

На правах рукописи



КОНДРАТЬЕВ АРКАДИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО
СПОСОБА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ
ФЕРМЕНТЕРА**

Специальность 4.3.1–Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Краснообск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, старший научный сотрудник **Делягин Валерий Николаевич**
- Официальные оппоненты:** **Ларичкин Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».
Чепелев Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет»
- Ведущая организация:** Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

Защита состоится « 18 » июня 2026 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.211.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская обл. Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, а/я 463, телефон (факс): +7(383)348-12-09, e-mail: sibime@sfcsa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://www.sfcsa.ru>, <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Отзыв на автореферат, оформленный установленным порядком просим направлять по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета и e-mail: ds24121101@sfcsa.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2026г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Иванников Алексей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное развитие агропромышленного комплекса характеризуется внедрением биотехнологических способов переработки органических отходов. На птицефабриках формируются отходящие газы, включающие аммиак, сероводород, летучие органические соединения, микроаэрозоли и патогенную микрофлору. Указанные компоненты ухудшают санитарно-гигиеническое состояние производственных помещений и формируют неблагоприятный экологический фон в санитарно-защитных зонах предприятий. При этом аммиак рассматривается как приоритетный токсичный компонент отходящих газов ферментера и критерий оценки эффективности их нейтрализации. Нейтрализация токсичных компонентов отходящих газов (ОГ) осложнена высокой влажностью, переменным расходом и переменным составом газовой смеси. Традиционные абсорбционные и биофильтрационные методы не обеспечивают требуемую глубину снижения концентрации аммиака и сопутствующих компонентов и характеризуются высокими эксплуатационными затратами.

В этой связи актуальной является разработка и обоснование новых способов, а также выбор рациональных параметров нейтрализации отходящих газов ферментера, обеспечивающих экологически безопасный уровень выбросов при приемлемых энергетических и эксплуатационных затратах.

Степень разработанности проблемы. Вопросы нейтрализации отходящих газов, очистки воздушной среды объектов агропромышленного комплекса, удаления аммиака, сероводорода, одорирующих соединений и аэрозольных примесей, а также применения биофильтрационных, абсорбционных, электрофизических и плазмохимических методов рассматривались в работах отечественных исследователей: Ю.С. Акишева, С.Ю. Брусникина, А.Ю. Брюханова, А.Н. Васильева, Г.И. Герасимова, В.В. Голубева, Н.В. Кундро, А.Е. Компанийца, С.А. Лопатина, А.С. Носкова, В.А. Одарюка, З.П. Пая, И.Ф. Рахимова, А.В. Смагина, В.Ф. Сторчевого, С.В. Сучугова, Д.А. Тихомирова, Н.И. Чепелева, В.В. Юркина, Л.Ю. Юферева, а также зарубежных авторов: A.J.A. Aarnink, A. Bogaerts, M. Cambra-López, A. Feilberg, C.M. Groenestein, A. Khacef, D.-W. Kim, U. Kogelschatz, C. Leys, J. Mosquera, J.-Q. Ni, N.W.M. Ogink, M.D. King, B.L. Smith, H. Van Langenhove, L. Xia и др.

Вместе с тем недостаточно проработаны вопросы выбора рациональных режимов и обеспечения стабильной нейтрализации отходящих газов ферментера АПК в условиях высокой влажности и переменного состава газового потока.

Научная гипотеза – применение комбинированного двухстадийного способа обработки отходящих газов ферментера путём скрубберной абсорбции водой с последующей плазмохимической нейтрализацией ОГ позволяет обеспечить требуемую степень нейтрализации основных загрязнителей в условиях высокой влажности и нестационарности газового потока.

Цель исследования – обоснование рациональных параметров комбинированного способа нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера птицефабрик, обеспечивающих требуемую экологическую безопасность и эффективность нейтрализации за счёт сочетания абсорбционного (скрубберного) и плазмохимического воздействия.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих технологий нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера при аэробной ферментации органических отходов.
2. Обосновать комбинированный способ нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, включающий последовательную абсорбционную и плазмохимическую обработку.
3. Разработать математическую модель процесса нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, учитывающую физико-химические механизмы воздействия.
4. Обосновать рациональные параметры режима нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера с использованием физико-химических методов воздействия.
5. Провести производственные испытания и дать оценку экономической эффективности использования основных результатов исследования.

Объект исследования – технологические процессы нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, образующихся при аэробной ферментации органических отходов птицефабрик.

Предмет исследования – закономерности нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера в зависимости от режима обработки отходящих газов.

Научная новизна работы:

- способ комбинированной нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера;
- математическая модель процесса нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, учитывающая комплексное физико-химическое воздействие на газовую смесь при последовательной абсорбционной и плазмохимической обработке;
- рациональные параметры комбинированного способа нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, обеспечивающие требуемую эффективность нейтрализации и экологическую безопасность газовых выбросов.

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении и уточнении научных представлений о закономерностях нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера. Разработана математическая модель процесса нейтрализации, учитывающая комплексное физико-химическое воздействие на газовую смесь при последовательной абсорбционной и плазмохимической обработке, что позволяет углубить теоретические представления о механизмах совместного действия указанных процессов. Установленные зависимости описывают изменение концентрации приоритетного токсичного компонента – аммиака (NH_3) – при комбинированном способе нейтрализации и формируют теоретическую основу для анализа и дальнейшего развития методов очистки газовых выбросов биотехнологических установок.

Практическая значимость исследования заключается в разработке конструктивно-режимных решений, направленных на повышение стабильности функционирования систем нейтрализации токсичных компонентов ОГ ферментера и обеспечение их эффективного применения в производственных условиях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации действующих технологических систем нейтрализации отходящих газов ферментера с учётом требований к эффективности очистки, энергоёмкости и эксплуатационной надёжности оборудования. Разработанные решения ориентированы на обеспечение стабильной работы системы в условиях высокой влажности и переменного состава газового потока. Их применение позволяет повысить обоснованность выбора режимов работы оборудования при реальных производственных нагрузках. Реализация установленных режимных параметров способствует повышению эффективности нейтрализации аммиака, снижению удельных энергозатрат, а также улучшению эксплуатационных и экологических показателей работы системы в целом. Установленные расчётные зависимости и выявленные закономерности могут быть использованы проектными, производственными и эксплуатационными организациями при разработке, инженерном расчёте, настройке и совершенствовании систем нейтрализации газовых выбросов объектов агропромышленного комплекса.

Материалы и методы исследования включали методы многомерного статистического анализа, имитационного моделирования, а также натурные исследования физических и химических параметров процесса нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов в условиях реального объекта. Обработка результатов экспериментов осуществлялась с использованием математического пакета Statistica. Оценка влияния исследуемых факторов проводилась на основе математических моделей, реализованных с применением алгоритмического языка высокого уровня. Адекватность разработанной модели процесса нейтрализации аммиака подтверждена сопоставлением расчётных зависимостей, полученных в ходе лабораторных исследований, с результатами производственной проверки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комбинированный способ нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, основанный на последовательном сочетании абсорбционной обработки и плазмохимического воздействия, обеспечивающий эффективное снижение содержания аммиака как приоритетного загрязнителя.

2. Математическая модель процесса нейтрализации отходящих газов ферментера, учитывающая комплексное физико-химическое воздействие абсорбционной стадии и плазмохимического этапа на состав газовой смеси и позволяющая описывать изменение концентрации аммиака по стадиям обработки.

3. Установленные закономерности и обоснованные рациональные режимные параметры комбинированного процесса нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов ферментера, обеспечивающие достижение требуемой степени нейтрализации аммиака и выполнение экологических требований к газовым выбросам ферментера.

Новизна применённых в работе технических решений подтверждена патентом Российской Федерации на изобретение № 2809452.

Степень достоверности и обоснованности результатов подтверждается использованием поверенных средств измерений и методов контроля, обеспеченных метрологическим сопровождением, воспроизводимостью экспериментальных данных, сопоставлением результатов с расчётами по математической модели и согласованностью с результатами других авторов. Обоснованность практических рекомендаций подтверждается производственной проверкой режимных параметров и технической реализуемостью предложенного комбинированного способа.

Реализация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования прошли производственную проверку в ЗАО «Ново-Барышевская птицефабрика», внедрены на предприятии ООО «БИК-ОРГАНИК» и используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий».

Апробация результатов исследования осуществлялась путём докладов и обсуждения основных положений диссертационной работы на международных и всероссийских научно-технических и научно-практических конференциях. Результаты работы были представлены на Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (г. Минск, 2023, 2025 гг.), на научно-технической конференции «Энергообеспечение АПК» (ФГБНУ ВИМ, 2023, 2025 гг.), на Международной научно-технической конференции «Роль цифровизации в научно-техническом обеспечении АПК Сибири» (р.п. Краснообск, 2024 г.), на Международной научно-практической конференции «Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (г. Тамбов, 2025 г.), а также на II Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение сельского хозяйства: проблемы, достижения, перспективы» (г. Барнаул, 2025 г.). Кроме того, результаты диссертационного исследования были представлены на Международном научно-практическом форуме «Аграрная наука – сельскохозяйственному производству СНГ и BRICS» (р.п. Краснообск, 2026 г.). Обсуждение докладов и экспертная оценка представленных материалов позволили уточнить отдельные положения исследования и подтвердить их актуальность, научную новизну и обоснованность.

Публикации. Результаты диссертационного исследования отражены в 10 печатных работах, в том числе 3 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 публикация в МБД SCOPUS, получен 1 патент на изобретение РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков, 34 таблицы и 99 наименований использованных источников, в том числе 64 — на русском языке и 35 — на иностранном языке.

Диссертация выполнена в соответствии с планом НИР СФНЦА РАН в рамках государственных тем № 0533-2021-0012 и № 0533-2024-0004, направленных на разработку систем инженерного, технологического и энергетического обеспечения сельскохозяйственного производства и переработки отходов животноводства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика исследования, обоснована актуальность проблемы нейтрализации отходящих газов ферментера АПК, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены объект и предмет исследования. Показано, что традиционные методы абсорбционной нейтрализации характеризуются ограниченной эффективностью в условиях высокой влажности и переменного состава отходящих газов ферментера, что обуславливает необходимость разработки новых способов нейтрализации токсичных компонентов. Сформулированы гипотеза, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования.

В первой главе проанализированы условия формирования газовой среды при аэробной ферментации органических отходов птицефабрик и рассмотрены традиционные способы нейтрализации ОГ. Показано, что работа аэробного ферментера сопровождается образованием ОГ с повышенными концентрациями аммиака и сопутствующих токсичных компонентов (сероводорода, меркаптанов и др.), что осложняет обеспечение санитарных нормативов в производственных зонах. По результатам анализа аммиак определён как приоритетный загрязнитель и выбран в качестве маркерного компонента для оценки эффективности нейтрализации.

Превышение санитарных норм по аммиаку в рабочих зонах составляет 5–25 раз, что свидетельствует о высокой потенциальной опасности для обслуживающего персонала. При этом аммиак принят в качестве основного компонента для оценки эффективности нейтрализации отходящих газов ферментера.

Установлено, что применяемые двухступенчатые абсорбционные схемы (кислотная и щелочная обработка) обеспечивают снижение концентраций целевых компонентов, однако характеризуются высокими эксплуатационными затратами, потребностью в реагентах и образованием вторичных жидких стоков. Технологии на основе низкотемпературной плазмы обладают высоким потенциалом деструкции сложных соединений и инактивации микрофлоры, но сопряжены с высокими энергетическими затратами. В совокупности выявленные недостатки рассмотренных технологических решений обосновывают актуальность разработки комбинированного способа, обеспечивающего устойчивое снижение концентраций загрязнителей при уменьшении эксплуатационной нагрузки.

Во второй главе приведены теоретические исследования по обоснованию комбинированного способа, позволяющего нейтрализовать токсичные компоненты ОГ путём последовательной обработки отходящих газов абсорбентом (водой) в скруббере мокрой очистки, в плазмохимическом реакторе и камере доокисления. На абсорбционной стадии наименее затратным способом удаляется до 50 % аммиака, содержащегося в отходящих газах. Оставшуюся часть аммиака предполагается нейтрализовать с использованием продуктов низкотемпературной неравновесной плазмы (НТП), обеспечивающей образование реакционно-способных частиц, в частности озона (O_3), атомарного кислорода ($O\bullet$), оксидов азота (NO_x) и гидроксильных радикалов ($OH\bullet$), а также ультрафиолетового излучения.

Комбинированный способ позволяет совместить достоинства традиционных и плазмохимических технологий. Объединение абсорбционной и плазмохимической стадий обеспечивает:

- снижение концентрации токсичных газов до нормативного уровня;
- инактивацию микроорганизмов;
- компенсацию колебаний состава и параметров газового потока;
- сокращение эксплуатационных и энергетических затрат;
- доокисление компонентов в транспортной системе ОГ без дополнительных энергозатрат.

При быстром связывании аммиака в жидкой фазе процесс абсорбции определяется интенсивностью межфазного массопереноса. Увеличение удельного расхода воды способствует повышению степени извлечения аммиака, однако по мере приближения к предельной эффективности данный эффект снижается вследствие ограничений межфазного контакта, диффузионного переноса и времени пребывания. Механизм улавливания аммиака на абсорбционной стадии может быть описан экспоненциальной зависимостью следующего вида:

$$\eta_{\text{абс}}(L/G) = A (1 - e^{-\alpha \cdot (L/G)}) \quad (1)$$

где $\eta_{\text{абс}}$ – степень улавливания аммиака на стадии абсорбции, о.е.;

L/G – отношение расхода жидкости в скруббере к расходу воздуха – удельный расход воды, л/м³;

A – максимальная эффективность улавливания на стадии абсорбции с учётом начальной концентрации аммиака;

α – параметр скорости протекания реакции.

На плазменной стадии реакции аммиака рассматривается как совокупность параллельных элементарных взаимодействий аммиака с активными компонентами, генерируемыми НТП. При допущении квазистационарности концентраций активных форм в активной зоне и неизменности гидродинамических условий скорость убыли аммиака может быть записана в виде псевдопервого порядка по аммиаку, где константа эффективности включает вклад отдельных каналов реакции. Скорость изменения концентрации аммиака во времени, на плазменной стадии, описана следующим уравнением:

$$\frac{\Delta[NH_3]}{\Delta t} = -(k_1[O_3] + k_2[NO_2] + k_3[NO] + k_4[O \bullet] + k_5[OH \bullet]) \cdot [NH_3] \quad (2)$$

где $[A_i]$ – концентрации активных форм ($O \bullet$, $OH \bullet$, O_3 , NO_x);

k_i – константы скоростей взаимодействия аммиака с указанными компонентами, с⁻¹.

Соответственно, эффективность плазменной ступени описывается экспоненциальной зависимостью первого порядка:

$$\eta_{\text{пл}}(t) = B (1 - e^{-\beta \cdot t}) \quad (3)$$

где $\eta_{\text{пл}}$ – доля аммиака, нейтрализованная на плазменной стадии, о.е.;

t – время нахождения обрабатываемого газа в активной зоне смесителя, с;

B – максимальная эффективность нейтрализации на плазменной стадии;

β – параметр скорости протекания реакции.

После активной зоны возможна стадия доокисления в транспортном канале, обусловленная взаимодействием остаточного NH_3 с долгоживущими продуктами НТП, целесообразно представить в виде зависимости от времени пребывания компонентов в транспортном канале. Таким образом, третья стадия – доокисление в транспортном канале – может быть описана выражением:

$$\eta_{ок}(t) = C \cdot \ln(1 + \gamma t) \quad (4)$$

где $\eta_{ок}$ – доля аммиака, удалённая в транспортном канале, о.е.;

t – время пребывания компонентов ОГ в транспортном канале, с;

C – максимальная эффективность нейтрализации на стадии доокисления;

γ – параметр скорости протекания реакции.

Увеличение времени пребывания в транспортном канале позволяет без дополнительных энергозатрат достичь требуемой степени нейтрализации аммиака.

Функциональная схема установки, реализующая предложенный комбинированный способ нейтрализации ОГ, представлена на рис. 1

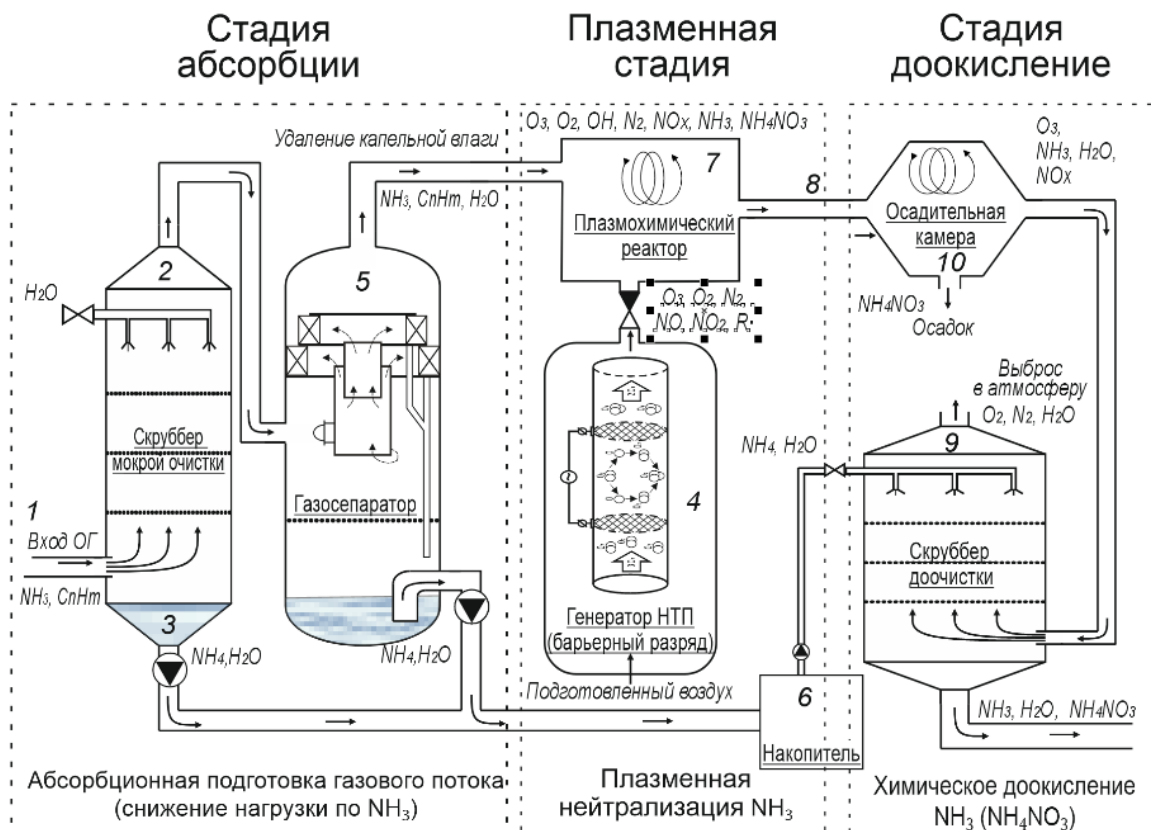


Рисунок 1 – Функциональная схема установки, реализующей комбинированный способ нейтрализации токсичных компонентов ОГ

Учитывая последовательное протекание стадий абсорбции, плазмохимического воздействия и доокисления в транспортном канале, можно сформировать модель процесса нейтрализации аммиака. Обобщающий показатель процесса — интегральный коэффициент эффективности нейтрализации аммиака $\eta_{комб}$ — представим в виде произведения остаточных долей после каждой стадии:

$$\eta_{комб} = 1 - (1 - \eta_{абс})(1 - \eta_{пл})(1 - \eta_{ок}) \quad (5)$$

Полученные зависимости могут быть использованы для инженерных расчётов в пределах диапазона значений независимых переменных, установленного по результатам экспериментов.

В третьей главе изложены программа экспериментальных исследований и методика их проведения. Программа исследований включала: определение состава исходных отходящих газов ферментера и их количественную оценку по основным токсичным компонентам, прежде всего по аммиаку; разработку плана экспериментов с обоснованием варьируемых факторов и диапазонов их изменения; проектирование и изготовление установок для исследования различных стадий и режимов нейтрализации аммиака; исследование режимов работы абсорбционной стадии и определение её эксплуатационных характеристик; исследование влияния параметров плазмохимической стадии на эффективность нейтрализации аммиака; статистическую обработку результатов экспериментальных исследований; оценку эффективности комбинированного способа нейтрализации; производственную проверку комбинированного способа нейтрализации аммиака.

Для реализации программы исследований разработаны и изготовлены рабочие образцы установок для имитации стадии абсорбции (№ 1), плазмохимической стадии обработки, включая стадию доокисления (№ 2), и для определения рациональных режимов работы генератора НТП (№ 3).

Для производственной проверки комбинированного способа нейтрализации аммиака изготовлена опытная установка нейтрализации ОГ (№ 4).

Экспериментальная оценка состава отходящих газов выполнена в производственных условиях Ново-Барышевской птицефабрики, где в герметичных ферментерах осуществляется непрерывная аэробная переработка органических отходов. Ферментеры (6 шт.) рассчитаны на переработку до 300 т/мес органических отходов при длительности цикла около 14 суток. Определялись исходные концентрации метана, аммиака, углекислого газа, сероводорода, и др. Отбор проб проводили на выходе из отдельных ферментеров до смешения потоков и непосредственно перед скруббером (рис. 2) через технологические патрубки воздухопроводов. Расположение



Рисунок 2 – Расположение точек отбора проб для оценки состава ОГ ферментера: 1, 2 – ферментеры; 3, 4 – точки отбора проб; 5 – система транспортировки ОГ.

контрольных точек № 1 и 2 с учётом направления движения воздушных масс обеспечило репрезентативную оценку состава ОГ на входе в абсорбционную стадию.

Для обоснования параметров абсорбционной стадии комбинированной нейтрализации выполнены лабораторные исследования по абсорбции аммиака в водяном скруббере. Схема экспериментальной установки № 1 с двумя последовательно соединёнными абсорбционными колоннами, форсуночным орошением, рециркуляционными контурами и контрольными точками отбора проб (рис. 3). Газовоздушную смесь с заданной концентрацией аммиака формировали на входе установки с помощью генератора NH_3 и пропускали через обе колонны.

При исследовании абсорбционной стадии в качестве варьируемых факторов принимались начальная концентрация аммиака, расход воды в скруббере и температура воды. Начальная концентрация аммиака составляла 320 и 680 мг/м³, расход воды изменялся от 0,4 до 1,6 м³/ч, температура воды — 15 и 25 °С. Для удобства анализа различные сочетания указанных параметров были представлены в виде режимов А–L. Эффективность режима оценивали по степени удаления аммиака, массовому расходу удалённого аммиака и удельному расходу воды.

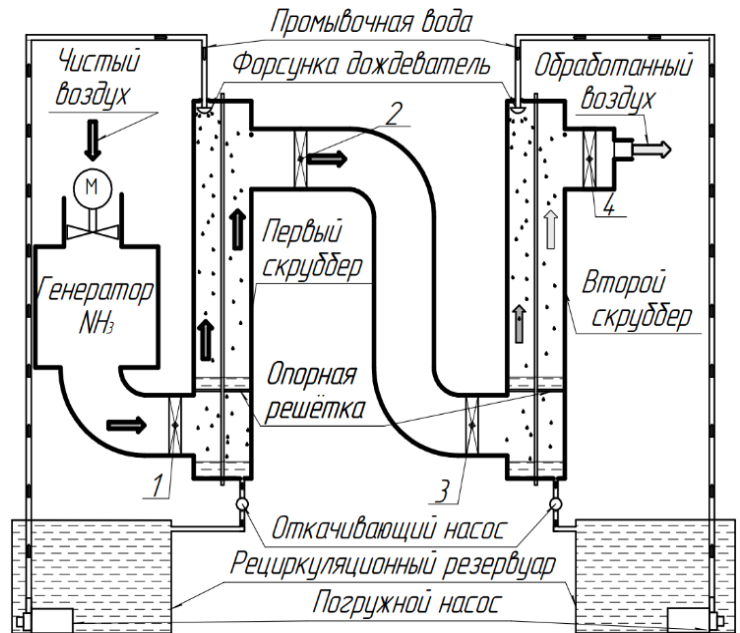


Рисунок 3 – Схема установки № 1 для имитации абсорбционной стадии улавливания

По результатам измерений концентрации аммиака, удельного расхода абсорбента (воды), температуры и влажности газовой смеси определяли степень улавливания $\eta_{\text{абс}}$, массовый расход удалённого аммиака (г/ч) и удельный расход воды (л/м³).

Для обоснования параметров плазмохимической стадии исследовано влияние времени экспозиции и массового соотношения озона к аммиаку на эффективность нейтрализации аммиака. Эксперименты выполнены на лабораторной установке № 2, моделирующей транспортировку отходящих газов. Схема установки, включающая генератор аммиака, генератор низкотемпературной неравновесной плазмы (НТП), смеситель и транспортный канал (рис. 4). Атмосферный воздух подавался в генератор аммиака, после чего смешивался с компонентами НТП. После смешения поток направлялся в транспортный канал длиной 30 м с четырьмя контрольными сечениями (0; 10; 20; 30 м). Скорость потока воздуха регулировалась в пределах 0,8–1,5 м/с.

Для установления рационального диапазона скоростей прокачки плазмообразующего газа выполнена серия экспериментов на установке с генератором НТП. Подачу воздуха регулировали в диапазоне 24–153 м³/ч, что соответствовало скорости 0,8–5,0 м/с в активной зоне. Оценивали концентрации озона и оксидов азота, а также влияние теплового режима на выход активных форм кислорода.

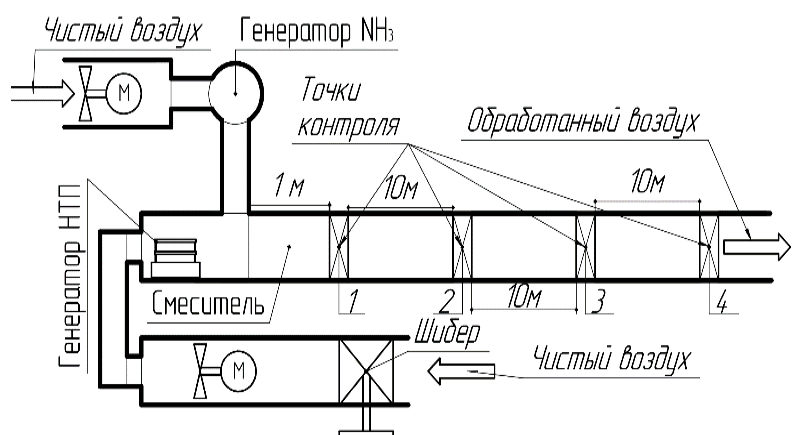


Рисунок 4 – Схема установки № 2 для имитации нейтрализации аммиака на стадии плазменной обработки и доокисления в транспортном канале

Для исследования зависимости генерации озона от температуры диэлектрической пластины ДБР использовалась установка № 3 (рис. 5). Тепловое поле регистрировали с помощью тепловизора через смотровое окно. Рассмотрены четыре конфигурации теплоотвода излучателя: без теплоотвода, с алюминиевой пластиной, с оребренным радиатором и с активным охлаждением.

Для анализа результатов использовали показатель — индекс селективности, отражающий долю озона в общей массе образующихся активных форм кислорода и оксидов азота:

$$S = O_3 / (O_3 + NO_x) \quad (6)$$

Эффективность комбинированного способа нейтрализации ОГ оценивалась в производственных условиях (Ново-Барышевская п/ф, рис 6). Отбор газов для обработки осуществлялся после скрубберной стадии (абсорбция водой). Предварительно обработанные газы поступали в смеситель (реактор) где подвергались воздействию продуктов, генерируемых ДБР, после чего направлялись в систему транспортировки, где происходила стадия доокисления. Эффективность нейтрализации аммиака оценивалась частными коэффициентами $\eta_{абс}$, $\eta_{пл}$, $\eta_{общ}$, и удельными энергозатратами на нейтрализацию аммиака.



Рисунок 5 – Установка № 3 для определения рациональных режимов работы генератора НТП: 1- генератор НТП, 2- вентилятор, 3- термоанемометр, 4- точка пробоотбора

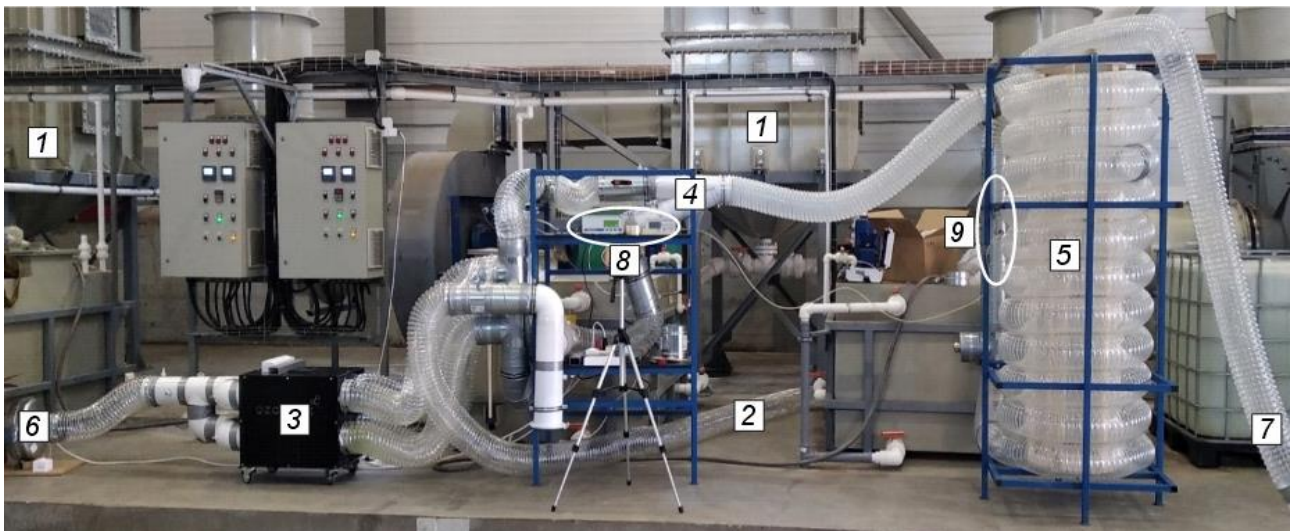


Рисунок 6 – Опытная установка № 4 по нейтрализации аммиака в производственных условиях Ново-Барышевской птицефабрики: 1 – водяные скрубберы, 2 – патрубок подачи ОГ после скрубберов, 3 – генератор НТП, 4 – смеситель, 5 – осадительная камера (транспортный канал), 6 – осевой вентилятор подачи плазмообразующего газа, 7 – система удаления обработанного газа, 8 – приборы контроля состава обрабатываемого воздуха, 9 – точка отбора проб перед выбросом обработанного воздуха

В ходе экспериментальных исследований использовался комплекс контрольно-измерительного оборудования для мониторинга параметров газовой среды и технологических режимов установки

Для контроля концентрации аммиака применялся газоанализатор ДО-ЗОР-С-М. Содержание озона определялось с помощью прибора ЦИКЛОН-5.31. Многокомпонентный газоанализ (монооксид азота, диоксид азота, монооксид углерода и др.) выполнялся прибором TESTO 350 XL.

Температурно-влажностные параметры и скорость воздушного потока фиксировались устройствами Testo 435-2 и Testo 405. Для бесконтактного измерения температуры поверхностей использовался пирометр Testo 845. Плотность инфракрасного излучения регистрировалась прибором ИК-метр «МК-метр». Электрические параметры (ток, напряжение) контролировались мультиметром АКТАКОМ АМ-1152. Концентрация аэроионов измерялась счётчиком МАС-01.

Планирование экспериментальных исследований осуществлялось с использованием методов математического планирования эксперимента, а статистическая обработка и анализ полученных результатов выполнялись с применением пакета прикладных программ Statistica.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований и проведён их анализ.

По результатам исследований, выполненных на Ново-Барышевской птицефабрике, установлено, что в составе ОГ преобладают азот и кислород, при содержании углекислого газа около 4 % и водорода — 3 %. Концентрации токсичных компонентов — аммиака, сероводорода и метана — по контрольным точкам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Концентрации токсичных компонентов в ОГ ферментера

Компонент	№ Ферментёра						Отделение дезодорации
	1	2	3	4	5	6	
№, точек контроля	1	2	3	4	5	6	7
Аммиак (NH ₃), мг/м ³	926	582	490	695	688	785	463
Сероводород (H ₂ S), мг/м ³	29	22	15	18	22	25	17
Метан (CH ₄), мг/м ³	2927	2678	2789	2992	2832	2700	2959

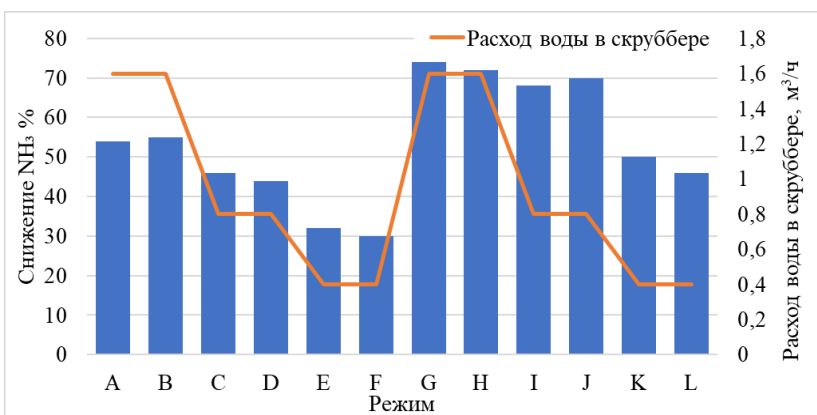


Рисунок 7 – Сравнительная эффективность удаления NH₃ по режимам, %

В ходе лабораторных исследований на установке № 1 установлена зависимость эффективности абсорбционного удаления аммиака в водяном скруббере от параметров режима работы. Результаты экспериментов по различным режимам (рис. 7) получена аппроксимирующая зависимость $\eta_{абс}$ от $C_{NH_3}^{нач}$, L/G (6),

По результатам экспериментов зависимость эффективности абсорбции аммиака от параметров режима работы водяного скруббера аппроксимирована в виде функции (6).

$$\eta_{абс}(C_{NH_3}^{нач}, L/G) = [91,6 - 0,051C_{NH_3}^{нач}] \left(1 - e^{-[166 - 0,1C_{NH_3}^{нач}] \cdot 0,1(L/G)}\right) \quad (6)$$

Полученная зависимость отражает характер насыщения абсорбирующей жидкости аммиаком и позволяет определить область рациональных значений удельного расхода воды (рис. 8).

В ходе исследований плазмохимической стадии с использованием установки № 2 изучено влияние времени экспозиции компонентов газовой смеси на эффективность нейтрализации аммиака при фиксированной производительности по аммиаку 2,5 г/ч и начальной концентрации 93 мг/м³. Установлено, что при увеличении времени взаимодействия с 2 до 30 с интегральный показатель эффективности нейтрализации аммиака $\eta_{пл}(t)$

возрастает с 0,47 до 0,89. На начальном участке процесса (первые 1–2 с) наблюдается интенсивный рост эффективности, обусловленный максимальной концентрацией короткоживущих активных форм, далее фиксируется замедление процесса с последующим доокислением в транспортном канале.

Для описания кинетики процесса нейтрализации предложена эмпирическая двухкомпонентная модель, включающая экспоненциальную и логарифмическую составляющие (7), (8):

Увеличение времени нахождения аммиака и активных компонентов газовой смеси в транспортном канале способствует снижению энергозатрат за счёт более полного взаимодействия компонентов и протекания процессов доокисления. Однако чрезмерное увеличение времени экспозиции требует увеличения длины транспортной системы и усложняет конструктивное исполнение установки. Установлено, что рациональный интервал времени экспозиции составляет 15–25 с (рис. 9).

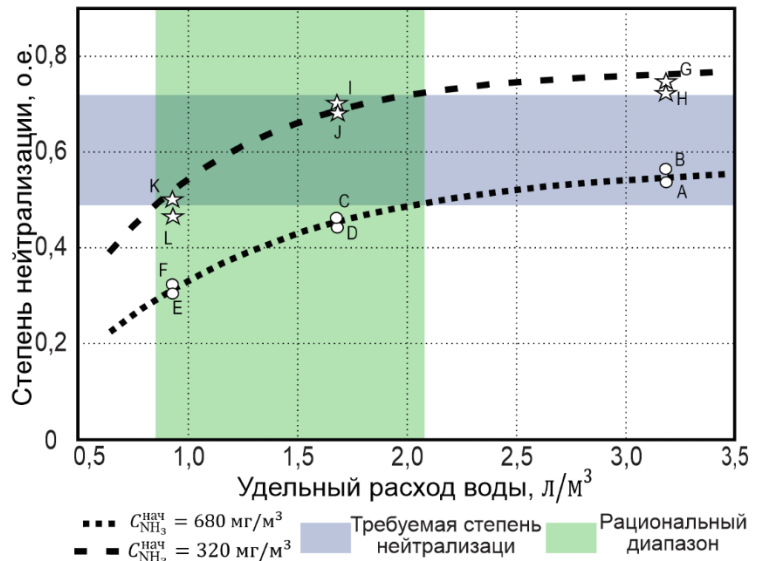


Рисунок 8 – Зависимость эффективности улавливания NH₃ в скруббере от удельного расхода абсорбента

$$\eta_{пл}(t) = 0,548 \cdot (1 - e^{-2,203t}) \quad (7)$$

$$\eta_{ок}(t) = 0,191 \cdot \ln(1 + 0,157t) \quad (8)$$

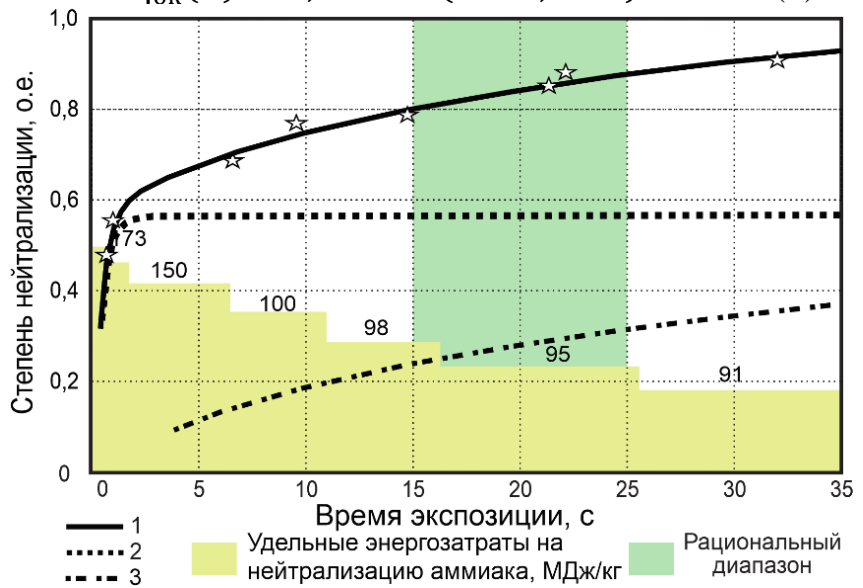


Рисунок 9 – Зависимость степени нейтрализации NH₃ от времени экспозиции: 1-математическая модель плазмохимической стадии, 2- математическая модель плазменной стадии, 3 – математическая модель стадии доокисления в транспортном канале

Установлена зависимость степени нейтрализации аммиака от отношения начальных концентраций озона к аммиаку (рис. 10). При концентрации аммиака 50–100 мг/м³ интегральный показатель эффективности нейтрализации составляет 0,63–0,80, тогда как при более высоких концентрациях аммиака 200–420 мг/м³ он снижается до 0,31–0,49 при соотношении озона к аммиаку 0,75–0,86, что указывает на дефицит окислительных агентов.

При повышении исходной концентрации аммиака требуемая глубина нейтрализации обеспечивается

либо увеличением удельного расхода воды на предварительной абсорбционной стадии, либо повышением массового соотношения озона к аммиаку.

Для количественной оценки влияния исходного состава газовой смеси на эффективность плазмохимической нейтрализации аммиака выполнен регрессионный анализ. В качестве независимых переменных использованы начальные концентрации аммиака и озона, а также массовое отношение $x_m^{эфф} = \frac{[O_3]}{[NH_3]}$ интерпретируемое как интегральный показатель обеспеченности процесса окислителем.

Зависимость эффективности нейтрализации аммиака от отношения начальных концентраций озона к аммиаку получена с использованием модели Хилла (9).

Анализ результатов, позволил установить рациональное массовое соотношение озона к аммиаку, 2–3 о.е.

Проведены исследования влияния температуры пластины генератора ДБР (рис. 11). Установлено, что при температуре выше 100 °С возникает перегрев, приводящий к деструкции озона и разрушению диэлектрика вследствие различия коэффициентов температурного расширения керамики и металлической подложки. При

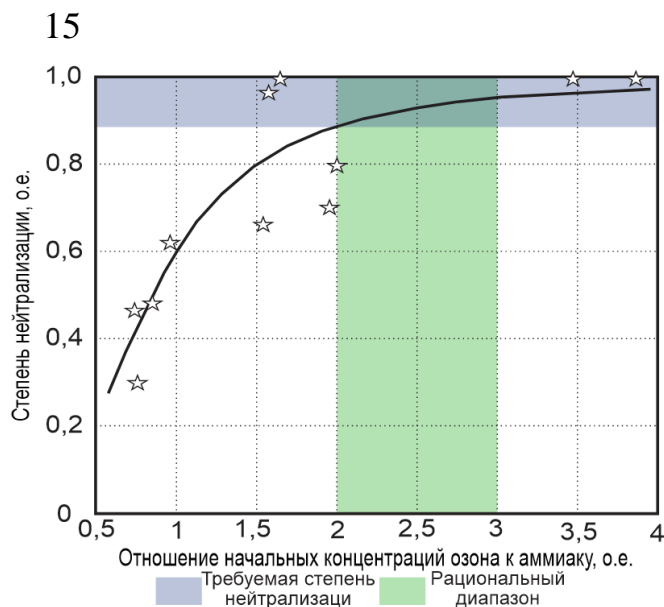


Рисунок 10 – Зависимость эффективности нейтрализации NH₃ от отношения озона к NH₃

$$\eta(x_m) = \frac{(x_m^{эфф})^{2,5}}{0,85^{2,5} + (x_m^{эфф})^{2,5}} \quad (9)$$

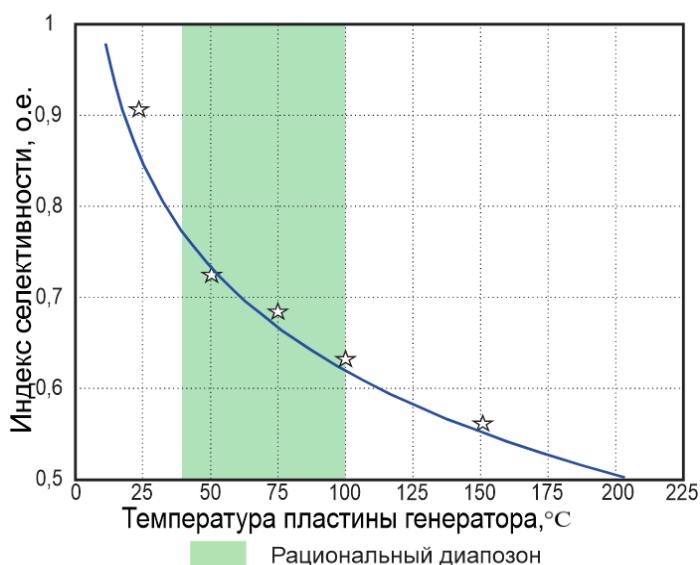


Рисунок 11 – Зависимость индекса селективности генератора от температуры излучателя

температуре ниже 30 °С возможно образование конденсата. Рациональный диапазон температур составляет 30–100 °С.

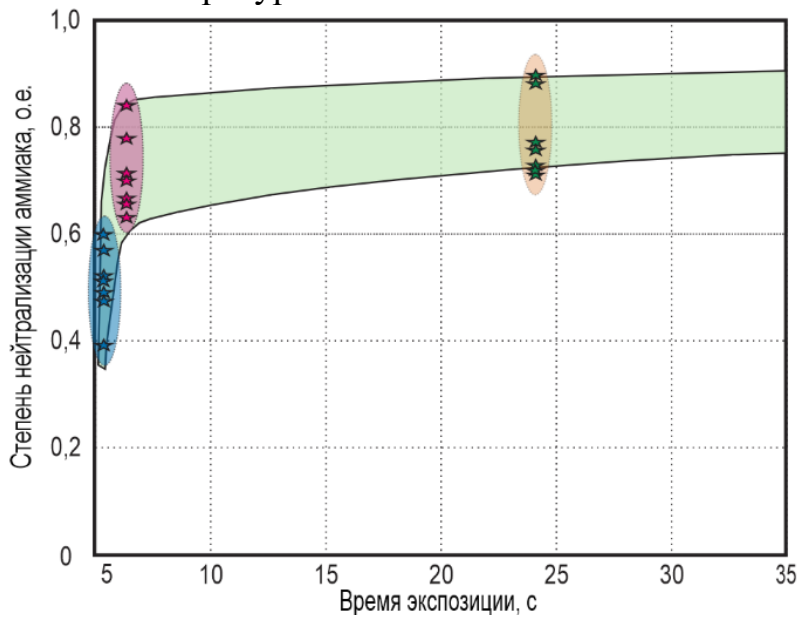


Рисунок 12 – Верификация математической модели комбинированного способа нейтрализации аммиака

Анализ результатов показал соответствие параметров и результатов экспериментальных исследований значениям, расчётных значений, полученных по математической модели процесса нейтрализации аммиака (уравнения 6–8). Множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,82–0,89 (рис. 12).

Математическая модель комбинированного способа нейтрализации аммиака сформирована по результатам исследований, вы-

полненных на лабораторных установках № 1 и № 2 по отдельным стадиям процесса. Верификацию модели выполняли по результатам исследований на экспериментальной установке № 4 в производственных условиях.

Выбор рациональных параметров работы комбинированной установки нейтрализации осуществлялся на основе нечёткой системы вывода Мамдани. Анализ результатов позволил определить область рациональных параметров в координатах «генерация озона – расход воды» (рис. 13).

Установлено, что рациональная область соответствует производительности по озону 4–12 кг/ч и расходу воды 12–24 м³/ч. Репрезентативными параметрами режима являются расход воды 16,5 м³/ч и производительность по озону 5,17 кг/ч, при которых остаточная концентрация аммиака на выходе составляет 16 мг/м³, а суммарная эффективность нейтрализации достигает 0,97. Полученные значения обеспечивают нормативно требуемый уровень очистки отходящих газов при приемлемом соотношении между глубиной нейтрализации и эксплуатационными затратами

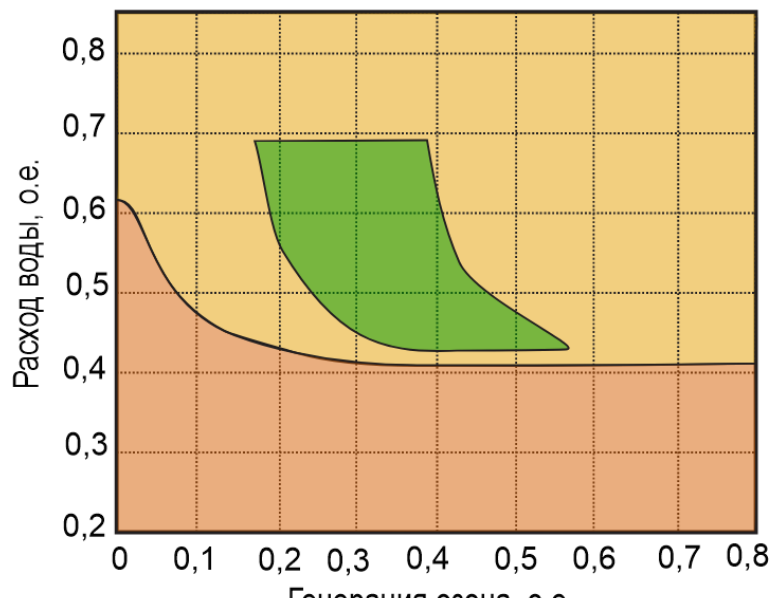


Рисунок 13 – Область рациональных параметров нейтрализации аммиака в координатах «генерация озона – расход воды»: 1 – недостаточная степень нейтрализации NH_3 ; 2 – высокие затраты на нейтрализацию; 3 – область рациональных параметров

В пятой главе приведены результаты экономической и энергетической оценки разработанного комбинированного способа нейтрализации отходящих газов ферментера птицефабрики производительностью 300 т органических отходов в месяц. Оценка выполнена по стандартным методикам (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнительная оценка затрат на нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов при скрубберном, плазмохимическом и комбинированном способах, тыс. руб/год

Статья затрат	Скрубберная	Скрубберная с инактивацией	Плазмохимическая	Комбинированная
Реагенты	29 809–36 433	29 809–36 433	0	0
Электроэнергия	3 213–3 927	7 775–9 503	37 145–45 399	18 637–22 779
Выплаты за водоотведение	675–825	675–825	0	675–825
Амортизация	2 250–2 750	4 500–5 500	6 975–8 525	5 963–7 288
Зарботная плата	1 170–1 430	1 170–1 430	1 170–1 430	1 170–1 430
Экологический сбор	59–73	16–20	23–28	5–6
Ежегодные издержки,	38 348–46 870	45 016–55 020	43 835–53 576	26 449–32 327
Стоимость нейтрализации кг аммиака	750–920	885–1 080	860–1 050	520–635

Экономическая оценка выявила существенное преимущество предложенного комбинированного способа: эксплуатационные затраты при традиционных двухступенчатых скрубберных системах составляют 885–1080 руб/кг нейтрализованного аммиака, тогда как для комбинированной схемы они находятся в пределах 520–635 руб/кг. Таким образом, разработанный способ позволяет снизить эксплуатационные расходы более чем в 1,5 раза за счёт уменьшения потребности в реагентах и электроэнергии при одновременном обеспечении нормативной степени нейтрализации ОГ.

Расчётные значения прямых энергозатрат на нейтрализацию аммиака составили 140–160 МДж/кг аммиака при энергоёмкости генерации озона 34 кВт·ч/кг. Полученные значения подтверждают, что комбинированная технология обеспечивает снижение энергопотребления по сравнению с традиционными плазмохимическими системами и по уровню энергозатрат сопоставима с традиционными скрубберными системами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача разработки и обоснования комбинированного способа нейтрализации аммиака в отходящих газах ферментера на основе последовательного сочетания абсорбционной обработки и плазмохимического воздействия

1. Аммиак является приоритетным токсичным компонентом отходящих газов ферментера, по концентрации которого целесообразно оценивать эффективность исследуемых способов нейтрализации. Анализ существующих технологий нейтрализации газовых выбросов ферментера показал, что

традиционная двухступенчатая реагентная скрубберная схема обладает приемлемой эффективностью, однако характеризуется высокими эксплуатационными издержками. Основная доля затрат связана с потреблением соляной кислоты и едкого натра. Перспективным направлением является плазмохимический способ нейтрализации, позволяющий снизить экологический ущерб и зависимость от химических реагентов.

2. Обоснован способ нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов, включающий: комбинацию водяной абсорбции и дополнительной плазмохимической обработки, позволяющий перераспределить нагрузку между стадиями: в водяном скруббере улавливается до 50–70 % аммиака, а оставшиеся часть эффективно нейтрализуется активными формами кислорода и оксидами азота. Данный способ обеспечивает достижение требуемой степени нейтрализации при снижении затрат примерно в два раза по сравнению с скрубберной схемой при сопоставимом технологическом эффекте

3. Разработана математическая модель комбинированного процесса нейтрализации аммиака, учитывающая последовательное протекание стадий водной абсорбции, плазмохимической деструкции и доокисления в осадительной камере (транспортный канал). Верификация разработанной модели показала, удовлетворительную сходимость: коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,85–0,9$, средняя ошибка приближения составляла 10–15 %.

4. Определены рациональные параметры работы комбинированной установки. Для абсорбционной стадии рациональными являются температура жидкости не более 15–30 °С, удельный расход абсорбента (воды/ ОГ) 0,7–2 л/м³. Для плазмохимической стадии установлены: скорость плазмообразующего газа 0,8–1,0 м/с и поддержание температуры диэлектрической пластины не более 100 °С, что обеспечивает устойчивую генерацию. При соотношении озона к аммиаку $\geq 2,5$ достигается подавление до 90–99 % остаточного аммиака.

5. Установлены рациональные режимные параметры работы систем нейтрализации ОГ ферментера. Для условий предприятия (производительность ферментера 15 т/сут, расход отходящих газов 15 260 м³/ч) при концентрации аммиака в ОГ 500–600 мг/м³ обеспечивается снижение концентрации аммиака до нормируемых значений при генерации ферментерами 7–9 кг аммиака /ч. Расход абсорбента (вода) составил 12–18 м³/ч, требуемая производительность плазмохимической установки по озону 4–12 кг/ч и время пребывания на стадии доокисления (в транспортном канале) 21–26 с. Интегральный коэффициент эффективности нейтрализации аммиака для указанных условий составляет 0,97.

6. Определены энергетические и технико-экономические показатели процесса нейтрализации токсичных компонентов отходящих газов и обоснована целесообразность предложенного варианта: для комбинированной схемы удельные энергозатраты составляют 156–160 МДж/кг. Прямые эксплуатационные затраты составляют 520–635 Р/кг аммиака (для сравнения: скрубберная технология — 867–1250 Р/кг аммиака, плазмохимическая технология — 860–1050 Р/кг аммиака). Оценка экологического ущерба показала, что применение предложенного способа позволит существенно снизить нагрузку на биосферу.

Рекомендации производству

Разработанный комбинированный способ нейтрализации аммиака в отходящих газах может быть рекомендован к использованию на сельскохозяйственных предприятиях, применяющих аэробную ферментацию органических отходов. Его внедрение обеспечивает снижение выбросов аммиака до нормативного уровня, уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду и повышение эффективности систем газоочистки.

Перспективы дальнейших исследований

Скрубберная технология на современном этапе характеризуется высокой степенью инженерной отработанности: основные конструктивные схемы и режимы массопереноса детально изучены, а потенциал повышения эффективности в рамках традиционной абсорбции в значительной степени исчерпан. Плазмохимическая технология, напротив, относится к числу развивающихся направлений и обладает существенным потенциалом совершенствования. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией источников разряда, снижением затрат на генерацию озона, совершенствованием геометрии реакционной зоны и управлением составом активных частиц, что может обеспечить повышение селективности и глубины нейтрализации аммиака при снижении удельных затрат.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Делягин В. Н., Леонов С. В., Некрасов М. Ю., Кондратьев А. А., Карзанов А. Н. Использование низкотемпературной плазмы для обеззараживания открытых поверхностей производственных помещений // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53. – № 11. – С. 121–129.

2. Делягин В. Н., Некрасов М. Ю., Леонов С. В., Карзанов А. Н., Кондратьев А. А., Делягина Н. И. Оценка эффективности подавления аммиака в воздушных средах производственных помещений с использованием барьерного разряда // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2024. – Т. 71. – № 1 (54). – С. 49–56. – DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-49-56.

3. Некрасов М. Ю., Делягин В. Н., Кондратьев А. А., Леонов С. В. Использование низкотемпературной плазмы в процессах инактивации подстилочного материала // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2025. – Т. 55. – № 10 (323). – С. 109–118.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных изданиях:

4. Delyagin V. N., Ivanov N. M., Karzanov A. N., Bocharov V. N., Kondrat'ev A. A. Use of low-temperature plasma for stabilizing a combustion process under the utilization of waste products with high moisture content // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 941. – Art. 012054. – DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012054.

Патент Российской Федерации

5. Делягин В. Н., Леонов С. В., Некрасов М. Ю., Кондратьев А. А., Иванов Н. М. Способ нейтрализации токсичных газов из воздуха, удаляемого из животноводческого помещения: пат. RU 2809452 С1 Рос. Федерация. – Заявл. 28.02.2023; опубл. 11.12.2023. – Заявка № 2023104708.

Публикации в других изданиях

6. Делягин В.Н. Некрасов М.Ю. А.Н. Карзанов Бочаров В.И. Делягина Н.И. Кондратьев А.А. Комплексное термическое обеззараживание и утилизация органосодержащих отходов, находящихся в различных агрегатных состояниях // Международного научно-практического форума, посвященного 90-летию СибНИИСХ, 5-летию ФГБНУ «Омский АНЦ»

7. Илюшов Н. Я., Кондратьев А. А. Влияние способа барботирования на дезинфекцию воды озоном // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. – 2024. – № S6. – С. 392–396.

8. Кондратьев А. А., Делягин В. Н., Некрасов М. Ю. Определение рациональных параметров режима работы двухступенчатого скруббера в системе очистки отходящих газов биореактора // Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве: сборник научных докладов Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 45-летию ФГБНУ ВНИИТиН (Тамбов, 01–02 окт. 2025 г.). Тамбов: Студия печати Галины Золотовой, 2025. С. 317–320.

9. Делягин В.Н. Некрасов М.Ю. Кондратьев А.А. Леонов С.В. Бочаров В.И. Повышение эффективности работы плазмохимических установок систем нейтрализации отходящих газов ферментера // Инженерное обеспечение сельского хозяйства: проблемы, достижения, перспективы: материалы II Международной научно-практической конференции, посвящённой 75-летию инженерного факультета Алтайского ГАУ. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2025.

10. Кондратьев А.А. Некрасов М.Ю. Делягин В.Н. Рациональные режимы работы реакционной колонны в процессах дезодорации и диссоциации аммиака в отходящих газах ферментера с использованием низкотемпературной плазмы // Инженерное обеспечение сельского хозяйства: проблемы, достижения, перспективы: материалы II Международной научно-практической конференции, посвящённой 75-летию инженерного факультета Алтайского ГАУ. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2025.