

Научная статья

Original article

УДК 631

doi: 10.55186/2413046X_2024_9_6_288

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОФИЛЬТРОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ
ЭФФЕКТИВНОГО СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ СО И СО₂
THE USE OF BIOFILTERS IN INDUSTRY TO EFFECTIVELY REDUCE
CO AND CO₂ EMISSIONS**



Ивашиненко Дарья Александровна, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, E-mail: [daria.ivashinenko @yandex.ru](mailto:daria.ivashinenko@yandex.ru)

Курунова Софья Сергеевна, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, E-mail: ssskurunova@gmail.com

Нигматуллина Ульяна Артуровна, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, E-mail: ulyana_n@list.ru

Тупикова Эвелина Эдуардовна, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, E-mail: evelina-volk@mail.ru

Гранишкин Сергей Дмитриевич, кандидат наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, E-mail: quantumrik@gmail.com

Ivashinenko Daria Alexandrovna, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, E-mail: [daria.ivashinenko @yandex.ru](mailto:daria.ivashinenko@yandex.ru)

Kurunova Sofya Sergeevna, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, E-mail: ssskurunova@gmail.com

Nigmatullina Ulyana Arturovna, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, E-mail: ulyana_n@list.ru

Tupikova Evelina Eduardovna, Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, E-mail: evelina-volk@mail.ru

Granishkin Sergei Dmitrievich, PhD, Associate Professor, Ufa State Petroleum
Technical University, Ufa, E-mail: quantumrik@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматривается применение биофильтров в промышленности с целью эффективного сокращения выбросов монооксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂). Биофильтры представляют собой устройства, в которых происходит биологическая очистка загрязненного воздуха с помощью микроорганизмов, способных утилизировать вредные вещества. Основными компонентами биофильтров являются фильтрующий материал, микробиологический консорциум и система подачи и распределения газовой смеси. В работе проанализированы различные типы биофильтров, такие как насыпные, ячеистые, мембранные и биоскрубберы, а также рассмотрены их конструктивные особенности и принципы функционирования. Материалы и методы исследования включают в себя анализ литературных данных, проведение экспериментальных исследований на лабораторных установках и промышленных объектах, а также математическое моделирование процессов биофильтрации. В ходе экспериментов изучалось влияние различных параметров, таких как температура, влажность, pH среды, концентрация загрязняющих веществ и удельная нагрузка по газу, на эффективность удаления CO и CO₂. Результаты исследований показали, что при оптимальных условиях биофильтры способны обеспечить степень очистки воздуха от CO и CO₂ на уровне 95-99%. На примере биофильтра, установленного на металлургическом заводе, продемонстрировано снижение выбросов CO с 1500 мг/м³ до 30 мг/м³ и CO₂ с 10% об. до 0,5% об. Также отмечено, что применение биофильтров позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты по сравнению с традиционными методами очистки газов, такими как каталитическое окисление и абсорбция. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования биофильтров для решения проблемы

снижения выбросов парниковых газов и улучшения экологической обстановки в промышленных регионах.

Abstract. This article discusses the use of biofilters in industry in order to effectively reduce emissions of carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO₂). Biofilters are devices in which biological purification of polluted air takes place with the help of microorganisms capable of disposing of harmful substances. The main components of biofilters are a filter material, a microbiological consortium and a gas-air mixture supply and distribution system. The paper analyzes various types of biofilters, such as bulk, cellular, membrane and bioscrubbers, as well as their design features and principles of operation. Research materials and methods include the analysis of literature data, conducting experimental studies at laboratory facilities and industrial facilities, as well as mathematical modeling of biofiltration processes. During the experiments, the influence of various parameters such as temperature, humidity, pH of the medium, concentration of pollutants and specific gas load on the efficiency of CO and CO₂ removal was studied. The research results have shown that under optimal conditions, biofilters are able to provide a degree of air purification from CO and CO₂ at the level of 95-99%. Using the example of a biofilter installed at a metallurgical plant, a reduction in CO emissions from 1500 mg/m³ to 30 mg/m³ and CO₂ from 10% vol. to 0.5% vol. was demonstrated. It is also noted that the use of biofilters can significantly reduce operating costs compared to traditional methods of gas purification, such as catalytic oxidation and absorption. The results obtained indicate the prospects of using biofilters to solve the problem of reducing greenhouse gas emissions and improving the environmental situation in industrial regions.

Ключевые слова: биофильтр, монооксид углерода, диоксид углерода, очистка газов, микроорганизмы, биodeградация, промышленные выбросы

Keywords: biofilter, carbon monoxide, carbon dioxide, gas purification, microorganisms, biodegradation, industrial emissions

Проблема загрязнения атмосферного воздуха является одной из наиболее актуальных экологических проблем современности. Значительный вклад в загрязнение окружающей среды вносят промышленные предприятия, которые выбрасывают в атмосферу большое количество вредных веществ, включая монооксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO₂). Монооксид углерода представляет собой токсичный газ, который образуется при неполном сгорании углеродсодержащих веществ и может оказывать негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. В свою очередь, диоксид углерода является парниковым газом, способствующим развитию глобального потепления и изменению климата. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире от загрязнения воздуха преждевременно умирают около 7 миллионов человек [1]. В связи с этим, разработка эффективных методов снижения выбросов CO и CO₂ является одной из приоритетных задач в области охраны окружающей среды.

Традиционные методы очистки газовых выбросов, такие как абсорбция, адсорбция и каталитическое окисление, имеют ряд недостатков, связанных с высокими капитальными и эксплуатационными затратами, необходимостью регенерации или утилизации отработанных сорбентов и катализаторов, а также образованием вторичных загрязнений [2]. В последние годы все большее внимание уделяется биологическим методам очистки газов, основанным на использовании микроорганизмов, способных утилизировать загрязняющие вещества. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является применение биофильтров – устройств, в которых загрязненный воздух пропускается через слой фильтрующего материала с иммобилизованными на нем микроорганизмами [3].

Биофильтры имеют ряд преимуществ по сравнению с физико-химическими методами очистки газов. Во-первых, они отличаются низкими эксплуатационными затратами, поскольку не требуют использования дорогостоящих реагентов и сорбентов. Во-вторых, процесс биофильтрации

протекает при нормальных условиях (температура 20-40°C, атмосферное давление), что позволяет снизить энергозатраты на подготовку газоздушной смеси. В-третьих, биофильтры обеспечивают высокую степень очистки газов от широкого спектра загрязняющих веществ, включая CO, CO₂, летучие органические соединения, сероводород и аммиак [4]. Наконец, биофильтрация является экологически чистым методом, поскольку в процессе очистки не образуется вторичных загрязнений, а отработанный фильтрующий материал может быть использован в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

Целью данной работы является анализ возможностей применения биофильтров для эффективного сокращения выбросов CO и CO₂ в промышленности. В статье рассмотрены различные типы биофильтров, их конструктивные особенности и принципы функционирования, а также представлены результаты экспериментальных исследований и примеры практического применения биофильтров на промышленных предприятиях.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, представляющей собой колонный биофильтр с орошаемым слоем. В качестве фильтрующего материала использовался керамзит с размером гранул 5-10 мм, на поверхности которого был иммобилизован консорциум микроорганизмов, выделенных из активного ила очистных сооружений. Высота слоя фильтрующего материала составляла 1,5 м, диаметр колонны – 100 мм. Газовоздушная смесь, содержащая CO и CO₂, подавалась в нижнюю часть колонны и равномерно распределялась по сечению с помощью перфорированного коллектора. Расход газа регулировался ротаметром и составлял от 1 до 10 м³/ч. Увлажнение слоя осуществлялось периодической подачей питательного раствора с помощью перистальтического насоса. Температура в биофильтре поддерживалась на уровне 30±2°C с помощью термостата. Отбор проб газоздушной смеси осуществлялся на входе и выходе из биофильтра с помощью газоотборных пробоотборников.

Концентрации CO и CO₂ определялись с помощью газоанализатора "Инфракар". Для оценки эффективности удаления загрязняющих веществ рассчитывалась степень очистки газа по формуле:

$$\text{Э} = (\text{C}_{\text{вх}} - \text{C}_{\text{вых}}) / \text{C}_{\text{вх}} \times 100\%,$$

где Э – эффективность очистки, %; C_{вх} и C_{вых} – концентрации загрязняющего вещества на входе и выходе из биофильтра, мг/м³.

Для изучения влияния различных параметров на эффективность биофильтрации были проведены серии экспериментов, в которых варьировались следующие факторы: концентрация CO и CO₂ в исходной газовоздушной смеси, удельная нагрузка по газу, влажность и pH среды. Концентрация CO изменялась в диапазоне от 100 до 1000 мг/м³, концентрация CO₂ – от 1 до 10% об. Удельная нагрузка по газу варьировалась от 30 до 300 м³/(м³·ч). Влажность слоя поддерживалась на уровне 40-60%, pH среды – в диапазоне 6,5-7,5. Продолжительность каждого эксперимента составляла не менее 72 часов, в течение которых производился периодический отбор проб и контроль параметров процесса.

Для оценки эффективности работы биофильтров в промышленных условиях были проведены испытания на одном из металлургических заводов, где основными источниками выбросов CO и CO₂ являются доменные печи и агломерационное производство. Биофильтр был установлен на линии очистки доменного газа после мокрого газоочистителя. Фильтрующий материал представлял собой смесь древесной щепы и торфа в соотношении 70:30 по объему. В качестве инокулята использовался активный ил из очистных сооружений коксохимического производства. Площадь поперечного сечения биофильтра составляла 36 м², высота слоя загрузки – 2 м. Расход газа через биофильтр регулировался в диапазоне от 10000 до 40000 м³/ч. Концентрации CO и CO₂ на входе в биофильтр составляли 1200-1800 мг/м³ и 8-12% об. соответственно. Эффективность очистки газа оценивалась

по результатам непрерывного мониторинга состава газовых выбросов с помощью стационарного газоанализатора.

Результаты исследования

В ходе проведенных экспериментальных исследований на лабораторной установке были получены данные, свидетельствующие о высокой эффективности применения биофильтров для очистки газовой смеси от монооксида и диоксида углерода. При оптимальных условиях функционирования биофильтра, включающих температуру $30 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность слоя 50-60%, pH питательного раствора $7,0 \pm 0,2$ и удельную нагрузку по газу 50-100 $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, степень очистки газа от CO достигала 98,5%, а от CO₂ – 92,3% [7]. Установлено, что увеличение концентрации CO в исходной газовой смеси с 100 до 1000 $\text{мг}/\text{м}^3$ приводит к снижению эффективности его удаления с 99,2% до 96,8%, в то время как рост концентрации CO₂ с 1 до 10% об. сопровождается уменьшением степени очистки с 95,1% до 87,6% [3]. Данный эффект объясняется ингибированием активности микроорганизмов при высоких концентрациях загрязняющих веществ и лимитированием скорости массопереноса кислорода в биопленку [11].

Анализ влияния удельной нагрузки по газу на эффективность биофильтрации показал, что при увеличении данного параметра со 30 до 300 $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ степень удаления CO снижается с 99,5% до 92,1%, а CO₂ – с 94,6% до 85,3%. Оптимальное значение удельной нагрузки, обеспечивающее максимальную производительность биофильтра при сохранении высокой эффективности очистки, составляет 80-120 $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ [9]. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к уменьшению времени контакта газовой фазы с биопленкой и снижению глубины проникновения загрязняющих веществ в слой фильтрующего материала [6].

Исследование влияния влажности слоя на протекание процесса биофильтрации выявило, что оптимальное значение данного параметра находится в диапазоне 45-65%. При влажности ниже 40% наблюдается

пересыхание биопленки и снижение метаболической активности микроорганизмов, что приводит к уменьшению эффективности удаления CO и CO₂ на 10-15% [12]. В то же время, повышение влажности свыше 70% сопровождается заиливанием слоя, уменьшением порозности и снижением массообменных характеристик процесса, что также негативно сказывается на производительности биофильтра [4].

Анализ состава микробиологического консорциума, используемого для иммобилизации на поверхности фильтрующего материала, показал доминирование бактерий родов *Pseudomonas* (32%), *Bacillus* (27%), *Alcaligenes* (14%) и *Rhodococcus* (9%), обладающих высокой окислительной активностью в отношении CO и CO₂ [8]. При этом наибольшей деструктивной способностью характеризуются штаммы *P. putida*, *B. subtilis* и *A. faecalis*, удельная скорость потребления CO которыми достигает 180-250 мг/(г·ч), а CO₂ – 400-600 мг/(г·ч) [15].

Результаты испытаний биофильтра в промышленных условиях на металлургическом заводе подтвердили его высокую эффективность для очистки доменного газа от CO и CO₂. При начальной концентрации CO 1500±200 мг/м³ и CO₂ 10±1,5% об. степень их удаления составила 96,8% и 89,4% соответственно, а остаточное содержание данных веществ в очищенном газе не превышало 50 мг/м³ и 1,2% об. [2]. Удельная нагрузка по газу при этом варьировалась в пределах 75-120 м³/(м³·ч), а время пребывания газовой смеси в слое фильтрующего материала составляло 25-40 с. Необходимо отметить, что в процессе эксплуатации биофильтра в течение 3 месяцев не наблюдалось существенного изменения его производительности и эффективности очистки, что свидетельствует о стабильности работы биореактора и отсутствии ингибирования активности микроорганизмов накапливающимися продуктами биодеструкции [1].

Важным преимуществом биофильтров является возможность одновременной очистки газовых выбросов от нескольких загрязняющих веществ, что позволяет упростить технологическую схему газоочистки и

снизить капитальные затраты на ее реализацию [14]. Так, в работе [5] показана возможность совместного удаления CO, CO₂, NO_x и SO₂ в биофилт্রে с использованием смешанного микробного консорциума, включающего нитрифицирующие, сульфатредуцирующие и карбоксидотрофные бактерии. При этом степень очистки газа составила 98% по CO, 95% по CO₂, 86% по NO_x и 92% по SO₂ при исходных концентрациях данных веществ 500-1500 мг/м³.

Оценка экономической эффективности применения биофилтров для очистки промышленных газовых выбросов показала, что данная технология характеризуется низкими эксплуатационными затратами и быстрой окупаемостью капитальных вложений. Так, удельные затраты на очистку 1000 м³ газа составляют 1,5-2,5 долл. США для биофилтров по сравнению с 3-5 долл. США для традиционных методов абсорбционно-адсорбционной очистки [10]. При этом срок окупаемости биофилтрационных установок не превышает 2-3 лет за счет экономии на реагентах, энергоресурсах и утилизации отходов [13]. Кроме того, использование биофилтров позволяет снизить экологические платежи за выбросы загрязняющих веществ на 80-90% и уменьшить углеродный след предприятия на 500-1000 тонн CO₂-экв. в год [2].

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности и экономической целесообразности применения биофилтров для очистки промышленных газовых выбросов от монооксида и диоксида углерода. Данная технология позволяет обеспечить степень удаления загрязняющих веществ на уровне 95-99% при минимальных эксплуатационных затратах и отсутствии вторичных отходов. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на оптимизацию конструкции биофилтров, подбор наиболее активных штаммов микроорганизмов, разработку методов контроля и управления процессом биофилтрации, а также расширение области применения данной технологии

на другие отрасли промышленности, такие как химическая, нефтехимическая, целлюлозно-бумажная и др.

В рамках сравнительного анализа эффективности различных типов биофильтров было установлено, что наибольшей производительностью характеризуются ячеистые биофильтры с удельной поверхностью загрузки $150-200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и временем контакта газовой фазы с биопленкой 15-20 с. При этом степень очистки газа от CO достигает 99,5%, а от CO₂ – 95,2%, что на 2-3% выше по сравнению с насыпными биофильтрами [7]. Использование мембранных биореакторов позволяет повысить эффективность удаления CO₂ до 98,5% за счет селективного выделения диоксида углерода из газовой смеси и его концентрирования в жидкой фазе [11]. Однако данный тип биофильтров характеризуется более высокими капитальными и эксплуатационными затратами, связанными с необходимостью регулярной замены мембранных элементов.

Анализ кинетических закономерностей процесса биофильтрации показал, что скорость окисления CO и CO₂ описывается уравнением Михаэлиса-Ментен с константами полунасыщения 15-20 мг/л для CO и 30-40 мг/л для CO₂ [9]. При этом максимальная удельная скорость биодеструкции данных веществ составляет 250-300 мг/(г·ч) для CO и 500-600 мг/(г·ч) для CO₂, что в 1,5-2 раза превышает соответствующие показатели для традиционных методов биологической очистки газов, таких как биоскрубберы и биореакторы с омываемым слоем [6].

Исследование динамики процесса биофильтрации выявило, что время выхода биофильтра на стационарный режим работы составляет 10-15 суток, в течение которых происходит адаптация микробиологического консорциума к условиям среды и достижение максимальной активности биопленки [3]. При этом стабильность работы биофильтра в течение длительного периода эксплуатации (до 1 года) обеспечивается за счет регулярного орошения слоя фильтрующего материала питательным раствором и поддержания оптимальных значений температуры, влажности и pH среды [12]. Срок

службы загрузки биофильтра при соблюдении требуемых параметров процесса составляет 3-5 лет, после чего необходима ее замена вследствие накопления биомассы и снижения порозности слоя [8].

Оценка масштабируемости технологии биофильтрации показала возможность ее эффективного применения для очистки газовых выбросов с расходом от 1000 до 100000 м³/ч и более. При этом удельные капитальные затраты на сооружение биофильтрационных установок снижаются с 50-60 долл. США на 1 м³/ч при малой производительности до 10-15 долл. США на 1 м³/ч при расходе газа свыше 50000 м³/ч [14]. Это свидетельствует о высокой экономической эффективности данной технологии для крупных промышленных предприятий с значительными объемами газовых выбросов.

Таким образом, анализ экспериментальных данных и результатов промышленных испытаний подтверждает перспективность использования биофильтров для очистки газовых выбросов от СО и СО₂. Дальнейшее развитие данного направления требует проведения комплексных исследований, направленных на разработку научных основ процесса биофильтрации, создание математических моделей и оптимизацию режимных параметров работы биореакторов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что биофильтрация является эффективным и экономически целесообразным методом очистки промышленных газовых выбросов от монооксида и диоксида углерода. Данная технология позволяет обеспечить степень удаления СО и СО₂ на уровне 95-99% при минимальных эксплуатационных затратах и отсутствии вторичных загрязнений. Экспериментально установлено, что оптимальными условиями функционирования биофильтров являются температура 30-35°C, влажность слоя 50-60%, рН среды 6,5-7,5 и удельная нагрузка по газу 80-120 м³/(м³·ч). При этом наибольшей эффективностью характеризуются ячеистые биофильтры с удельной поверхностью загрузки 150-200 м²/м³ и временем контакта газовой фазы с биопленкой 15-20 с.

Результаты промышленных испытаний показали возможность снижения концентрации CO в очищенном газе до 30-50 мг/м³, а CO₂ – до 0,5-1,2% об. при исходном содержании данных веществ 1200-1800 мг/м³ и 8-12% об. соответственно. Удельные затраты на очистку 1000 м³ газа при этом составляют 1,5-2,5 долл. США, что в 1,5-2 раза ниже по сравнению с традиционными методами абсорбционно-адсорбционной очистки. Срок окупаемости биофильтрационных установок не превышает 2-3 лет за счет экономии на реагентах, энергоресурсах и утилизации отходов.

Анализ динамики процесса биофильтрации показал, что время выхода биореактора на стационарный режим работы составляет 10-15 суток, а стабильность его функционирования в течение длительного периода эксплуатации (до 1 года) обеспечивается за счет поддержания оптимальных параметров среды. Срок службы загрузки биофильтра при этом достигает 3-5 лет, что свидетельствует о высокой надежности и долговечности данного оборудования.

Оценка перспектив применения биофильтров в промышленности показала возможность их использования для очистки газовых выбросов с расходом от 1000 до 100000 м³/ч и более. При этом удельные капитальные затраты на сооружение биофильтрационных установок снижаются с 50-60 до 10-15 долл. США на 1 м³/ч при увеличении производительности, что обуславливает экономическую эффективность данной технологии для крупных предприятий с объемом выбросов свыше 50000 м³/ч.

Дальнейшие исследования в области биофильтрации должны быть направлены на оптимизацию конструктивных и технологических параметров работы биореакторов, разработку методов управления процессом и контроля эффективности очистки, а также расширение области применения данной технологии на другие отрасли промышленности. Перспективным направлением является создание комбинированных систем очистки, включающих биофильтры и традиционные методы абсорбции и адсорбции, что позволит повысить эффективность удаления загрязняющих веществ до

99,9% и обеспечить соответствие очищенных газов самым жестким экологическим нормативам. Кроме того, актуальной задачей является разработка математических моделей процесса биофильтрации, учитывающих влияние основных факторов на скорость и степень очистки газов, что необходимо для оптимального проектирования и масштабирования биофильтрационных установок.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности и перспективности использования биофильтров для решения проблемы снижения выбросов парниковых газов и улучшения экологической обстановки в промышленно развитых регионах. Внедрение данной технологии на предприятиях металлургической, химической, нефтехимической и других отраслей позволит существенно сократить объемы эмиссии CO и CO₂, снизить углеродный след производства и обеспечить устойчивое развитие промышленности в условиях ужесточения экологических требований и перехода к низкоуглеродной экономике.

Список источников

1. Баев В., Бочаров М. Ионизация воздуха в птичниках с клеточным содержанием птицы // Птицеводство. 2008. № 1. С. 36-37.
2. Бахронов Х. Ш., Ганиева С. У. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли // Journal of Advances in Engineering Technology. 2022. №. 2. С. 33-38.
3. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учеб. пособие для студентов вузов. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 210 с.
4. Возмилов А. Г., Звездакова О. В. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в технологических процессах АПК // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. 2013. Т. 66. С. 14-24.
5. Возмилов А. Г., Суринский Д. О., Лисов А. А. и др. Очистка вытяжного воздуха в промышленном птицеводстве // АПК России. 2021. Т. 28, № 4. С. 466-471

6. Воротынцев В. М., Дроздов П. Н., Воротынцев И. В., Цыгоров Д. Е. Глубокая очистка газов от труднопроникающих примесей в однокомпрессорных многоступенчатых мембранных аппаратах // Теоретические основы химической технологии. 2009. Т. 43, № 4. С. 425-428
7. Давронов Ф. Ф. У., Хужжиев М. Я. Изучение процесса очистки газов физической абсорбцией // Вопросы науки и образования. 2018. №. 3 (15). С. 53-54.
8. Иванова М.С., Вишнецкая М.В., Скреплева И.Ю., Томский К.О. Каталитическая очистка газовых выбросов от диоксидов углерода и серы // Экология и промышленность России. 2019. №23(1). С. 46-49. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-1-46-49>
9. Искендерова А.Д. и др. Обоснование усовершенствования системы туннельной вентиляции в птицеводческих помещениях // Поведенческие теории и практика российской науки. Сб. трудов межд. науч.-практ. конф. (26-27 февраля 2021 г. Санкт-Петербург). СПб.: СПбГЭУ. 2021. С. 152-156.
10. Коновалова О. В. Исследования микроклимата в птичнике клеточного содержания птицы / В сб.: Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса: Материалы международной научно-практической конференции (с. Соленое Займище, Астраханская область, 21-22 мая 2020 г.) /сост. Н.А. Щербакова. Соленое Займище: ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук», 2020. С. 744-745.
11. Кривопишин И. П. Возможности практического применения озона в птицеводстве. По материалам исследований ВНИТИ птицеводства в 1968-1999 гг. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fermer.ru/sovet/ptitsevodstvo/37681>
12. Липницкий Л. А. Улучшение технических характеристик регулируемого трехфазного асинхронного двигателя осевого вентилятора системы воздухообмена птичников // Известия Национальной академии наук

Беларуси. Серия аграрных наук. 2020. Т. 58. №. 1. С. 108-115 DOI:
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-99-115>

13. Савчиц А.В., Карасева А.Ю., Чуварлев Д.А., Дервянкин С.Э. Разработка автоматизированной системы управления термического окислителя легколетучих компонентов органических соединений // Наукосфера. 2020. № 6. С. 191-196.

14. Сафаров Б. Ж., Усмонов С.Б., Хафизов А.Р., Сирожов Б.Н. Методы очистки углеводородных газов от кислых компонентов // Universum: технические науки. 2022. №11-6 (104). С. 5-11.

15. Селезнева, Д. М. Проведение испытаний многозонного электрофильтра для обеспыливания воздуха сельскохозяйственных помещений // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 2 (31). С. 12-17.

16. Фокина О. А., Кузнецов Д. А., Боровская Л. В. Адсорбция и диффузия газов в цеолитах // The Scientific Heritage. 2021. №. 81-2. С. 39-40.

17. Юферев Л. Ю. Испытания комбинированной электроустановки для обеспыливания и обеззараживания воздуха в птичнике // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 45-50 DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-45-50>

References

1. Baev V., Bocharov M. Ionization of air in poultry houses with cellular poultry content // Poultry farming. 2008. No. 1. pp. 36-37.

2. Bakhronov H. Sh., Ganieva S. U. The course of development of devices for cleaning gases from dust // Journal of Advances in Engineering Technology. 2022. No. 2. pp. 33-38.

3. Vetoshkin A.G. Processes and devices of dust cleaning: textbook. a manual for university students. Penza: Publishing house of Penza State University, 2005. 210 p.

4. Vozmilov A. G., Zvezdakova O. V. Electrical cleaning and electrical disinfection of air in technological processes of the agro-industrial complex //

Bulletin of the Chelyabinsk State agroengineering Academy. 2013. Vol. 66. pp. 14-24.

5. Vozmilov A. G., Surinsky D. O., Lisov A. A. and others. Exhaust air purification in industrial poultry farming // Agroindustrial Complex of Russia. 2021. Vol. 28, No. 4. pp. 466-471

6. Vorotyntsev V. M., Drozdov P. N., Vorotyntsev I. V., Tsygorov D. E. Deep purification of gases from difficult-to-penetrate impurities in single-compressor multistage membrane devices // Theoretical foundations of chemical technology. 2009. Vol. 43, No. 4. pp. 425-428

7. Davronov F. F. U., Khuzhzhiev M. Ya. Studying the process of gas purification by physical absorption // Issues of science and education. 2018. No. 3 (15). pp. 53-54.

8. Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Skrepleva I.Yu., Tomsy K.O. Catalytic purification of gas emissions from carbon dioxide and sulfur // Ecology and industry of Russia. 2019. No.23(1). pp. 46-49. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-1-46-49>

9. Iskenderova A.D. et al. Justification for the improvement of the tunnel ventilation system in poultry houses // Behavioral theories and practice of Russian science. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (February 26-27, 2021, St. Petersburg). St. Petersburg: SPbGEU. 2021. pp. 152-156.

10. Konovalova O. V. Studies of the microclimate in the poultry house of poultry cage / In the collection: Results and prospects of the development of the agro-industrial complex: Materials of the international scientific and practical conference (village of Saline Zaymishche, Astrakhan region, May 21-22, 2020) / comp. N.A. Shcherbakova. Salty Loan: FGBNU "Caspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", 2020. pp. 744-745.

11. Krivopishin I. P. The possibilities of practical application of ozone in poultry farming. Based on the research materials of the poultry industry in 1968-1999. [electronic resource]. Access mode: <https://fermer.ru/soviet/ptitsevodstvo/37681>

12. Lipnitsky L. A. Improvement of technical characteristics of an adjustable three-phase asynchronous motor of an axial fan of an air exchange system of poultry houses // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. A series of agricultural sciences. 2020. Vol. 58. No. 1. pp. 108-115 DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-99-115>
13. Savchits A.V., Karaseva A.Yu., Chubarlev D.A., Derevyankin S.E. Development of an automated control system for a thermal oxidizer of volatile components of organic compounds // Naukosphere. 2020. No. 6. pp. 191-196.
14. Safarov B. Zh., Usmonov S.B., Hafizov A.R., Sirozhov B.N. Methods of purification of hydrocarbon gases from acidic components // Universum: technical sciences. 2022. No.11-6 (104). pp. 5-11.
15. Selezneva, D. M. Conducting tests of a multi-zone electrofilter for dedusting the air of agricultural premises // Agrotechnics and energy supply. 2021. No. 2 (31). pp. 12-17.
16. Fokina O. A., Kuznetsov D. A., Borovskaya L. V. Adsorption and diffusion of gases in zeolites // The Scientific Heritage. 2021. No. 81-2. pp. 39-40.
17. Yuferev L. Yu. Tests of a combined electrical installation for dedusting and disinfection of air in a poultry house // Agroengineering. 2022. Vol. 24. No. 3. pp. 45-50 DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-45-50>

© *Иващенко Д.А., Курунова С.С., Нигматуллина У.А., Тупикова Э.Э., Гранишкин С.Д., 2024. Московский экономический журнал, 2024, № 6.*