

EDN: PHJYHJ

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110



Научная статья

УДК 66.074.5;631.86;628.353



## Техническое решение для очистки выбросов климатически активных газов

**Александр Юрьевич Брюханов,**  
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: sznii@yandex.ru;

**Эдуард Вадимович Васильев,**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: sznii6@yandex.ru;  
**Семен Алексеевич Егоров,**  
ведущий инженер, e-mail: simon723132@yandex.ru

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** С повышением спроса на продовольственную продукцию и ростом объемов сельскохозяйственного производства увеличивается количество образуемых отходов и побочных продуктов, в том числе в отраслях животноводства. К способам утилизации побочных продуктов животноводства относится интенсивная переработка в установках различного типа, в том числе с применением процессов биодеструкции. Однако данный процесс связан с активным образованием выбросов углекислого газа, метана, закиси азота, аммиака. Для предотвращения негативного воздействия на окружающую среду предлагается внедрить систему очистки газовоздушных выбросов в линию переработки побочных продуктов животноводства. *(Цель исследования)* Разработать систему очистки выбросов климатически активных газов, в частности, аммиака, образующихся при интенсивной переработке биотехнологическим методом побочных продуктов животноводства. *(Материалы и методы)* С учетом свойств основных загрязняющих веществ определили возможные методы их удаления из выбросов. К таким методам относится сухая, мокрая, конденсационная и биологическая очистка. Наиболее оптимальным и эффективным выбран способ биоочистки. *(Результаты и обсуждение)* Разработали техническое решение для очистки газовоздушных выбросов в биофильтре с полимерным и органическим наполнителем. Предусмотрена цифровая система контроля и управления рабочим процессом. Особенностью предложенной конструкции является применение сменных фильтрующих картриджей и активной системы орошения. *(Выводы)* Определили основные параметры образующихся выбросов и методы их очистки. Очистка выбросов с цифровой системой контроля и управления рабочим процессом осуществляется последовательно в кожухотрубчатом конденсаторе и биофильтре. Удельная поверхность охлаждения равна  $1,09 \cdot 10^{-3}$  квадратного метра на 1 метр кубический, удельный расход хладагента – 0,7 литров на 1 кубический метр. Установлены оптимальные параметры среды при очистке в биофильтре: температура 30 градусов Цельсия, влажность 45-55 процентов, показатель активной кислотности 8-8,4 единиц, время нахождения в фильтрующем слое 15-30 секунд. Данные параметры обеспечивают высокую степень очистки по аммиаку при длительной эксплуатации биофильтра.

**Ключевые слова:** животноводство, побочные продукты, интенсивная переработка, биотехнологические методы, выбросы, климатически активные газы, аммиак, очистка выбросов, конденсатор, биофильтр.

■ **Для цитирования:** Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А. Техническое решение очистки выбросов климатически активных газов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110. EDN: PHJYHJ.

Scientific article

## Technical Solution for Purifying Emissions of Climate-Active Gases

**Alexander Yu. Briukhanov,**  
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian  
Academy of Sciences, chief researcher,  
e-mail: sznii@yandex.ru;

**Eduard V. Vasilev,**  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: sznii6@yandex.ru;  
**Semen A. Egorov,**  
lead engineer,  
e-mail: simon723132@yandex.ru

Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The rising demand for food products and subsequent increase in agricultural production leads to heightened quantities of waste and by-products, particularly within the livestock industry. Traditional methods of livestock by-product disposal encompass intensive processing, including biodestruction processes. However, these processes tend to generate significant emissions of climate-active gases such as carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and ammonia. To mitigate environmental impacts, it is proposed to integrate an advanced gas-air emission purification system into the existing livestock by-product processing lines. (*Research purpose*) The objective is to develop a system for purifying emissions of climate-active gases, particularly ammonia, produced during the intensive biotechnological processing of livestock by-products. (*Materials and methods*) Based on the properties of the primary pollutants, possible methods for their removal from emissions were determined. Such methods include dry, wet, condensation, and biological treatment. The biopurification method was selected for its efficacy and optimal performance. (*Results and discussion*) As a technical solution, a sequential gas-air emission purification process was developed using biofilters equipped with a polymer carrier and organic substrates as fillers. The system is equipped with digital sensors for monitoring and controlling the operational workflow. A special feature of the proposed system design is the use of replaceable filter cartridges and an active irrigation system. (*Conclusions*) The research helped to identify main types, parameters and methods for purifying emissions of climate-active gases with a focus on ammonia. Emission purification with a digital workflow control system is carried out sequentially in a shell-and-tube condenser and a biofilter. The specific cooling surface is  $1.09 \cdot 10^{-3}$  square meters per 1 cubic meter, the specific refrigerant consumption is 0.7 liters per 1 cubic meter. Optimal biofilter performance was attained at the temperature of 30 degrees Celsius, with 45-55 percent humidity, active acidity of 8-8.4 units, and residence time of 15-30 seconds in the filter layer. These conditions ensure a high degree of ammonia purification and long-term biofilter operation.

**Keywords:** livestock farming, by-products, intensive processing, biotechnological methods, emissions, climate-active gases, ammonia, emission treatment, emission purification, condenser, biofilter.

**For citation:** Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A. Technical solution for purifying emissions of climate-active gases. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18.N2. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110. EDN: PHJYHJ.

Для повышения эффективности агропромышленного комплекса активно внедряются интенсивные технологии. Нарастивание выпуска продукции приводит к увеличению количества образуемых отходов, которые необходимо утилизировать или переработать. Ежегодное количество таких отходов превышает 450 млн т, большая их часть приходится на навоз и помет, а на переработку и использование поступает около 200 млн т [1].

К способам утилизации побочных продуктов животноводства относится их интенсивная переработка в удобрение путем биоферментации [2]. В сравнении с пассивной переработкой, такой как длительное выдерживание или компостирование, значительно сокращается продолжительность утилизации с 3-6 месяцев до 6-8 суток. Ускорение процесса достигается за счет принудительной аэрации и перемешивания смеси в биореакторах различного типа.

Однако интенсификация процесса приводит к активному образованию выбросов, которые загрязняют атмосферу токсичными веществами и распространяют неприятный запах. Вариантом снижения негативного влияния на окружающую среду может быть внедрение системы очистки выбросов в технологическую схему переработки отходов.

**Цель исследования** – разработать систему очистки выбросов, образующихся при интенсивной переработке побочной продукции животноводства в биореакторной установке барабанного типа.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** При разработке системы очистки первоочередной задачей является определение свойств образующихся в результате биогенерации выбросов, состава загрязняющих веществ, а также физических параметров, в частности, температуры и влажности.

В процессе аэробной ферментации органические вещества побочных продуктов животноводства минерализуются [3]. При правильном протекании ферментации, когда перерабатываемая смесь достаточно рыхлая и к ней поступает необходимое количество кислорода (воздуха), в выходящий из биореактора газовоздушный поток попадают углекислый газ, аммиак и закись азота [4]. На углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) приходится основной объем загрязняющих веществ в выбросах. Его концентрация составляет от 5 до 25% об. от общего воздушного потока [5].

К токсичным загрязняющим веществам относятся соединения азота, выделяемые преимущественно в виде аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [6]. На  $\text{NH}_3$  в среднем приходится 60-90% общего количество азота в выбросах, на  $\text{N}_2\text{O}$  – 5-25% [7]. Также в выбросах может присутствовать свободный азот ( $\text{N}_2$ ) в пределах 1-5% от общей массы азотных соединений [8]. Концентрация  $\text{NH}_3$  может составлять  $100-1000 \text{ мг/м}^3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  –  $30-300 \text{ мг/м}^3$  [9].

При уплотнении исходной перерабатываемой смеси в биореакторе могут образоваться крупные комки, в которые ограничивается поступление кис-

лорода. В таких зонах начинают развиваться анаэробные микроорганизмы и выделяются токсичные газы метан, сероводород, метил- и этилмеркаптаны [10].

Образование метана ( $\text{CH}_4$ ) зависит от подготовки смеси к переработке, а также от режима работы биоферментатора. Чаще всего количество  $\text{CH}_4$  в выбросах незначительное, в пределах 10-60 мг/м<sup>3</sup>. Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), метил- и этилмеркаптаны ( $\text{MeSH}$ ,  $\text{EtSH}$ ) практически не образуются при переработке побочных продуктов животноводства [11]. В более значимых количествах они выделяются при переработке смеси, в состав которой входит органическая составляющая твердых бытовых отходов [10].

Во время интенсивной переработки побочных продуктов животноводства в биореакторе барабанного типа температура смеси достигает 65-75°C, влажность среды при загрузке составляет 50-60%. Температура и влажность потока газовых выбросов составляют 60-70°C и 50-55%.

Для выбора способа удаления из выбросов загрязняющих веществ проведен анализ методов очистки. Так как основные загрязняющие компоненты выбросов – это аммиак, закись азота и метан, то в качестве возможных рассматривались сухой, мокрый, конденсационный и биологический методы очистки.

Единственным способом сухой газоочистки для эффективного удаления данных веществ является адсорбция [12]. Однако этот вариант достаточно дорогостоящий из-за высокой стоимости адсорбента, к тому же отработанный адсорбент тоже необходимо утилизировать. Немаловажный фактор заключается и в требовании к влажности поступающих в адсорбер выбросов.

Аппараты мокрой очистки более удобные. В них загрязняющие вещества растворяются в рабочей жидкости (абсорбенте) при прохождении через нее газовой смеси. В качестве рабочей жидкости обычно используется вода, в нее могут добавляться агенты, усиливающие взаимодействие с загрязняющим веществом. Мокрая очистка отлично подходит для обработки выбросов с высокой концентрацией и большим количеством различных соединений. Но обеспечение постоянного движения большого объема воды приводит к высоким энергозатратам. Кроме этого абсорберы достаточно трудоемкие в обслуживании.

Конденсационный метод применяют при повышенной температуре выбросов. Суть заключается в выделении из воздуха паров на рабочей поверхности конденсатора и переходе загрязняющих веществ из газовой смеси в жидкое. Поверхность аппарата, где происходит конденсация, дополнительно охлаждают. Чаще всего конденсаторы применяют на первом этапе удаления основ-

ной части загрязняющих веществ, а также для охлаждения газовых выбросов перед их доочисткой.

В последние 30 лет активно развиваются биологические методы очистки [13]. Их принцип основан на способности микроорганизмов преобразовывать широкий спектр загрязняющих веществ до конечных нетоксичных соединений, таких как углекислый газ и вода. Известно, что микроорганизмы утилизируют аммиак, сероводород, метан, толуол ( $\text{C}_7\text{H}_8$ ) и многие другие соединения [14]. Чаще всего биофильтр представляет собой емкость, на ее дне расположены воздухопроводы для подачи газовой смеси. Над воздухопроводами расположен носитель (насадка) – фильтрующий слой, в котором находятся микроорганизмы. В качестве фильтрующего слоя используют природные материалы, такие как торф, кокосовое волокно, опилки, солому. Эти материалы обладают высокой пористостью, а также содержат различные минеральные вещества, необходимые для жизнедеятельности микроорганизмов.

Преимущества биофильтров:

- долговечность носителя (при поддержании оптимальных условий);
  - высокая производительность по объему очищаемого воздуха;
  - безотходность (при использовании в качестве носителя природных материалов);
  - низкое энергопотребление;
- недостатки:
- крупные габариты (при использовании классической конструкции, без активных систем поддержания влажности);
  - зависимость эффективности очистки от внешних факторов;
  - сложность в обслуживании (при использовании классической конструкции).

Биофильтры применяются для очистки воздуха из помещений, где содержатся животные, на водоочистных станциях, комплексах по сортировке и переработке твердых бытовых отходов [15].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** На основе проведенного исследования, а также анализа отечественной и зарубежной патентной базы разработано технологическое решение для очистки выбросов климатически активных газов с цифровой системой контроля и управления рабочим процессом. Схема очистки представлена на рисунке.

Поток выбросов в виде газовой смеси из воздуховода 1 поступает в конденсатор 2. Выбор кожухотрубчатого конденсатора обусловлен достаточно низким создаваемым аэродинамическим сопротивлением, а также более удобным способом удаления конденсата. В конденсаторе смесь охлаждается до 25-30°C и по воздуховоду 3 подается напорным вентилятором 4 в нижний модуль 5 филь-

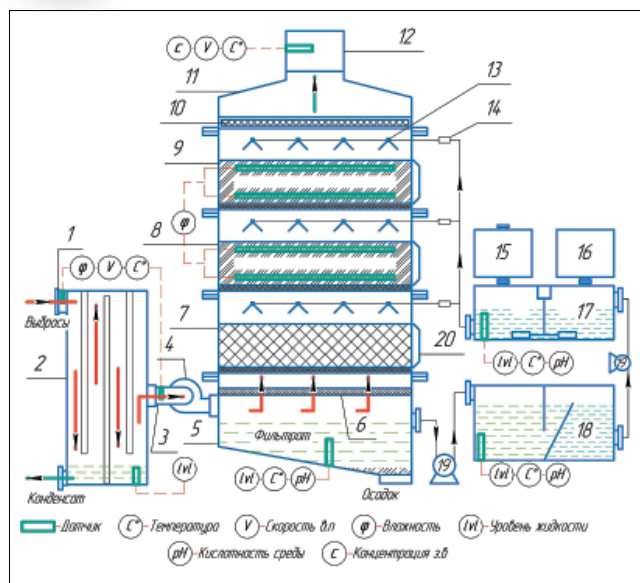


Рис. Технологическая схема очистки выбросов с системой контроля и управления

Fig. Technological scheme of an emission purification system with a digital workflow control and management system

традиционной колонны квадратного сечения. В этом модуле собирается сток (фильтрат), образуемый при орошении фильтрующих картриджей. В нижней части модуля предусмотрен уклон для облегчения удаления осадка. Для равномерного распределения потока по всей площади сечения фильтрационной колонны в нижнем модуле расположен рассеиватель 6 (перфорированная пластина).

Далее поток проходит через первый фильтрующий картридж 7 с полимерным носителем. Выбор полимерного наполнителя обусловлен тем, что на нем должно задерживаться 40-50% загрязняющих веществ [16]. В этом картридже наибольший объем абсорбированного аммиака преобразуется в нитрат. Скорость поступающего потока выбросов на первый картридж максимальная, что вызывает ускоренный вынос влаги с поверхности носителя [17]. В результате для поддержания процессов абсорбции и нитрификации требуется значительно больший расход жидкости, чем в верхних фильтрующих модулях 8 и 9. По этой причине в нижнем картридже нецелесообразно применять природные материалы, которые от влаги быстро уплотнятся и начнут разрушаться [18].

По конструкции фильтрующие картриджи аналогичны, но в двух верхних для более тонкой очистки от загрязняющих веществ предполагается использовать природный наполнитель. В верхнем модуле 11 колонны расположен каплеуловитель 10 для задержания и предотвращения уноса с воздушным потоком крупных капель при работе форсунок 13. Верхняя часть колонны сужается перед воздухоподом 12 очищенного воздуха.

Использование системы сменных фильтрующих картриджей облегчает обслуживание и замену носителя, а также подбор носителя под конкретный вид загрязняющих веществ и производительность системы очистки. Для замены картриджей предусмотрен люк 20.

Над всеми картриджами расположены линии форсунок 13, через которые распыляется питательный раствор, необходимый для развития микроорганизмов и утилизации ими загрязняющих веществ. Каждая линия оснащена электромагнитным клапаном 14 для раздельного включения форсунок и подачи точного количества жидкости. Активная система орошения позволит поддерживать оптимальную влажность носителя, благодаря чему удастся достигнуть высокой эффективности очистки по аммиаку при длительной эксплуатации.

Стекающий с картриджем фильтрат, собранный в нижнем модуле, перекачивается насосом 19 в бак денитрификации 18 и выдерживается до перехода основной части нитрата в азот. Очищенный от нитрата фильтрат передается в бак с жидкостью для орошения 17, и цикл использования жидкости в био-фильтре замыкается.

Бак 17 оборудован мешалкой для равномерного распределения в растворе минеральных веществ, поступающих из контейнера 16. Для точной подачи воды при приготовлении орошающей жидкости используется расширительный бак 15.

В результате теоретического исследования определены характеристики технической системы очистки выбросов. Для конденсатора это удельная поверхность охлаждения  $F_y$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) и удельный расход хладагента  $V_y$  ( $\text{л}/\text{м}^3$ ).

Использовалась методика расчета теплообменных аппаратов (Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. М.: Химия, 1991. 496 с.) при исходных данных:

- температура потока выбросов на входе в конденсатор  $T_{\text{квх}} = 60^\circ\text{C}$  и на выходе из него  $T_{\text{квых}} = 30^\circ\text{C}$ ;
- температура хладагента на входе в конденсатор  $T_{\text{вх}} = 15^\circ\text{C}$  и на выходе из него  $T_{\text{вых}} = 25^\circ\text{C}$ ;
- коэффициент теплопередачи  $k = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- влажность поступающих выбросов  $W = 50\%$ .

Необходимую площадь поверхности теплопередачи определили из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{cp}}} \cdot K, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка теплообменника, Вт;  $\Delta t_{\text{cp}}$  – средняя разность температур потоков,  $^\circ\text{C}$ ;  $K$  – коэффициент запаса мощности (площади) оборудования,  $K = 1,2$ .

Тепловая нагрузка

$$Q = G \cdot C_{ВЗ} \cdot (T_{КВХ} - T_{КВЫХ}), \quad (2)$$

где  $G$  – количество поступающих в конденсатор выбросов, кг/с;  $C_{ВЗ}$  – теплоемкость выбросов (воздуха с учетом температуры и влажности), Вт/(кг·°C).

Средняя разность температур потоков

$$\Delta t_{ср} = (\Delta t_{Б} - \Delta t_{М}) / \ln(\Delta t_{Б} / \Delta t_{М}), \quad (3)$$

где  $\Delta t_{Б}$  и  $\Delta t_{М}$  – большая и меньшая разность температур на концах теплообменника, °C.

Так как планируется прямоточное движение хладагента и выбросов, то большая разность температур определяется по формуле:

$$\Delta t_{Б} = T_{КВХ} - T_{ВВХ}, \quad (4)$$

а меньшая разность температур

$$\Delta t_{М} = T_{КВЫХ} - T_{ВВЫХ}. \quad (5)$$

С учетом исходных данных, удельная поверхность охлаждения

$$F_y = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot m^2/m^3.$$

Расход хладагента

$$V = 3.6 \cdot Q / (C_{ВД} \cdot (T_{ВВЫХ} - T_{ВВХ})), \text{ л/м}^3, \quad (6)$$

где  $C_{ВД}$  – теплоемкость воды, Вт/(кг·°C). С учетом исходных данных удельный расход хладагента  $V_y = 0,7 \text{ л/м}^3$ .

Определены оптимальные параметры среды, в которой происходит очистка в биофильтре:

- температура 30°C. При температуре среды ниже 20°C значительно замедляется развитие микроорганизмов и скорость биоразложения аммиака. При температуре выше 40°C нитрифицирующие микроорганизмы погибают;

- влажность среды 45-55%. При влажности менее 40% снижается абсорбционная способность и значительно тормозится процесс нитрификации. При влажности более 65% начинается переуплотнение носителя, повышается аэродинамическое сопротивление, что затрудняет доступ кислорода;

- кислотность среды 8-8,4 ед. pH. При кислотности ниже 7 и выше 8,8 ед. pH процесс нитрификации существенно замедляется. При pH ниже 6 и выше 9 ед. останавливается процесс нитрификации;

- длительность нахождения в фильтрующем слое 15-30 секунд. Этот параметр определяется отношением толщины всего фильтрующего слоя к скорости потока выбросов. При слишком высокой скорости потока загрязняющие вещества не успеют абсорбироваться на поверхности носителя: снижается эффективность очистки, ускоряется вынос влаги с поверхности носителя и увеличивается расход воды на поддержание нужного уровня влажности.

*Система контроля рабочих параметров очистки и управление процессом*

Для высокоэффективного удаления и разложения загрязняющих веществ необходимо поддерживать оптимальные рабочие параметры среды. Данный функционал обеспечивает цифровая система контроля и управления технологическим процессом очистки. Контроль рабочих параметров осуществляется с помощью датчиков.

Первый комплект датчиков (скорости  $V_{ВП}$ , влажности  $\phi$  и температуры  $C^\circ$ ) расположен на входе потока в конденсатор и выходе из него. Это необходимо для управления температурой хладагента и определения количества влаги на рабочей поверхности конденсатора. По этим данным в дальнейшем рассчитывается количество жидкости, подаваемой на форсунки орошения картриджа. В нижней части конденсатора установлен датчик уровня жидкости (lvl), по которому определяют необходимость удаления конденсата.

Следующий набор датчиков показателей фильтрата (lvl,  $C^\circ$  и pH) установлен в нижнем модуле фильтрационной колонны. По уровню жидкости определяется необходимость включения насоса для перекачки фильтрата в бак денитрификации. По pH фильтрата контролируется эффективность разложения загрязняющих веществ, а также регулируется количество подаваемых минеральных соединений в бак с жидкостью системы орошения и количество подаваемой жидкости на форсунки.

С помощью специальных датчиков во втором и третьем фильтрующих картриджах отслеживается влажность носителя. Без этих показателей невозможно определить, сколько жидкости требуется для орошения картриджей. Влажность носителя критически важно знать, так как планируется использование природного носителя (торф, коксовое волокно). Превышение влажности более чем на 10% от оптимального значения приведет к чрезмерному переуплотнению носителя и образованию анаэробных зон. Все это в совокупности повышает аэродинамическое сопротивление, а также ингибирует процесс нитрификации, снижая эффективность разложения загрязняющих веществ.

Датчики на выходе из биофильтра в воздуховод 12 контролируют скорость и температуру потока после его очистки. По скорости потока на входе в фильтрационную колонну и на выходе из нее определяется аэродинамическое сопротивление и по его динамике можно прогнозировать состояние носителя в верхних картриджах. Измерение температуры необходимо для контроля тепловой энергии выбросов, нужной для разогрева рабочей зоны биофильтра. Если ее недостаточно, то возможен дополнительный подогрев орошающей жидкости или установка нагревающего элемента в корпусе биофильтра.

| Таблица                                                                                                                 |                                                                   | Table            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------|
| Типы и места расположения датчиков контроля параметров<br>TYPES OF SENSORS FOR PARAMETER MONITORING AND THEIR LOCATIONS |                                                                   |                  |
| Показатель                                                                                                              | Тип датчика                                                       | Место установки* |
| Температура потока, °С                                                                                                  | Канальный датчик температуры и влажности воздуха (°С, $\varphi$ ) | 1, 3, 12         |
| Влажность потока, %                                                                                                     |                                                                   |                  |
| Скорость потока, м/с                                                                                                    | Датчик перепада давления воздуха                                  | 1, 3, 12         |
| Температура жидкости, °С                                                                                                | Погружной датчик pH и температуры воды (pH, °С)                   | 5, 17, 18        |
| Кислотность жидкости, ед. pH                                                                                            |                                                                   |                  |
| Уровень жидкости, мм                                                                                                    | Датчик уровня жидкости поплавковый (lvl)                          | 2, 5, 17, 18     |
| Влажность носителя, %                                                                                                   | Импедансный датчик влажности ( $\varphi$ )                        | 8, 9             |
| Концентрация загрязняющих выбросов, мг/м <sup>3</sup>                                                                   | Электрохимический датчик концентрации (C)                         | 12               |

\*Цифры соответствуют позициям на рисунке.

Также предполагается точка для отбора проб в выходном канале биофильтра с целью надзорного контроля. Использование автоматизированной системы отбора проб целесообразно на установках, рассчитанных на большую производительность, так как стоимость таких систем очень высокая и их применение на установках малых размеров будет нерентабельным.

Одинаковый набор датчиков (lvl, C°, pH) предполагается в баке денитрификации и баке с жидкостью для системы орошения. По уровню жидкости определяется момент включения перекачивающих насосов и подачи чистой воды. Контроль температуры необходим для поддержания денитрификации и при необходимости подогрева орошающей жидкости [18]. Контроль pH в баке денитрификации позволяет отслеживать процесс восстановления нитрата, а в баке с жидкостью для орошения определить количество минеральных соединений для добавления в раствор.

Типы датчиков и их расположение на технической схеме приведены в *таблице*.

#### Функционал системы:

- управление скоростью напорного вентилятора;
- управление перекачивающими насосами;
- управление электромагнитными клапанами форсунок;
- управление мешалкой в баке орошающей жидкости;
- управление клапаном подачи чистой воды в бак с орошающей жидкостью;
- управление заслонкой подачи минеральных веществ в бак с орошающей жидкостью;
- управление нагревающими элементами (при наличии).

**Выводы.** На основании анализа проведенных ранее исследований определены основные виды климатически активных газов в выбросах, образующихся при интенсивной переработке побочных продуктов животноводства. Выявлены наиболее эффективные методы очистки от углекислого газа, аммиака, закиси азота и метана, такие как сухая, мокрая, конденсационная и биологическая.

Предложена технико-технологическая схема очистки газовоздушных выбросов с цифровой системой контроля и управления рабочим процессом. Схема предполагает последовательную очистку в кожухотрубчатом конденсаторе и биофильтре. Особенно является конструкция биофильтра со сменными фильтрующими картриджами и активной системой орошения для поддержания влажности носителя в оптимальных пределах.

Предлагаемый вариант позволит достигнуть высокой эффективности очистки по аммиаку при длительной эксплуатации. Система сменных картриджей значительно снизит трудозатраты на обслуживание биофильтра, а также даст возможность подбирать тип носителя в зависимости от параметров выбросов. В совокупности это обеспечивает ускоренную разработку и внедрение системы очистки под различные задачи.

Для разработанной технической системы определены характеристики: удельная поверхность охлаждения  $F_y = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{м}^3$  и удельный расход хладагента  $V_y = 0,7 \text{ л/м}^3$ . Также определены оптимальные параметры среды, в которой происходит биологическая очистка от загрязняющих выбросов: температура 30°C, влажность 45-55%, активная кислотность 8-8,4 ед. pH, время нахождения в фильтрующем слое 15-30 секунд.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов Н.М. Развитие технологий, способов механизации и автоматизации очистки помещений от экскрементов и приготовления органических удобрений // *Техника и технологии в животноводстве*. 2023. N2(50). С. 92-100. DOI: 10.22314/27132064-2023-2-92.
2. Шалавина Е.В., Брюханов А.Ю., Васильев Э.В. и др.

- Биоферментация органических отходов свиноводческого комплекса в установке барабанного типа // *Аграрная наука*. 2020. №6. С. 51-56. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56.
3. Архипченко И.А., Бакина Л.Г., Брюханов А.Ю. и др. Трансформации микробного сообщества и органического субстрата при аэробной ферментации помета // *Экология и промышленность России*. 2020. N24(8). С. 22-27. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-8-22-27.
  4. Зеников В.И. Управление микробиологическими процессами технологии аэробной ферментации // *Техника и технологии в животноводстве*. 2023. N3(51). С. 83-86. DOI: 10.22314/27132064-2023-3-83.
  5. Bai M., Impraim R., Coates T. et al. Lignite effects on  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  emissions during composting of manure. *Journal of Environmental Management*. 2020. N271. 110960. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110960.
  6. Pan Y., Chang H., Song P. Effects of superphosphate as an additive on nutrient characteristics and  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions during pig manure composting. *Agronomy*. 2023. N13(560). DOI: 10.3390/agronomy13020560.
  7. Dhamodharan K., Sudharsan Varma V., Chitraichamy V. et al. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives. *Science of the Total Environment*. 2019. N695. 133725. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133725.
  8. Bao M., Cui H., Lv Ya. et al. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: Insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession. *Bioresource Technology*. 2023. N373. 128729. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128729.
  9. Zhu Zh., Li L., Dong H., Wang Yu. Ammonia and greenhouse gas emissions of different types of livestock and poultry manure during storage. *Transactions of the ASABE*. 2020. N63. 1723-1733. DOI: 10.13031/trans.14079.
  10. Hwang H.Y., Kim S.H., Shim J., Park S.J. Composting process and gas emissions during food waste composting under the effect of different additives. *Sustainability*. 2020. N12. 7811. DOI: 10.3390/su12187811.
  11. Li D., Yuan J., Ding J. et al. Effects of carbon/nitrogen ratio and aeration rate on the sheep manure composting process and associated gaseous emissions. *Journal of Environmental Management*. 2022. N323. 116093. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116093.
  12. Орлов В.А., Саймуллов А.В., Мельник О.В. Изучение процесса появления дурно пахнущих запахов в канализационных сетях и анализ средств их удаления // *Вестник МГСУ*. 2020. N15(3). С. 409-431. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431.
  13. Marycz M., Brillowska-Dabrowska A., Munoz R., Gebicki J. A state of the art review on the use of fungi in biofiltration to remove volatile hydrophobic pollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2022. N21(1). 225-246. DOI: 10.1007/s11157-021-09608-7.
  14. Usevičiūtė L., Baltrėnaitė-Gedienė E., Baltrėnas P., Dutta S. Acetone, xylene and ammonia removal enhancement in the biofilter packed with steam modified biochar. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2022. N30(3). 412-423. DOI: 10.3846/jeelm.2022.17412.
  15. Raj I., Vaidya A.N., Pandey R.A. et al. Recent advancements in the mitigation of obnoxious nitrogenous gases. *Journal of Environmental Management*. 2018. N205. 319-336. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.064.
  16. Vela-Aparicio D., Bautista C.J., Forero D. et al. Inoculation of compost biofilter for the simultaneous removal of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{NH}_3$  under transient conditions of gas concentration. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. N93. 157-162. DOI: 10.3303/CET2293027.
  17. Danila V.; Zagorskis A.; Januševičius T. Effects of water content and irrigation of packing materials on the performance of biofilters and biotrickling filters. A review. *Processes*. 2022. N10. 1304. DOI: 10.3390/pr10071304.
  18. Baltrėnas P., Janusevicius T., Zagorskis A. et al. Removal of ammonia by biofilters with straight and wavy lamellar plates. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020. N18. 1-10. DOI: 10.1007/s13762-020-02916-5.

## REFERENCES

1. Morozov N.M. Development of technologies, mechanization and automation's methods of premises from excrement cleaning and organic fertilizers' preparation. *Machinery and technologies in livestock*. 2023. N2(50). 92-100 (In Russian). DOI: 10.22314/27132064-2023-2-92.
2. Shalavina E.V., Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V. et al. Biofermentation of organic waste from a pig-breeding complex in a drum-type installation. *Agrarian Science*. 2020. N6. 51-56 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56.
3. Arkhipchenko I.A., Bakina L.G., Bruhanov A.Yu. et al. Transformation in the microbial community and of organic substrate during aerobic fermentation of manure. *Ecology and Industry of Russia*. 2020. N24(8). 22-27 (In Russian).
4. Zenikov V.I. Management of aerobic fermentation technologies' microbiological processes. *Machinery and technologies in livestock*. 2023. N3(51). 83-86 (In Russian). DOI: 10.22314/27132064-2023-3-83.
5. Bai M., Impraim R., Coates T. et al. Lignite effects on  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  emissions during composting of manure. *Journal of Environmental Management*. 2020. N271. 110960 (In English). DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110960.
6. Pan Y., Chang H., Song P. Effects of superphosphate as an additive on nutrient characteristics and  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions during pig manure composting. *Agronomy*. 2023. N13(2). 560 (In English). DOI: 10.3390/agronomy13020560.

7. Dhamodharan K., Sudharsan Varma V., Veluchamy C. et al. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives. *Science of the Total Environment*. 2019. N695. 133725 (In English). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133725.
8. Bao M., Cui H., Lv Ya. et al. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: Insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession. *Bioresource Technology*. 2023. N373. 128729 (In English). DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128729.
9. Zhu Zh., Li L., Dong H., Wang Yu. Ammonia and greenhouse gas emissions of different types of livestock and poultry manure during storage. *Transactions of the ASABE*. 2020. N 63. 1723–1733 (In English). DOI: 10.13031/trans.14079.
10. Hwang H.Y., Kim S.H., Shim J., Park S.J. Composting process and gas emissions during food waste composting under the effect of different additives. *Sustainability*. 2020. N12. 7811 (In English). DOI: 10.3390/su12187811.
11. Li D., Yuan J., Ding J. et al. Effects of carbon/nitrogen ratio and aeration rate on the sheep manure composting process and associated gaseous emissions. *Journal of Environmental Management*. 2022. N323. 116093 (In English). DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116093.
12. Orlov V.A., Saimullov A.V., Melnik O.V. A study of the process of malodor formation in sewer networks and analysis of methods for its elimination. *Vestnik MGSU*. 2020. N15(3). 409-431 (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431.
13. Marycz M., Brillowska-Dabrowska A., Munoz R., Gebicki J. A state of the art review on the use of fungi in biofiltration to remove volatile hydrophobic pollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2022. N21(1). 225-246 (In English). DOI: 10.1007/s11157-021-09608-7.
14. Usevičiūtė L., Baltrėnaitė-Gedienė E., Baltrėnas P., Dutta S. Acetone, xylene and ammonia removal enhancement in the biofilter packed with steam modified biochar. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2022. N30(3). 412-423 (In English). DOI: 10.3846/jeeim.2022.17412.
15. Raj I. Vaidya A.N., Pandey R.A. et al. Recent advancements in the mitigation of obnoxious nitrogenous gases. *Journal of Environmental Management*. 2018. N205. 319-336 (In English). DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.064.
16. Vela-Aparicio D., Bautista C.J., Forero D. et al. Inoculation of compost biofilter for the simultaneous removal of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> under transient conditions of gas concentration. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. N93. 157-162 (In English). DOI: 10.3303/CET2293027.
17. Danila V., Zagorskis A., Januševičius T. Effects of water content and irrigation of packing materials on the performance of biofilters and biotrickling filter. A review. *Processes*. 2022. N10. 1304 (In English). DOI: 10.3390/pr10071304.
18. Baltrėnas P., Janusevicius T., Zagorskis A. et al. Removal of ammonia by biofilters with straight and wavy lamellar plates. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020. N18. 1-10 (In English). DOI: 10.1007/s13762-020-02916-5.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Брюханов А.Ю. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;

Васильев Э.В. – определение методологии исследования, критический анализ и доработка решения, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Егоров С.А. – сбор и анализ материалов по теме исследования, составление начального варианта статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Briukhanov A.Yu. – scientific guidance, formulation of main goals and objectives of theoretical research, finalization of the text;

Vasilev E.V. – definition of research methodology, critical analysis and finalization of the solution, formation of general conclusions, final revision of the article;

Egorov S.A. – collecting and analyzing materials on the research topic, drafting the initial version of the article.

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

04.03.2024

19.04.2024