovalev A.A. The effect of hybrid corona-spark discharges plasma on emissions of anaerobically digested wastewater. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-4-13. EDN: NMYYHK.

Анаэробное сбраживание органических отходов животноводства относится к технологиям двойственного значения по своему эффекту. С одной стороны, получается биогаз (метан), который служит топливом и возобновляемым источником для получения электрической или ме-

ханической энергии [1]. С другой – утилизация этих отходов имеет экологический эффект. В промышленном отношении более выражена энергетическая составляющая [2]. Усиливается тенденция развития экологически чистых видов транспорта. Для сельского хозяйства значимы оба эффекта [3, 4].

При анаэробном сбраживании стоков животноводческих предприятий с целью получения органических продуктов в качестве удобрения (эффлюента) образуются вторичные продукты ферментации, в частности аммиак. Высокая концентрация аммиака может не только ограничивать полезное применение переработанных отходов, но и быть экологическим барьером при их открытом хранении в условиях естественной вентиляции [5]. В случае длительного хранения на поле органические стоки могут проникать в почвенную и водную среду [6], вызывая загрязнение почвы и эвтрофикацию водоемов.

В целях защиты окружающей среды применяются покрытия различных типов и размеров, предотвращающих контакт органических стоков с воздухом [7]. Специальные сооружения для закрытого хранения стоков не только ограничивают выбросы в воздух, но и позволяют устранять влияние на водные и почвенные ресурсы, что требует финансовых вложений на строительство и техническое обслуживание, особенно при больших объемах отходов.

В сравнении с использованием закрытых сооружений подкисление органических стоков до или во время открытого хранения позволяет улучшить показатели снижения эмиссии газов [8]. Перед вывозом в поля или непосредственно в полевых условиях в сток чаще всего добавляют неорганические кислоты, в основном серную кислоту [9]. Эта технология показала хорошую эффективность по снижению эмиссии метана [10]. Однако обработка серной кислотой связана с риском непреднамеренного избыточного внесения серосодержащих соединений в почву, что может вызвать истощение плодородия земли, отравление живых организмов, обитающих или пасущихся на территории. Помимо этого, в органическом стоке при длительном хранении могут образоваться сульфиды, приводящие к нежелательной эмиссии сероводорода в атмосферу [11].

Сравнительно недавно для биоподкисления органических стоков стали применять органические кислоты [12]. Выявлено снижение pH при добавлении сахаров, рисовых отрубей, подсырной сыворотки [13]. Комбинация биоподкисления с другими методами позволяет дополнительно сократить выбросы парниковых газов [14]. При всех достоинствах предлагаемых способов остаются нерешенными проблемы масштабируемости технологий биоподкисления в условиях ограниченной доступности биодобавок.

Новую и перспективную альтернативу методам химического и органического подкисления представляет применение холодной плазмы. В пользу этого варианта прежде всего рассматривается синергетический эффект плазмы: образование активных форм кислорода и азота с одновременным обеззараживанием.

Большинство технологий холодной плазмы заключается в производстве чистой плазменно-активированной воды, обладающей дезинфицирующими и окислительными свойствами, но не только в этом [15]. Ранее выявлено снижение общего количества бактерий в ливневых сточных водах при воздействии плазмой высоковольтных искровых разрядов [16]. Устранение кишечной палочки и вирусов в реакционном растворе, имитирующем сточные воды животноводческих ферм, показано в исследовании [17]. Опубликованы результаты о влиянии плазмы на присутствие нежелательного аммиака в эфлюенте [18]. В некоторых источниках сообщается об ингибировании метаногенеза в органических стоках с помощью плазменной обработки [19].

Органические отходы животноводства при активации плазмой могут служить хорошим удобрением благодаря увеличению доступного азота для сельскохозяйственных культур [20]. Имеются научные данные о влиянии внесения в почву плазменно-активированных органических стоков на урожайность зерновых культур [21]. Проведены исследования по обогащению эфлюента азотом путем воздействия плазмы при получении органического удобрения для выращивания райграсса [22]. Большинство авторов сходятся во мнении, что замена минеральных удобрений плазменно-активированными эфлюентами больше дает экологический эффект, чем влияет на повышение урожайности, хотя она остается в том же приблизительно диапазоне, без существенного снижения.

Внедрение технологии плазменной обработки животноводческих стоков находится на ранней стадии лабораторных исследований и публикации получаемых результатов, которых, вероятно, достаточно для обсуждения практической пользы от использования таких технологических приемов, но не для полноценного воплощения предлагаемых идей и технических решений на фермах.

Кроме того, в литературе отсутствует энергетическая оценка применения плазмы в хозяйствах. В сообщениях о замещении минеральных азотных удобрений плазменно-активированными растворами с близкими эффектами для почвы приводятся данные о неравнозначности результатов по энергетическим показателям [23]. Для достижения одинаковой концентрации азотных соединений за счет плазменной активации воды требуется существенно больше времени, следовательно, электрической энергии, чем при производстве дозы коммерческих азотных минеральных удобрений, добавление которой обеспечивает ту же концентрацию азота в воде.

Большинство исследований сосредоточено на рассмотрении газа одного вида, что не дает полную картину экологической обстановки, не обеспечи-

вает целостный взгляд на выбросы всех основных газов, таких как аммиак, метан, двуокись азота и др. [24]. В управлении отходами следует учитывать немаловажную роль вида сельскохозяйственных животных [25].

Также не встречается проработанный под ключ метод интеграции плазменной обработки в какую-либо технологическую линию утилизации отходов животноводства. Сравнительных исследований о встраивании плазмы в различные цепочки утилизации тоже не замечено.

Для решения подобных научных проблем и практических ограничений использования плазмы в рамках снижения вреда животноводческих отходов разрабатывается концепция исследования на базе метода интеграции обработки плазмой разрядов в технологический процесс анаэробного сбраживания, включающую следующие задачи:

- комплексная научная оценка влияния плазмы разрядов на перевод аммиака в аммоний, на фиксацию азота в виде нитратов и пероксинитрита;
- использование косвенной методики оценки влияния плазмы разрядов на выбросы загрязняющих газов по их электрохимическим свойствам по причине простоты измерения и контроля таких показателей;
- исследование надводной и подводной плазмы различных разрядов и выявление наибольшего эффекта каждого типа на достижимые результаты и проводимые процессы.

Предполагается, что решение поставленных задач внесет научный вклад в понимание общей стратегии создания и развития безотходных технологий. Внедрение недостающего звена в виде использования плазмы разрядов в процессы анаэробного сбраживания отходов будет способствовать интеграции этого инновационного и улучшенного метода в цикл замкнутого агропроизводства.

Цель исследования: изучение влияния плазмы разрядов на анаэробно сброженный сток свиноводческого предприятия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторная установка. Воздействие надводной плазмы коронных разрядов обеспечивает подкисление, а обработка подводной плазмой искровых разрядов – обеззараживание жидкого стока. Эти два принципа совмещены в лабораторной установке генерации пилотной гибридной плазмы.

Пилотная гибридная плазма технически была получена на базе ранее разработанного авторами прототипа – установки искровых разрядов, в которой реализован принцип подводной плазмы [26]. Искровые разряды образуются в рабочем пространстве между винтовыми электродами, размещенными в диэлектрических изоляторах, сформированных утолщениями торцевых стенок корпуса реактора [27].

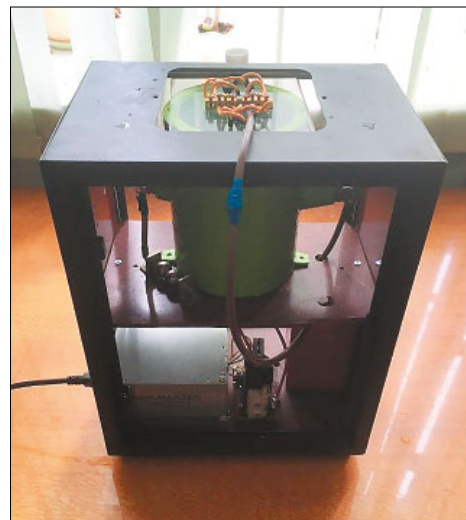


Рис. 1. Установка получения гибридной плазмы
Fig. 1. Pilot setup for generating hybrid plasma

Физическая реализация в лабораторном масштабе гибридного метода генерации плазмы показана на *рисунке 1*.

Усовершенствование прототипа заключалось в дополнительной генерации надводной плазмы коронных разрядов. Медные игольчатые наконечники электрода высокого потенциала расположены на 10 мм выше поверхности стока. Требования к материалу игольчатых наконечников менее строгие, так как они меньше подвержены эрозии по сравнению с плоскими или сферическими наконечниками. Electrodes представляют собой покрытые изоляцией медные стержни, зафиксированные в диэлектрической крышке. Толщина игл 1,5 мм, количество 6. Диэлектрическая крышка удерживает производимые плазмой активные формы кислорода и азота в воздушном пространстве реактора. Коронные разряды в виде плазменных струй образуются в рабочей зоне реактора между поверхностями электрода и стока.

Основные технические характеристики установки: напряжение искровых разрядов 1 кВ; напряжение коронных разрядов 1 кВ; потребляемая мощность 25 Вт; габаритные размеры 0,2×0,3×0,4 м; масса 5 кг; разовая загрузка реактора (емкости) 1 л.

Материалы. Образцы стока были отобраны непосредственно после отделения на дуговом сите твердой фракции на свиноферме в Рязанской области в 2025 г. После доставки в лабораторию образцы хранились при 4 °С в холодильнике до использования в качестве субстрата в биогазовой установке анаэробного сбраживания в мезофильных условиях. После ферментации сток хранился при 4 °С в холодильнике до обработки плазмой. При этом сток разделяли на контрольные варианты (без обработки) и экспериментальные образцы, подвергаемые воздействию гибридной плазмы.

Аналитические методы. Измерения электрохимических показателей проводились количественно с применением рН-метра HI98103 *Checker 1*, кондуктометра *TDS BlueLab PENCON*, а также качественно лакмусовыми полосками, тест-полосками для комплексного определения состава водных растворов. Измерения нитратов и нитритов осуществляли визуальным методом экспресс-тестерами 2 в 1 на определение общего содержания в водных растворах/почве.

Измерения проводились в трехкратной повторяемости. Каждая технологическая операция экспериментов повторялась в трех вариантах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Динамика изменения водородного показателя (рН), электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала анаэробно сброженного свиноводческого стока в зависимости от продолжительности обработки и вида разрядов (коронный, искровой, гибридный) показана на *рисунке 2*.

Обработка стока гибридной плазмой за 8 ч показала наибольшее снижение рН с 9 до 6 в сравнении с коронной (с 9 до 6,3) и искровой (с 9 до 8). Также среднее снижение рН в час было наибольшим при использовании гибридной плазмы и составляло примерно 0,5.

Электропроводность стока в случае гибридной плазмы повысилась до 2 мСм/см и была больше, чем при воздействии коронной – 1,8 мСм/см и, тем более, искровой плазмы – 1,2 мСм/см. В час в среднем электропроводность повышалась при гибридной плазме на 0,1 мСм/см.

Окислительно-восстановительный потенциал стока достигал максимальной величины в 600 мВ при использовании гибридной плазмы, при коронной был немногим меньше – 550 мВ, при искровой – 326 мВ.

Динамика общего содержания нитратов и нитритов в анаэробно сброженном стоке в зависимости от продолжительности обработки и вида разрядов (коронный, искровой и гибридный) показана на *рисунке 3*.

Влияние искровых разрядов на увеличение как нитратов, так и нитритов было несущественным по сравнению коронными и гибридными разрядами. Абсолютный прирост нитратов с околонулевых значений за 8 ч обработки подводной плазмой составлял 20 мг/л, надводной – 560 мг/л, гибридной – 600 мг/л; прирост нитритов соответственно 15, 95 и 100 мг/л.

Анаэробно сброженный органический сток наиболее эффективно может подкисляться при коронных разрядах надводной плазмы, при которой образуются активные формы кислорода и азота. Косвенной количественной мерой этих форм выступают электрохимические показатели.

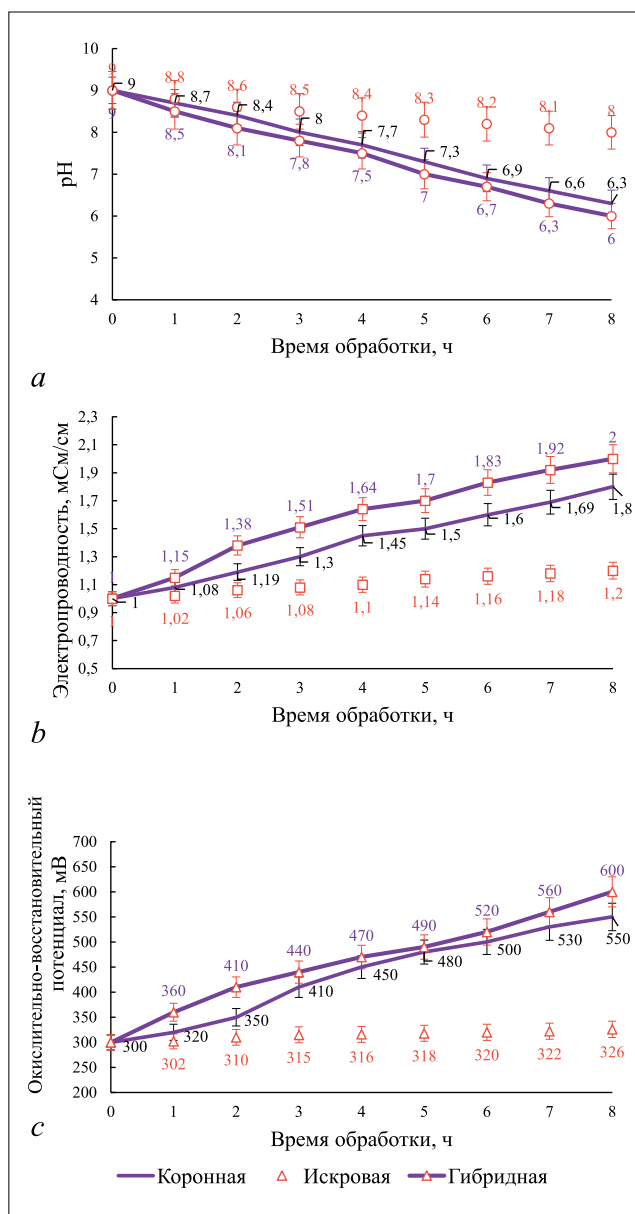


Рис. 2. Динамика изменения рН (а), электропроводности (б) и окислительно-восстановительного потенциала (с) в зависимости от продолжительности обработки и вида разрядов

Fig. 2. Changes in pH (a), electrical conductivity (b), and oxidation-reduction potential (c) depending on treatment duration and discharge type

В отличие от исследований других авторов [28, 29], в данной работе кроме показателя рН предлагается рассматривать дополнительные электрохимические свойства – электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал для оценки влияния плазмы на вредные выбросы.

Механизм образования ключевых долгоживущих соединений гидроксильных радикалов наряду с нитратами при контакте плазмы с воздухом и анаэробно сброженным органическим стоком связан с реакциями в присутствии кислорода, азота и воды [30].

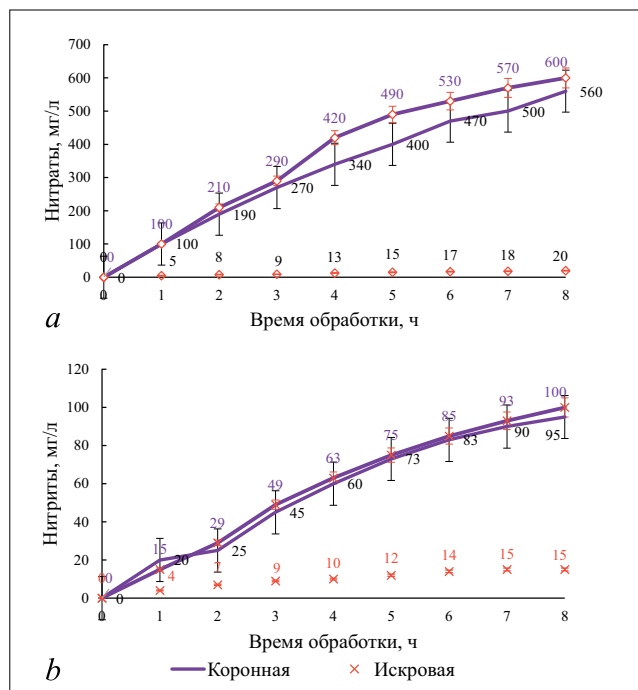


Рис. 3. Динамика изменения концентрации нитратов (а) и нитритов (б) в зависимости от продолжительности обработки и вида разряда

Fig. 3. Changes in the concentrations of nitrates (a) and nitrites (b) depending on treatment duration and discharge type

Образование соединений азота в плазменно-активированной воде подробно изучалось многими исследователями, тогда как механизм влияния плазмы на азот в органогенном стоке еще требует более подробного изучения, хотя и показан в некоторых поздних публикациях [31].

Динамика pH стока имеет прямую зависимость с изменением концентрации нитратов, нитритов и обратную связь с изменением двуокиси азота. Повышение нитратов, нитритов и снижение двуокиси азота с понижением pH вытекает из ряда химических реакций. Прежде всего, плазма обеспечивает разрыв связей молекул азота, и в присутствии донорных атомов кислорода, получаемых из воздуха или воды, образуются окиси азота, далее переводимые в двуокиси или нитраты в реакции с первичным кислородом.

Сопутствующие гидроксильные радикалы реагируют с двуокисью азота с получением пероксинитрита. Нитраты, имеющие более низкую реакционную способность и высокую стабильность, не вступают в цепочку образования пероксинитрита и их концентрация в сброженном стоке остается высокой. Увеличение и устойчивость во времени окислительно-восстановительного потенциала также указывает на образование нитратов, имеющих характеристики долгоживущих азотсодержащих соединений.

Уместно сравнить метод подкисления анаэробно ферментированного стока добавлением серной или органической кислоты, при котором общее содержание азота не изменяется, с плазменной обработкой, когда образуется окисленный неорганический азот в виде преимущественно нитратов и нитритов. Содержание общего окисленного неорганического азота в зависимости от существенного снижения pH будет значительно смещаться в сторону повышения. Одновременно будет повышаться уровень нитратов и нитритов.

Анаэробно сброженный органогенный сток после активации плазмой можно считать комбинированным удобрением с органическим и неорганическим компонентами. Такая характеристика будет наиболее полно отражать получаемые свойства обработанного органогенного стока, а также потенциал его применения.

Стоит отметить, что предложенная ранее оценка [32] плазменно-активированного анаэробно ферментированного органогенного стока, как только органического удобрения, не полностью отражает его свойства.

Механизм сокращения выбросов аммиака заключается в следующем. Плазма разрядов, воздействие которой приводит к снижению pH ферментированного стока, является решающим фактором, отражающим влияние на выбросы аммиака, но не единственным.

Электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал из ряда электрохимических показателей дополняют количественную оценку перевода аммиака в аммоний [33].

Выводы.

Опубликованные в небольшом количестве на настоящий момент научные сообщения о влиянии плазмы на выбросы вредных газов органогенным стоком нельзя считать всеобъемлющими, поскольку эта технология инновационная и требуются более тщательные дополнительные исследования для исчерпывающего объяснения возможных эффектов и потенциальных способов применения.

Косвенными индикаторами побочных выбросов были выбраны электрохимические свойства анаэробно сброженного органогенного стока. Кроме этого, оценка выбросов велась по наблюдениям за изменением активных форм кислорода и азота в обрабатываемом органогенном материале. Пилотная гибридная плазма надводных коронных и подводных искровых разрядов наиболее значимо влияла на исследуемые показатели.

Обработка плазмой приводит к снижению эмиссии аммиака, однако способствует повышению концентрации пероксида азота в анаэробно сброженном органогенном стоке.

В условиях обратной корреляции рН и реакционной способности двуоксида азота имеет значение стабильность химических соединений азота, которая у нитратов выше, что приводит к повышению их количества при снижении нитритов.

Действие коронных разрядов направлено преимущественно на подкисление анаэробно сброжен-

ного органического стока. Наблюдаемое влияние плазмы разрядов на анаэробно ферментированные органические стоки может стать новым вкладом в развитие этого метода, как неотъемлемой части стратегии утилизации отходов животноводства путем анаэробного сбраживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Федотов А.В., Григорьев В.С., Ценч Ю.С. Энергетический потенциал продуктов деструкции органосодержащих отходов АПК при их переработке в сверхкритической водной среде // *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. N4(44). С. 5-11. EDN: EMKSBO.
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Федотов А.В. и др. Адсорбционно-окислительная технология переработки сточных вод предприятий агропромышленного комплекса // *Вестник Мордовского Университета*. 2018. Т. 28. N2. С. 207-221. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.207-221.
3. Aljehani J.H., Mostafa M.K., Abdulkarim S. et al. Conversion of livestock waste to energy: New technological transformation for energy recovery. *Series in Bioenergy*. 2026. 217-40. DOI: 10.1016/B978-0-443-29275-0.00016-5.
4. Enokida C.H., Tapparo D.C., Antes F.G. et al. Anaerobic codigestion of livestock manure and agro-industrial waste in a CSTR reactor: Operational aspects, digestate characteristics, and microbial community dynamics. *Renewable Energy*. 2025. 238:121865. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121865.
5. Maqdasli B., Alhseinat E., Rodriguez J., Al-Ali K. Ammonia recovery from wastewater: A critical review of technologies with emphasis on capacitive deionization. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. 24:100901. DOI: 10.1016/j.ceja.2025.100901.
6. Yong Hou, Velthof G.L., Lesschen J.P. et al. Nutrient recovery and emissions of ammonia, nitrous oxide, and methane from animal manure in Europe: effects of manure treatment technologies. *Environmental Science & Technology*. 2017. 51 (1). 375-383. DOI: 10.1021/acs.est.6b04524.
7. Yan X., Ying Y., Li K. et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
8. VanderZaag A.C., Amon B., Bittman S., Kuczynski T. Ammonia abatement with manure storage and processing techniques. *Costs of Ammonia Abatement and the Climate Co-benefits*. 2015. 284. DOI: 10.1007/978-94-017-9722-1_9.
9. Sokolov V.K., VanderZaag A., Habtewold J. et al. Dairy manure acidification reduces CH₄ emissions over short and long-term. *Environmental Technology*. 2020. 42(18). 2797-2804. DOI: 10.1080/09593330.2020.1714744.
10. Habtewold J., Gordon R., Sokolov V. et al. Reduction in methane emissions from acidified dairy slurry is related to inhibition of *Methanosarcina* species. *Front. Microbiol.* 2018. 9:2806. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02806.
11. Yusra Zireeni, Davey L. Jones, David R. Chadwick et al. Low-dose acidification of cattle slurry with sulfuric acid enhances oilseed-rape yield but risks elevated sulfide formation during prolonged storage. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 970. 179014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179014.
12. Regueiro I., Gómez-Muñoz B., Lübeck M. et al. Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 19. 101135. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101135.
13. Prado J., Chieppe J., Raymundo A., Fanguero D. Bio-acidification and enhanced crusting as an alternative to sulphuric acid addition to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gases emissions during short term storage. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. 121443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121443.
14. Umar W., Vandenbussche C., Dinuccio E. et al. Acidification of animal slurry in housing and during storage to reduce NH₃ and GHG emissions-recent advancements and future perspectives. *Waste Management*. 2025. Vol. 203. 114856. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114856.
15. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J. et al. Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem. *Plasma Processes and Polymers*. 2021. 18:2000162. DOI: 10.1002/ppap.202000162.
16. Белов А.А. Применение технологии холодной атмосферной плазмы для обработки атмосферных сточных вод с целью повторного использования в сельском хозяйстве // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2024. Т. 17. N2(81). С. 107-116. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_2_107.
17. Wenhui Zhang, Yanhan Lu, Xin Wang et al. Simultaneous elimination of antibiotic resistance gene and viruses in liquid manure by plasma/peracetic acid combination system. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 362. Part 3. 131881. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.131881.
18. Pedersen J., Labouriau R., Feilberg A. Effect of slurry separation and air-plasma treatment on NH₃ and VOC emissions from field applied biogas digestate and pig slurry to grassland. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 247. 257-266. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.09.014.
19. Nyvold M., Dörsch P. Complete elimination of methane formation in stored livestock manure using plasma tech-

- nology. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024. 8:1370542. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1370542.
20. Rollett A.J., Williams J.R., Priest H. Ammonia emissions and nitrogen use efficiency of untreated and plasma treated liquid organic materials. *Soil Use and Management.* 2025. 41. 70004. DOI: 10.1111/sum.70004.
 21. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry moderately increases Cereal Yields. *Agronomy,* 2023. 13(6). 1549. DOI: 10.3390/agronomy13061549.
 22. Mousavi H., Cottis T., Hoff G., Solberg S.Ø. Nitrogen enriched organic fertilizer (NEO) and its effect on ryegrass yield and soil fauna feeding activity under controlled conditions. *Sustainability.* 2022. 14(4). 2005. DOI: 10.3390/su14042005.
 23. Guo D., Liu H., Zhou L. et al. Plasma-activated water production and its application in agriculture. *J Sci Food Agric.* 2021. 101: 4891-4899. DOI: 10.1002/jsfa.11258.
 24. Xiaojie Yan, Yongfei Ying, Kunkun Li et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management.* 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
 25. Dennehy C., Lawlor P.G., Jiang Y. et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: a critical analysis. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2017. 11. 11. DOI: 10.1007/s11783-017-0942-6.
 26. Belov A., Vasilyev A., Dorokhov A. et al. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater. *Journal of Water Process Engineering.* 2022. Vol. 45. 102465. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102465.
 27. Белов А.А., Князева И.В. Повторное использование гидропонных растворов после обработки искровыми разрядами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета.* 2025. Т. 20. N2(78). С. 5-9. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-5-9-5-9.
 28. Nyang'au J.O., Sørensen P., Bjarne Møller H. Effects of plasma treatment of digestates on pH, nitrification and nitrogen turnover during storage and after soil application. *Environmental Technology & Innovation.* 2024. Vol. 34. 103578. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103578.
 29. Huang J., Qu Z., Gao Y. et al. Sustainable liquid nitrogen fertilizer production via air plasma bubbles: insights into plasma-enabled N₂ fixation chemistry. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2025. Vol. 58. N11. DOI: 10.1088/1361-6463/ada6c7.
 30. Brisset J.L., Pawlat J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2016. 36. 355-381. DOI: 10.1007/s11090-015-9653-6.
 31. Lloyd I.L., Grayson R.P., Galdos M.V. et al. Nitrous oxide and methane fluxes from plasma-treated pig slurry applied to winter wheat. *NutrCyclAgroecosyst.* 2024. 129. 505-520. DOI: 10.1007/s10705-024-10363-8.
 32. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry with modest fertilizer effect on grass. *European Journal of Agronomy.* 2025. Vol. 168. 127649. DOI: 10.1016/j.eja.2025.127649.
 33. Overmeyer V., Trimborn M., Clemens J. et al. Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns. *Journal of Environmental Management.* 2023. Vol. 331. 117263. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117263.

REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Fedotov A.V., Grigoriev V.S., Tsench Yu.S. The energy potential of the degradation products of organ-containing agricultural waste during their processing in a supercritical aquatic environment. *Don Agrarian Science Bulletin.* 2018. N4(44). 5-11 (In Russian). EDN: EMKSBO.
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Fedotov A.V. et al. Adsorption-oxidation technology of wastewater recycling in agroindustrial complex enterprises. *Mordovia University Bulletin.* 2018. Vol. 28. N2. 207-221 (In Russian). DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.207-221.
3. Aljehani J.H., Mostafa M.K., Abdulkarim S. et al. Conversion of livestock waste to energy: New technological transformation for energy recovery. *Series in Bioenergy.* 2026. 217-40. DOI: 10.1016/B978-0-443-29275-0.00016-5.
4. Enokida C.H., Tapparo D.C., Antes F.G. et al. Anaerobic codigestion of livestock manure and agro-industrial waste in a CSTR reactor: Operational aspects, digestate characteristics, and microbial community dynamics. *Renewable Energy.* 2025. 238:121865. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121865.
5. Maqdasi B., Alhseinat E., Rodríguez J., Al-Ali K. Ammonia recovery from wastewater: A critical review of technologies with emphasis on capacitive deionization. *Chemical Engineering Journal Advances.* 2025. 24:100901. DOI: 10.1016/j.cej.2025.100901.
6. Yong Hou, Velthof G.L., Lesschen J.P. et al. Nutrient recovery and emissions of ammonia, nitrous oxide, and methane from animal manure in Europe: Effects of manure treatment technologies. *Environmental Science & Technology.* 2017. 51(1). 375-383. DOI: 10.1021/acs.est.6b04524.
7. Yan X., Ying Y., Li K. et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management.* 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
8. VanderZaag A.C., Amon B., Bittman S., Kuczynski T. Ammonia abatement with manure storage and processing techniques. *Costs of Ammonia Abatement and the Climate Co-benefits.* 2015. 284. DOI: 10.1007/978-94-017-9722-1_9.
9. Sokolov V.K., VanderZaag A., Habtewold J. et al. Dairy manure acidification reduces CH₄ emissions over short

- and long-term. *Environmental Technology*. 2020. 42(18). 2797-2804. DOI: 10.1080/09593330.2020.1714744.
10. Habtewold J., Gordon R., Sokolov V. et al. Reduction in methane emissions from acidified dairy slurry is related to inhibition of Methanosarcina species. *Frontiers in Microbiology*. 2018. 9:2806. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02806.
 11. Yusra Zireeni, Davey L. Jones, David R. Chadwick et al. Low-dose acidification of cattle slurry with sulfuric acid enhances oilseed-rape yield but risks elevated sulfide formation during prolonged storage. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 970. 179014, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179014.
 12. Regueiro I., Gómez-Muñoz B., Lübeck M. et al. Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 19. 101135. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101135.
 13. Prado J., Chieppe J., Raymundo A., Fanguero D. Bio-acidification and enhanced crusting as an alternative to sulphuric acid addition to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gases emissions during short term storage. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. 121443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121443.
 14. Umar W., Vandebussche C., Dinuccio E. et al. Acidification of animal slurry in housing and during storage to reduce NH₃ and GHG emissions-recent advancements and future perspectives. *Waste Management*. 2025. Vol. 203. 114856. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114856.
 15. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J. et al. Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem. *Plasma Processes and Polymers*. 2021. 18:2000162. DOI: 10.1002/ppap.202000162.
 16. Belov A.A. Cold atmospheric plasma technology application at atmospheric wastewater treatment for the purpose of their reusing in agriculture. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024. 17(2). 107-116 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_2_107-116.
 17. Zhang W., Lu Y., Wang X. et al. Simultaneous elimination of antibiotic resistance gene and viruses in liquid manure by plasma/peracetic acid combination system. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 362. Part 3. 131881. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.131881.
 18. Pedersen J., Labouriau R., Feilberg A. Effect of slurry separation and air-plasma treatment on NH₃ and VOC emissions from field applied biogas digestate and pig slurry to grassland. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 247. 257-266. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.09.014.
 19. Nyvold M., Dörsch P. Complete elimination of methane formation in stored livestock manure using plasma technology. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024. 8:1370542. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1370542.
 20. Rollett A.J., Williams J.R., Priest H. Ammonia emissions and nitrogen use efficiency of untreated and plasma treated liquid organic materials. *Soil Use and Management*. 2025. 41. 70004. DOI: 10.1111/sum.70004.
 21. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry moderately increases cereal yields. *Agronomy*. 2023. 13(6). 1549. DOI: 10.3390/agronomy13061549.
 22. Mousavi H., Cottis T., Hoff G., Solberg S.Ø. Nitrogen enriched organic fertilizer (NEO) and its effect on ryegrass yield and soil fauna feeding activity under controlled conditions. *Sustainability*. 2022. 14(4). 2005. DOI: 10.3390/su14042005.
 23. Guo D., Liu H., Zhou L. et al. Plasma-activated water production and its application in agriculture. *J Sci Food Agric*. 2021. 101: 4891-4899. DOI: 10.1002/jsfa.11258.
 24. Yan X., Ying Y., Li K. et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
 25. Dennehy C., Lawlor P.G., Jiang Y. et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: a critical analysis. *Front. Environ. Sci. Eng*. 2017. 11. 11. DOI: 10.1007/s11783-017-0942-6.
 26. Belov A., Vasilyev A., Dorokhov A. et al. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 45. 102465. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102465.
 27. Belov A.A., Knyazeva I.V. Reuse of hydroponic solutions after spark discharge treatment. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2025. Vol. 20. N2 (78). 5-9 (In Russian). DOI: 10.12737/2073-0462-2025-5-9-5-9.
 28. Nyang'au J.O., Sørensen P., Bjarne Møller H. Effects of plasma treatment of digestates on pH, nitrification and nitrogen turnover during storage and after soil application. *Environmental Technology & Innovation*. 2024. Vol. 34. 103578. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103578.
 29. Huang J., Qu Z., Gao Y. et al. Sustainable liquid nitrogen fertilizer production via air plasma bubbles: insights into plasma-enabled N₂ fixation chemistry. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58. N11. DOI: 10.1088/1361-6463/ada6c7.
 30. Brisset J.L., Pawlat J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2016. 36. 355-381. DOI: 10.1007/s11090-015-9653-6.
 31. Lloyd I.L., Grayson R.P., Galdos M.V. et al. Nitrous oxide and methane fluxes from plasma-treated pig slurry applied to winter wheat. *NutrCyclAgroecosyst*. 2024. 129. 505-520. DOI: 10.1007/s10705-024-10363-8.
 32. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry with modest fertilizer effect on grass. *European Journal of Agronomy*. 2025. Vol. 168. 127649. DOI: 10.1016/j.eja.2025.127649.
 33. Overmeyer V., Trimborn M., Clemens J. et al. Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 331. 117263. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117263.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Белов А.А. – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов, формирование текста;

Ковалев Д.А. – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов исследования;

Дорохов А.С. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Павкин Д.Ю. – литературный анализ, доработка текста и общих выводов;

Карелина М.Ю. – формулирование основных направлений исследования, литературный анализ, доработка текста и общих выводов;

Ковалев А.А. – проведение экспериментальных исследований, формирование текста и визуализация, доработка текста и общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Belov A.A. – conducting experimental studies, processing the results, and drafting the manuscript;

Kovalev D.A. – conducting experimental studies and processing the results;

Dorokhov A.S. – scientific supervision and formulation of the main research concepts;

Pavkin D.Yu. – literature review, manuscript revision, and formulation of the general conclusions;

Karelina M.Yu. – formulation of the main research concepts, literature review, manuscript revision, and formulation of the general conclusions;

Kovalev A.A. – conducting experimental studies, drafting the manuscript, preparing visual materials, manuscript revision, and formulation of the general conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2026

15.05.2026