ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

## *ЖЫВЁЛАГАДОЎЛЯ І ВЕТЭРЫНАРНАЯ МЕДЫЦЫНА*

## *ANIMAL HUSBANDRY AND VETERINARY MEDICINE*

УДК 631.223.2:628.8
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-4-307-318

Поступила в редакцию 18.05.2026
Received 18.05.2026

**С. В. Вторый, В. В. Гордеев, С. В. Ковалёв, А. Д. Комоедов**

*Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Российская Федерация*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ ИЗ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОЛОДНЯКА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

**Аннотация.** Один из самых ответственных и сложных процессов в технологии содержания молочных коров – это воспроизводство стада, подразумевающее выращивание здорового молодняка крупного рогатого скота (КРС), который, в свою очередь, является источником климатически активных газов (КАГ). Представленные в отечественной и зарубежной научной литературе модели направлены на оценку выделения различных газов преимущественно от взрослого поголовья. Поэтому разработка модели расчета выбросов КАГ при выращивании молодняка крупного рогатого скота в условиях неопределенности, возникающей при формировании воздушной среды в животноводческом помещении, является актуальной. По результатам проведенных теоретических исследований предложена структурная схема оценки уровня выбросов климатически активных газов из помещений для содержания молодняка, ключевым элементом которой выступает математическая модель расчета этих эмиссий. В ее основу положены разработанные зависимости для расчета объемов выбросов $CO_2$, $CH_4$, $NH_3$ и $H_2S$ с учетом результатов мониторинга и технологических параметров. Экспериментальная информация формировалась на основе данных о параметрах воздушной среды помещения для выращивания молодняка КРС и внешней среды с применением специально спроектированной мобильной платформы многоуровневого контроля концентрации климатически активных газов. Были изучены параметры воздушной среды в помещении для содержания 518 гол. молодняка КРС в возрасте от 3,2 до 9,4 мес. Полученные данные позволили провести моделирование и расчет объемов выбросов климатически активных газов в зависимости от возраста животных. Выбросы в целом по исследуемому помещению составили: $CO_2$ – 781,0 кг/сут; $CH_4$ – 24,9 кг/сут; $NH_3$ – 1,1 кг/сут; $H_2S$ – 0,003 кг/сут. Полученные результаты будут использованы при разработке рекомендаций к технико-технологическим решениям по снижению эмиссии в окружающую среду климатически активных газов из животноводческих помещений для содержания молодняка КРС.

**Ключевые слова:** молодняк КРС, микроклимат, техническое средство, мобильная платформа, мониторинг, климатически активный газ, индикаторный газ, моделирование, модель

**Для цитирования:** Моделирование выбросов климатически активных газов из помещений для выращивания молодняка крупного рогатого скота / С. В. Вторый, В. В. Гордеев, С. В. Ковалёв, А. Д. Комоедов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 4. – С. 307–318. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-4-307-318

**Sergei V. Vtoryi, Vladislav V. Gordeev, Sergei V. Kovalev, Alexey D. Komoedov**

*Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM", Saint Petersburg, Tiarlevo Settl., Russian Federation*

# MODELING OF CLIMATE-ACTIVE GAS EMISSIONS FROM FACILITIES FOR YOUNG CATTLE REARING

**Abstract.** One of the most significant and complex processes in dairy farming is herd reproduction. This process involves rearing healthy calves and heifers, which, in turn, are a source of climate-active gases. The models from existing national and foreign scientific literature aim at assessing the release of various gases mainly from adult livestock. Therefore, it is important

to create a model for calculating emissions of climate-active gases in young cattle rearing under variable indoor air environment conditions. This theoretical research resulted in a structural scheme for estimating emission levels from young animal housing that is centered on a predictive mathematical model. The model incorporated previously developed relationships for calculating $CO_2$, $CH_4$, $NH_3$ and $H_2S$ emissions and integrated real-time data and operational parameters. A custom-designed mobile platform for multi-level concentration monitoring of climate-active gases recorded the indoor and outdoor air parameters of a young cattle rearing facility. The facility housed 518 young animals aged from 3.2 to 9.4 months. The data obtained were used to model and calculate the quantity of climate-active gas emissions depending on the age of the animals. Overall, the emissions in the studied facility were 781.0 kg/day for $CO_2$; 24.9 kg/day for $CH_4$; 1.1 kg/day for $NH_3$; and 0.003 kg/day for $H_2S$. These findings will be included in recommendations for engineering and technological solutions to mitigate gas emissions from young cattle housing systems.

**Keywords:** young cattle, indoor air quality, monitoring equipment, mobile platform, monitoring, climate-active gases, tracer gas, modeling, model

**For citation:** Vtoryi S. V., Gordeev V. V., Kovalev S. V., Komoedov A. D. Modeling of climate-active gas emissions from facilities for young cattle rearing. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 4, pp. 307–318 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-4-307-318

**Введение.** В настоящее время в связи с активным ростом населения планеты и при существенном улучшении качества жизни растет и спрос на продукцию животноводства, в особенности на молочные продукты. Для удовлетворения этого спроса на должном уровне требуется увеличение их производства за счет внедрения передовых интенсивных технологий, которые могут повлечь за собой значительное увеличение выбросов климатически активных газов (КАГ) – метана ($CH_4$), углекислого газа ($CO_2$), аммиака ($NH_3$) и сероводорода ($H_2S$), оказывающих негативную экологическую нагрузку на окружающую среду [1, 2].

Сокращение количества выбросов КАГ является проблемой мирового масштаба, над которой работают многочисленные группы исследователей. Задачи, которые ставят перед собой большинство из них, – это определение факторов, влияющих на уровень концентрации газов в помещении, и создание прогнозных и оценочных моделей выбросов, необходимых для разработки методов и стратегий повышения производства продукции КРС при значительном снижении экологической нагрузки [3–5].

Необходимость разработки эффективных методов и стратегий, направленных на снижение выбросов КАГ, с каждым годом приобретает все большую актуальность и в России. За последние годы на государственном уровне принят ряд законодательных и нормативных документов, регламентирующих и ограничивающих выбросы этих газов для различных секторов экономики. При этом расчет выбросов климатически активных газов от КРС, в частности парниковых, осуществляется в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[1]. Однако эти рекомендации не обеспечивают в полной мере возможность определения коэффициентов выбросов с учетом региональных особенностей [6].

В настоящее время при разработке новых моделей расчета и прогнозирования выбросов газов от животных ученые во всем мире включают в них индивидуальные параметры, что позволяет уточнять региональные значения, указанные в рекомендациях МГЭИК [7].

Так, в [8] предложен ряд моделей для прогнозирования коэффициентов суточного выброса метана и суммарных выбросов метана для молодняка голштинской породы разного возраста с использованием в качестве параметров массы животного и потребления сухого вещества корма (типичный рацион для коммерческих ферм Великобритании). Отмечается тесная зависимость между коэффициентами выбросов метана и массой животного. Средние значения суммарных выбросов метана составили: от рождения до 12 мес. – 36,2 кг; в возрасте от 13 до 24 мес. – 64,3 кг.

Целью работы японских ученых [9] была разработка моделей для прогнозирования выбросов метана, учитывающих физиологические признаки мясного скота, такие как потребление сухого вещества корма, количество усваиваемых питательных веществ и объем кормов. Отмечено, что добавление этих параметров немного увеличило значения коэффициентов выбросов $CH_4$, а полученные модели прогнозирования, использующие физиологические переменные, наиболее ак-

[1] Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 / Межправительств. группа экспертов по изменению климата; ред.: С. Игглестон [и др.]; пер. с англ. Хаяма: IGES, 2006. Т. 4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html (дата обращения: 04.05.2026).

туальны для расчета коэффициентов выбросов метана при кормлении КРС высококонцентрированными рационами, где содержание концентратов превышает 70 %.

Ученые из США [10] ставили перед собой задачи разработать базу данных животных, в рационе которых применяются пищевые добавки, и эмпирическую модель прогнозирования выбросов метана у молочного скота. В качестве основных параметров в модель были включены потребление сухого вещества корма и состав рациона, которые, как отмечено, обеспечили улучшенное прогнозирование.

Исследование [11], выполненное учеными из Португалии для разработки модели выбросов метана от бычков, включало оценку влияния замены традиционного рациона на рацион, в основу которого входили кукурузный силос и пивная дробина. Замена отразилась на потреблении сухого вещества и среднесуточном приросте массы животных – снижение на 13 и 15 % соответственно, а также на выбросе метана – зафиксирован рост на 59 % в сутки.

Выбросы аммиака и сероводорода также представляют собой значительную проблему, поскольку они наносят вред здоровью людей и животных, а также выступают одним из ключевых факторов образования мелкодисперсных частиц и загрязнения ими воздушной и водной сред [12]. Для контроля и снижения выброса аммиака в Латвии разработана имитационная модель оценки и прогнозирования его выбросов в цепочке управления навозом у молочного скота, которая рассчитывает (на основе имеющихся коэффициентов) и оценивает объемы газа на каждом этапе работы с навозом, начиная с технологии содержания животных [13]. Модель позиционируется как инструмент для сравнения влияния различных вариантов снижения выбросов аммиака и возможности их внедрения на национальном уровне. Подобное моделирование с разработкой методологии оценки выбросов аммиака из навоза КРС проведено и в Корее [14]. На основе полученных результатов разрабатываются кадастры, учитывающие годовые и региональные колебания выбросов аммиака.

Контроль параметров микроклимата в помещении является важной составляющей в управлении выбросами газов, так как этот процесс тесно связан с другими технологическими операциями. Ученые из Литвы, используя метод массового расхода воздуха, проводили исследование в аэродинамической трубе над навозом КРС с различным содержанием влаги [15]. В результате было установлено, что выделение аммиака из жидкого навоза составило (404 ± 13) мг/(м$^2$·ч), из полужидкого – (223 ± 11) мг/(м$^2$·ч), из твердого – (103 ± 7) мг/(м$^2$·ч), что связано с интенсивностью испарения влаги из навоза. По итогам выполненной работы получена зависимость выбросов аммиака от содержания сухого вещества в навозе.

В США была разработана модель для прогнозирования влияния препарата Lubabegron на снижение выбросов аммиака у крупного рогатого скота [16]. Выбросы определялись на основе измерения концентрации аммиака и скорости воздушного потока в непосредственной зоне нахождения животных. Согласно расчетам ожидаемый эффект от использования препарата в дозировке 5,5 мг в расчете на 1 кг сухого вещества корма составляет около 12 % снижения эмиссии аммиака.

Для расчета коэффициентов эмиссии и прогнозирования распространения климатически активных газов в животноводческом помещении может применяться трехмерное цифровое моделирование. Так, в работе [17] представлены параметрические модели формирования и перемещения газов с учетом меняющихся условий. Отмечается, что такой способ моделирования позволяет определить оптимальные точки мониторинга концентраций КАГ и направление воздушного потока сформировавшегося облака газа.

В рассмотренных работах были охарактеризованы технологии содержания и обслуживания КРС, оценены выбросы отдельно по каждому газу и общие выбросы в $CO_2$-экв. от крупного рогатого скота, предложены стратегии снижения ущерба окружающей среде. При этом опубликованное их разнообразие, полученное при различных условиях и при отсутствии стандартизированных методов измерения выбросов КАГ способствует неточности при сравнительном анализе отмеченных результатов [3, 18], а также снижает их применимость для оценки и прогнозирования в конкретных региональных и климатических условиях Российской Федерации. Также необходимо отметить, что большинство разработанных моделей, представленных в литературе, направлено на изучение связей выделения различных газов от взрослого скота, хранения и переработки навоза и не могут быть использованы при оценке выбросов из помещения для содержания

молодняка КРС, которые, в свою очередь, также являются источником климатически активных газов. Модели, позволяющие рассчитать выбросы КАГ из помещений для молодняка КРС, практически отсутствуют.

*Цель исследования* – разработать модель расчета выбросов КАГ при выращивании молодняка КРС в условиях неопределенности формирования воздушной среды в животноводческом помещении. В задачи входят разработка модели расчета выбросов КАГ при выращивании молодняка КРС, позволяющей проводить анализ негативного воздействия на окружающую среду в зависимости от применяемых технологий и выполнения технологических операций, с дальнейшей ее апробацией в производственных условиях.

**Материалы и методы.** Движение потоков воздуха в помещениях с естественной вентиляцией для содержания животных характеризуется как турбулентное, и для непосредственного измерения таких потоков нет современных технических средств. В этом случае на практике расчеты интенсивности воздухообмена выполняются с использованием метода индикаторного газа, в качестве которого используется $CO_2$ [19–21].

Методика исследований состоит из двух этапов: первый – экспериментальные исследования по измерению концентраций КАГ в поступающем и удаляемом воздухе; второй – определение интенсивности воздухообмена в помещении [22]. Методической основой являются ГОСТ Р 54857-2011[1] и положения, изложенные в патенте № 2477886[2], которые устанавливают методы определения объемного расхода воздуха, кратности воздухообмена и использования $CO_2$ в качестве индикаторного газа.

Экспериментальная информация формировалась на основе данных мониторинга параметров воздушной среды помещения для выращивания молодняка КРС и внешней среды. Для этих целей было изготовлено новое техническое средство – мобильная платформа многоуровневого мониторинга концентрации климатически активных газов в животноводческих помещениях [1], которое условно можно разделить на три составляющие (рис. 1):

1. Мобильная платформа – колесная тележка (1) и установленный на ней блок регистрации (2), основными элементами которого являются два электронных регистратора и две аккумуляторные батареи с суммарным выходным напряжением 24 В.




Рис. 1. Общий вид мобильной платформы многоуровневого мониторинга концентрации климатически активных газов в животноводческом помещении: *1* – колесная тележка; *2* – блок регистрации; *3* – стойка; *4* – стрела; *5* – устройство регулировки наклона стрелы; *6* – блок датчиков; *7* – вертикальная кулиса

Fig. 1. General view of the mobile platform for multi-level monitoring of climate-active gas concentration in livestock premises: *1* – trolley; *2* – recording unit; *3* – stand; *4* – boom; *5* – boom tilt adjustment device; *6* – sensor unit; *7* – vertical boom link

[1] Здания и сооружения. Определение кратности воздухообмена методом индикаторного газа: ГОСТ Р 54857-2011. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.

[2] Патент RU 2477886, МПК G06F 17/40 (2006.01). Способ определения и мониторинга величины массовых выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду из животноводческого помещения и система для его осуществления: № 2011134177/08: заявлено 12.08.2011: опубл. 20.03.2013 / Брюханов А. Ю., Козлова Н. П., Максимов Н. В.; патентообладатель Сев.-Зап. НИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва РАСХН. 11 с.

2. Силовая конструкция – стойка (3), стрела (4) и устройство регулировки наклона стрелы (5), которые обеспечивают функцию выбора высоты измерений в диапазоне от 0,3 м до 2,0 м.

3. Измерительный блок – блок датчиков ($CO_2$, $CH_4$, $NH_3$, $H_2S$, температуры и относительной влажности) (6), закрепленный на вертикальной кулисе (7). Опрос датчиков настроен на режим цикла 5 с; время непрерывных измерений для каждой точки составляет не менее 10 мин.

Габаритные размеры технического средства в рабочем состоянии (длина – от 4 450 до 7 420 мм, ширина – 1 060 мм, высота – от 1 550 до 3 100 мм) позволяют удобно его размещать в кормовом проезде и проводить измерения в секциях с животными.

Обработка экспериментальных данных выполнялась методом описательной статистики с использованием программного пакета Microsoft Excel.

**Результаты и их обсуждение.** Нами разработана структурная схема оценки уровня выбросов КАГ (рис. 2), в которой модель расчета выбросов (4) этих газов из помещений для выращивания молодняка КРС является основой.

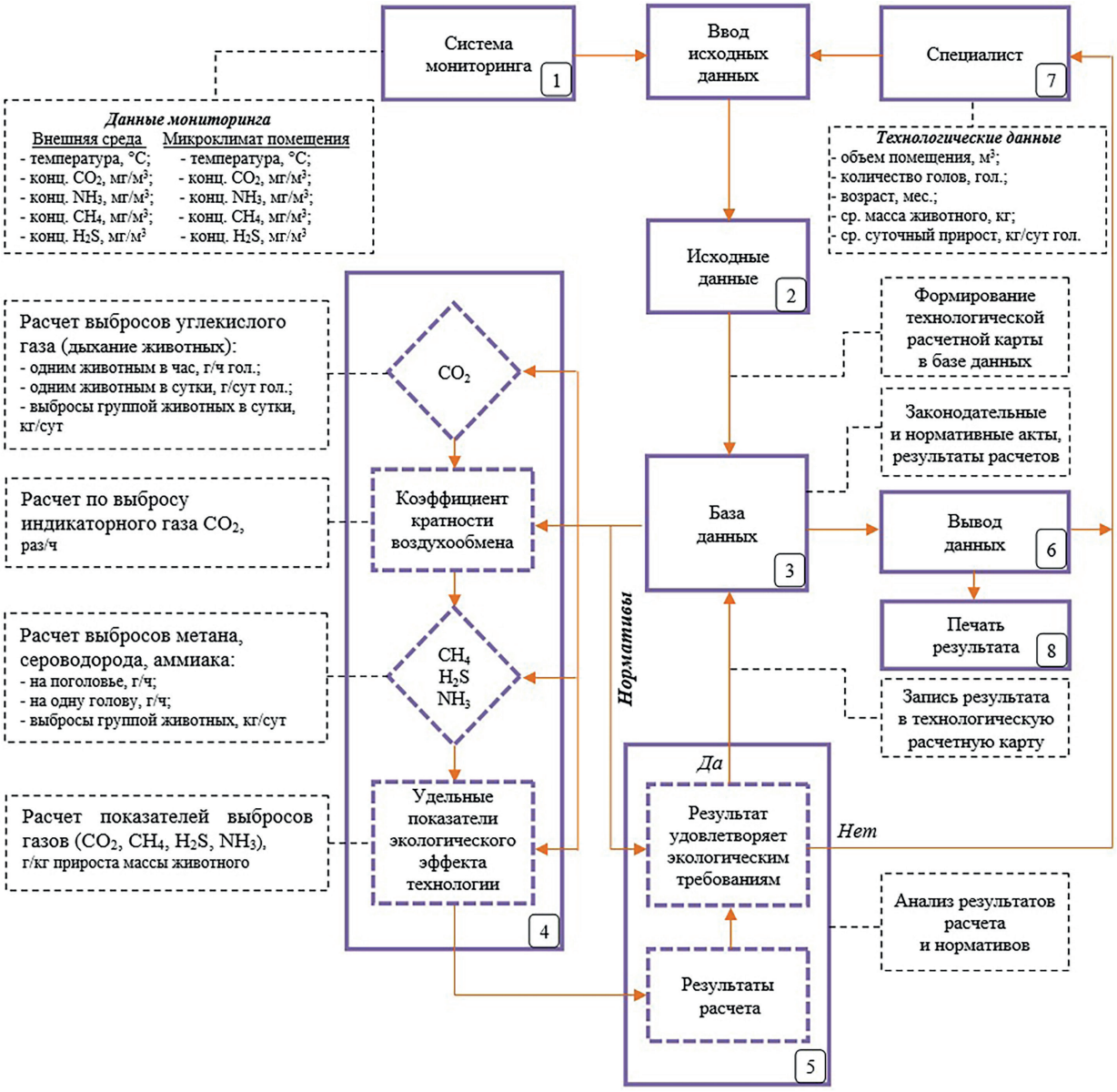



Рис. 2. Структурная схема оценки уровня выбросов КАГ

Fig. 2. Block diagram for estimating the level of climate-active gas emissions

Для полноценного функционирования модели расчета выбросов КАГ (4) важное значение имеет база данных (3), которая состоит из четырех информационно увязанных массивов данных в табличной форме. Первый массив данных содержит технологическую информацию, вводимую специалистом (7): площадь и объем помещения, количество голов, средняя масса одного животного, системы удаления навоза и кормления, рацион и питательные характеристики, система вентиляции и ее производительность.

Второй массив формируется от системы мониторинга (1) в режиме реального времени и содержит текущие параметры микроклимата помещения и внешней среды: температуру, скорость движения воздуха и концентрацию газов.

Третий массив данных формируется по результатам моделирования (4) и содержит расчетные значения воздухообмена, переваримости кормов, выхода навоза, а также выбросов $CO_2$, $NH_3$, $H_2S$, $CH_4$ в окружающую среду.

Четвертый массив данных состоит из нормативно-справочной информации, которую регулярно обновляет специалист (7). В базе данных информация структурируется и систематизируется с привязкой к району, хозяйству и конкретному животноводческому помещению для содержания молодняка КРС. Основу базы данных составляют объекты данных, имеющие в своей структуре форму ввода и таблицу, в которой объединяется группа показателей.

Эти показатели с технологической точки зрения позволят произвести расчет (4) на основе моделей выбросов климатически активных газов на уровне отдельного помещения, оценить их уровень (5) и сформировать массив данных в табличной форме (6). Специалист (7) путем запросов может получать необходимую информацию в виде таблиц и графиков с выводом на печать интересующих результатов (8).

Для определения выбросов углекислого газа в процессе дыхания животного на основании данных, указанных в РД-АПК 1.10.01.01-18[1], получена математическая зависимость, учитывающая его массу и температурные коэффициенты $CO_2$:

$$q_{CO_2} = (0{,}172 \times M + 10{,}79) \times t_{\text{п}} \times t_{\text{т}}, \tag{1}$$

где $q_{CO_2}$ – масса выбросов $CO_2$, г/(гол·ч); $M$ – масса животного, кг.

Рассчитывается $t_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий изменение плотности $CO_2$ в зависимости от температуры воздуха в помещении ($T_{\text{в}}$, °C), по формуле

$$t_{\text{п}} = -0{,}0065 \times T_{\text{в}} + 1{,}9608. \tag{2}$$

Коэффициент, учитывающий интенсивность выделения $CO_2$ животными в зависимости от температуры воздуха в помещении ($t_{\text{т}}$), определяется следующим образом:

$$t_{\text{т}} = 0{,}025 \times T_{\text{в}} + 0{,}747. \tag{3}$$

Вычисление часовых выбросов $CO_2$ группой животных ($q^{\text{гр}}_{CO_2}$, г/(гр.·ч)) выполняется по выражению

$$q^{\text{гр}}_{CO_2} = q_{CO_2} \times n, \tag{4}$$

где $n$ – поголовье животных в группе, гол.

Суточные выбросы $CO_2$ группой животных ($q^{\text{сут}}_{CO_2}$, кг/(гр.·сут)) вычисляются по формуле

$$q^{\text{сут}}_{CO_2} = \frac{q^{\text{гр}}_{CO_2} \times 24}{1000}. \tag{5}$$

Определение воздухообмена может проводиться как по отдельной группе животных, так и в целом по помещению. Расчет воздухообмена по отдельной группе животных осложняется тем, что секции, где содержатся животные разных возрастов, не изолированы друг от друга, и это создает неконтролируемый воздухообмен между ними, который невозможно оценить. Предлагается замеры концентрации газов проводить внутри секции, а объем воздуха рассчитывать пропорционально площади пола секции, занимаемой животными. В целом для помещения расчеты предла-

[1] Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота: РД-АПК 1.10.01.01-18: [взамен РД-АПК 1.10.01.02-10; введ. 01.09.2018]. М.: [б. и.], 2018. 166 с.

гается проводить на основе усредненных показателей. Интенсивность воздухообмена определяется коэффициентом кратности воздухообмена и рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{\text{во}} = \frac{(q^{\text{гр}}_{\text{CO}_2} / V)}{(\rho^{\text{в}}_{\text{CO}_2} - \rho^{\text{н}}_{\text{CO}_2})}, \quad (6)$$

где $k_{\text{во}}$ – коэффициент кратности воздухообмена, раз/ч; $V$ – внутренний объем помещения, м$^3$; $\rho^{\text{в}}_{\text{CO}_2}$ – концентрация $CO_2$ в воздухе помещения, г/м$^3$; $\rho^{\text{н}}_{\text{CO}_2}$ – концентрация $CO_2$ в наружном воздухе, г/м$^3$.

Имея данные о концентрации в воздухе $NH_3$, $CH_4$, $H_2S$, можно произвести расчет массы выбросов заданной группой животных за час $q^{\text{гр}}_i$ (мг/(гр.·ч)):

$$q^{\text{гр}}_i = (\rho^{\text{в}}_i - \rho^{\text{н}}_i) \times V \times k_{\text{во}}, \quad (7)$$

где $\rho^{\text{в}}_i$ – концентрация $i$-го газа в воздухе помещения, мг/м$^3$; $\rho^{\text{н}}_i$ – концентрация $i$-го газа в наружном воздухе, мг/м$^3$.

Вычисление выбросов $i$-го газа одним животным за час $q_i$ (мг/(гол.·ч)) производится по формуле

$$q_i = \frac{q^{\text{гр}}_i}{n}. \quad (8)$$

Суточные выбросы $i$-го газа группой животных за сутки $q^{\text{сут}}_i$ (г/(гр.·сут)) определяются согласно выражению

$$q^{\text{сут}}_i = \frac{q^{\text{гр}}_i \times 24}{1000}. \quad (9)$$

Одним из основных критериев экологической эффективности технологии с минимизацией ущерба окружающей среде можно принять массу выбросов каждого газа по отношению к произведенной продукции. Расчет удельных показателей экологической эффективности $q^{\text{уд}}_i$ (г/кг прироста) технологии производится по формуле

$$q^{\text{уд}}_i = \frac{(q_i \times 24 / p)}{1000}, \quad (10)$$

где $p$ – суточный прирост живой массы, кг.

Отрицательное воздействие парниковых газов ($CO_2$ и $CH_4$) на окружающую среду оценивается через потенциал глобального потепления (ПГП, для $CO_2$ = 1 и $CH_4$ = 23)[1] с расчетом $CO_2$-экв. (г $CO_2$-экв/сут) и $CO^{\text{уд}}_2$-экв. (г $CO_2$-экв/сут/кг прироста) по следующим выражениям:

$$\text{CO}_2\text{-экв.} = \frac{24 \times (q_{\text{CO}_2} + 23 \times q_{CH_4})}{1000}, \quad (11)$$

$$\text{CO}^{\text{уд}}_2\text{-экв.} = \frac{\text{CO}_2\text{-экв.}}{p}. \quad (12)$$

Внедрение предлагаемой модели в первую очередь актуально в регионах, где потенциал сокращения выбросов КАГ является наибольшим. Таким регионом является Ленинградская область, в которой производство молока имеет наивысший показатель в РФ, достигающий 15 тыс. кг молока на голову в год. Молодняк, получаемый от высокопродуктивных коров, обладает значительным генетическим потенциалом и характеризуется большими суточными приростами живой массы, что, несомненно, сказывается на выбросах КАГ при его выращивании.

Апробация модели расчета выбросов КАГ (см. рис. 2, блок 4) проводилась в помещении для молодняка, расположенном в одном из племенных молочных хозяйств Ленинградской области, общим объемом 14 400 м$^3$, длиной 90 м, шириной 25 м, высотой в коньке 8,8 м. В нем содержатся 518 гол. молодняка возрастом от 2,5 до 9,7 мес., которые размещены в 15 секциях (по 34–35 гол.).

[1] Газы парниковые. Ч. 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации: ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021. М.: Рос. ин-т стандартизации. 2021. 43 с.

В этом помещении был проведен мониторинг концентраций КАГ в пяти точках на четырех уровнях (0,3; 0,7; 1,5 и 2,0 м) и во внешней среде. В каждой точке измерения выполнялись в течение 10 мин, а информация записывалась на электронный носитель с интервалом опроса датчиков 5 с. Средние значения температуры на момент проведения исследований составили: в помещении +0,3 °С, на улице –8,1 °С.

При мониторинге параметров микроклимата в помещении для содержания молодняка КРС разных возрастных групп животных было установлено, что концентрации $CO_2$ составляют (3 100 ± 330) мг/м$^3$, $CH_4$ – (88,5 ± 1,25) мг/м$^3$, $NH_3$ – (3,58 ± 0,83) мг/м$^3$, $H_2S$ – (0,037 ± 0,013) мг/м$^3$. При этом наблюдались изменения кратности воздухообмена $k_{во}$ = (0,86 ± 0,17), связанные с неравномерностью движения воздушных потоков внутри помещения.

Полученный массив данных параметров микроклимата позволил провести расчет массы выбросов КАГ по модели (см. рис. 2, блок 4) в зависимости от возраста молодняка КРС. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Анализ рис. 3 показывает, что с увеличением возраста животных от 3,2 до 9,4 мес. выбросы $CO_2$ выросли в 1,86 раза, $NH_3$ – в 2,07 раза и $CH_4$ – в 1,64 раза. Выбросы сероводорода, не указанные на данной диаграмме, составили 0,057–0,65 мг/(гол·ч).

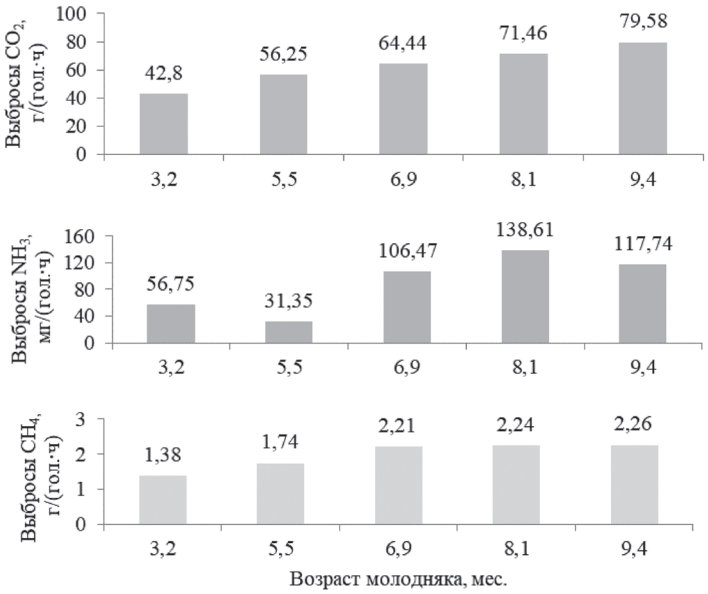



Рис. 3. Масса выбросов КАГ в зависимости от возраста молодняка КРС

Fig. 3. Mass of climate-active gas emissions depending on the young cattle age




Рис. 4. Зависимость удельных выбросов $CO_2$ от суточного прироста живой массы молодняка КРС, г/кг прироста/сут

Fig. 4. Dependence of specific $CO_2$ emissions on the daily live weight gain in young cattle, g/kg of gain/day

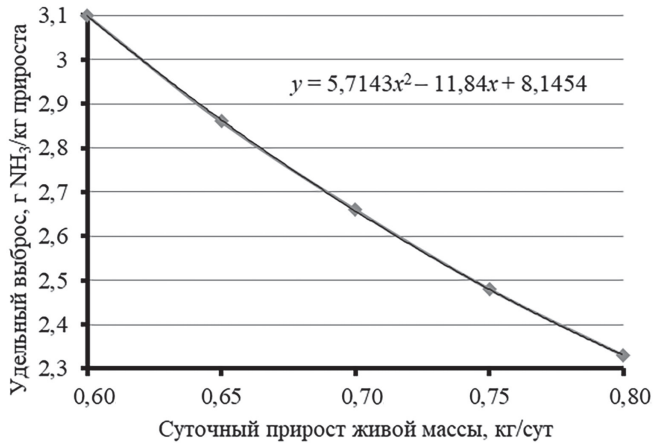



Рис. 5. Зависимость удельных выбросов $NH_3$ от суточного прироста живой массы молодняка КРС, г/кг прироста/сут

Fig. 5. Dependence of specific $NH_3$ emissions on the daily live weight gain in young cattle, g/kg of gain/day

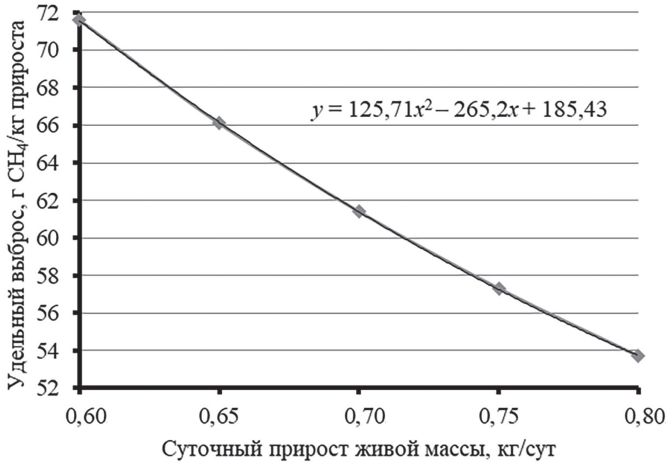



Рис. 6. Зависимость удельных выбросов $CH_4$ от суточного прироста живой массы молодняка КРС, г/кг прироста/сут

Fig. 6. Dependence of specific $CH_4$ emissions on the daily live weight gain in young cattle, g/kg of gain/day

В качестве показателя экологической эффективности технологии выращивания молодняка можно принять количество выбросов КАГ, приходящихся на единицу продукции, т. е. на 1 кг прироста живой массы. Чем ниже этот показатель, тем меньше вред, наносимый окружающей среде при обеспечении заданных технологических параметров. На рис. 4–6 представлены расчетные зависимости удельных выбросов $CO_2$, $NH_3$ и $CH_4$ на кг прироста живой массы молодняка.

Из графиков видно, что с увеличением прироста живой массы молодняка, связанного с интенсивностью используемой технологии, удельные выбросы КАГ на кг прироста снижаются. Это свидетельствует о необходимости применения наиболее эффективных интенсивных технологий, позволяющих при выращивании молодняка минимизировать экологический ущерб окружающей среде при производстве единицы продукции.

**Выводы.** Анализ научной литературы показал, что модели, методы и стратегии, связанные с выбросами КАГ при содержании КРС, активно разрабатываются во многих странах. Исследователи отмечают их значительный потенциал для прогнозирования и снижения вредного воздействия на окружающую среду. Наибольшее распространение в работах за последние 5 лет получили модели, направленные на расчет и прогнозирование уровней выбросов метана от взрослого скота и аммиака от навоза.

По результатам проведенных теоретических исследований была разработана структурная схема оценки уровня выбросов КАГ, в которой главным элементом является модель расчета

выбросов этих газов из помещений при выращивании молодняка КРС. На основе разработанных математических зависимостей производится расчет выбросов $CO_2$, $CH_4$, $NH_3$ и $H_2S$ с учетом данных мониторинга и технологических параметров.

С использованием разработанной мобильной платформы многоуровневого мониторинга концентрации климатически активных газов были проведены исследования параметров воздушной среды в помещении для содержания молодняка КРС. Исследования проводились при температуре воздуха в помещении 0,3 °С, при этом расчетные выбросы $CO_2$ в среднем составили 62,8 г/(гол.·ч). С применением разработанной модели произведены следующие расчеты: при росте температуры воздуха до +10 °С выбросы $CO_2$ увеличатся на 29 %, при температуре +20 °С рост составит 55,9 %, что связано с возрастанием интенсивности дыхания животных, изменением плотности углекислого газа и учитывается соответствующими коэффициентами.

Аналогичные зависимости существуют и для других КАГ, но этот вопрос требует дополнительных исследований.

Моделирование показало, что расчетные выбросы в целом для исследуемого помещения составили: $CO_2$ – 781,0 кг/сут; $CH_4$ – 24,9 кг/сут; $NH_3$ – 1,1 кг/сут; $H_2S$ – 0,003 кг/сут.

Разработанная модель позволяет производить расчеты для различных объемно-планировочных решений помещений и широких диапазонов температурно-влажностных режимов в них с учетом разнообразия формируемых групп по возрасту и живой массе молодняка КРС.

Полученные результаты будут использованы при разработке рекомендаций к технико-технологическим решениям по снижению эмиссии климатически активных газов в окружающую среду из животноводческих помещений для содержания молодняка КРС.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00112 «Модели оценки и прогноза влияния технологий выращивания молодняка крупного рогатого скота на интенсивность эмиссии климатически активных газов в окружающую среду».

**Acknowledgements.** The study was funded by the Russian Science Foundation grant no. 25-26-00112 “Models for assessing and predicting the impact of technologies for rearing young cattle on the intensity of emissions of climate-active gases into the environment”.

## Список использованных источников

1. Вторый, С. В. Анализ технологий выращивания молодняка КРС для разработки средства мониторинга концентрации газов в животноводческих помещениях / С. В. Вторый, С. В. Ковалев, А. Д. Комоедов // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 12. – С. 153–163. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i12pp153-163

2. Greenhouse gas emissions from beef cattle breeding based on the ecological cycle model / H. Guo, Z. Su, X. Yang [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19, № 15. – Art. 9481. https://doi.org/10.3390/ijerph19159481

3. Ammonia emissions and building-related mitigation strategies in dairy barns: a review / S. Vitaliano, P. R. D’Urso, C. Arcidiacono, G. Cascone // Agriculture. – 2024. – Vol. 14, № 7. – Art. 1148. https://doi.org/10.3390/agriculture14071148

4. Ramirez-Restrepo, C. A. The carbon footprint of young-beef cattle finishing systems in the Eastern Plains of the Orinoco River Basin of Colombia / C. A. Ramirez-Restrepo, R. Vera, I. M. Rao // Frontiers in Animal Science. – 2023. – Vol. 4. – Art. 1103826. https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1103826

5. Ammonia and greenhouse gase missions of different types of livestock and poultry manure during storage / Z. Zhu, L. Li, H. Dong, Y. Wang // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2020. – Vol. 63, № 6. – P. 1723–1733. https://doi.org/10.13031/trans.14079

6. Исследования выделения парниковых газов при переработке навоза молодняка крупного рогатого скота / А. Ю. Брюханов, Э. В. Васильев, В. И. Базыкин, Е. В. Шалавина // Инженерные технологии и системы. – 2025. – Т. 35, № 3. – С. 465–488. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488

7. Modelling methane emission from manure / S. Calvet, F. Estelles, A. Prado, K. Groenestein // Technology for environmentally friendly livestock production / ed. T. Bartzanas. – Cham, 2023. – P. 137–145. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19730-7_6

8. Development of prediction models for quantification of total methane emission from enteric fermentation of young Holstein cattle at various ages / H. Jiao, T. Yan, D. A. Wills [et al.] // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2014. – Vol. 183, № 6. – P. 160–166. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.004

9. Prediction equation development for methane-related traits accounting for physiological traits in Japanese Black cattle / H. Lee, M. Kim, T. Masaki [et al.] // Animal Science Journal. – 2026. – Vol. 97. – Art. e70144. https://doi.org/10.1111/asj.70144

10. Marumo, J. L. Enteric methane emissions prediction in dairy cattle and effects of Monensin on methane emissions: a meta-analysis / J. L. Marumo, P. A. LaPierre, M. E. Van Amburgh // Animals. – 2023. – Vol. 13, № 8. – Art. 1392. https://doi.org/10.3390/ani13081392

11. Effect of a corn silage-based finishing diet on growth, carcass composition, meat quality, methane emissions and carbon footprint of crossbred angus young bulls / D. M. Soares, S. Bernardino, N. Rodrigues [et al.] // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, № 18. – Art. 8417. https://doi.org/10.3390/su17188417

12. Ammonia emissions from beef cattle feed yards: a review / M. Lee, B. W. Auvermann, L. O. Tedeschi [et al.] // Frontiers in Animal Science. – 2025. – Vol. 6. – Art. 1608387. https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1608387

13. Aboltins, A. Model for ammonia emissions' assessment and comparison of various dairy cattle farming systems and technologies / A. Aboltins, L. Melece, J. Priekulis // Agronomy Research. – 2019. – Vol. 17, № 2. – P. 322–332. https://doi.org/10.15159/AR.19.081

14. Estimation of ammonia emission inventory using life cycle assessment based on livestock manure flow: a case study of the manure management sector in Korea / H.-M. Lee, K.-C. Kim, M.-W. Kim [et al.] // Atmosphere. – 2024. – Vol. 15, № 8. – Art. 910. https://doi.org/10.3390/atmos15080910

15. Bleizgys, R. Ammonia emissions from cattle manure under variable moisture exchange between the manure and the environment / R. Bleizgys, V. Naujokiene // Agronomy. – 2023. – Vol. 13, № 6. – Art. 1555. https://doi.org/10.3390/agronomy13061555

16. Modeling and prediction accuracy of ammonia gas emissions from feedlot cattle / M. S. Brown, N. A. Cole, S. Gruber [et al.] // Applied Animal Science. – 2019. – Vol. 35, № 3. – P. 347–356. https://doi.org/10.15232/aas.2018-01834

17. Разработка параметрической модели определения газового состава воздушной среды (аммиак, сероводород, углекислый газ) животноводческого помещения / В. В. Кирсанов, И. М. Довлатов, С. С. Юрочка, И. В. Комков // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 13–22. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22

18. Расчет уровня выбросов климатически активных газов при производстве молока / С. В. Вторый, Т. Ю. Миронова, Т. И. Гордеева, С. Н. Матейчик // АгроЭкоИнженерия. – 2024. – № 4 (121). – С. 131–143. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-4121-131-143

19. Model estimation and measurement of ammonia emission from naturally ventilated dairy cattle buildings with slatted floor designs / C. Wang, B. Li, G. Zhang [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2006. – Vol. 56, № 9. – P. 1252–1259. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10465678

20. Methane emission characteristics of naturally ventilated cattle buildings / S. Hempel, D. Willink, D. Janke [et al.] // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 10. – Art. 4314. https://doi.org/10.3390/su12104314

21. Direct measurements of the volume flow rate and emissions in a large naturally ventilated building / D. Janke, Q. Yi, L. Thormann [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 21. – Art. 6223. https://doi.org/10.3390/s20216223

22. Вторый, В. Ф. $CO_2$ как индикаторный газ для определения воздухообмена в коровнике / В. Ф. Вторый, С. В. Вторый // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 10. – С. 154–160. https://doi.org/ 10.28983/asj.y2023i10pp154-160

## References

1. Vtoryi S. V., Kovalev S. V., Komoedov A. D. Analysis of young-stock breeding technologies for the development of monitoring instruments of gas concentrations in livestock houses. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = The Agrarian Scientific Journal*, 2025, no. 12, pp. 153–163 (in Russian). https://doi.org/10.28983/asj.y2025i12pp153-163

2. Guo H., Su Z., Yang X., Xu S., Pan H. Greenhouse gas emissions from beef cattle breeding based on the ecological cycle model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 15, art. 9481. https://doi.org/10.3390/ijerph19159481

3. Vitaliano S., D'Urso P. R., Arcidiacono C., Cascone G. Ammonia emissions and building-related mitigation strategies in dairy barns: a review. *Agriculture*, 2024, vol. 14, no. 7, art. 1148. https://doi.org/10.3390/agriculture14071148

4. Ramirez-Restrepo C. A., Vera R., Rao I. M. The carbon footprint of young-beef cattle finishing systems in the Eastern Plains of the Orinoco River Basin of Colombia. *Frontiers in Animal Science*, 2023, vol. 4, art. 1103826. https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1103826

5. Zhu Z., Li L., Dong H., Wang Y. Ammonia and greenhouse gase missions of different types of livestock and poultry manure during storage. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 1723–1733. https://doi.org/10.13031/trans.14079

6. Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Bazykin V. I., Shalavina E. V. Study of greenhouse gas emission from young cattle manure processing. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*, 2025, vol. 35, no. 3, pp. 465–488 (in Russian). https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488

7. Calvet S., Estelles F., Prado A., Groenestein K. Modelling methane emission from manure. *Technology for environmentally friendly livestock production*. Cham, 2023, pp. 137–145. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19730-76

8. Jiao H., Yan T., Wills D. A., Carson A. F., McDowell D. A. Development of prediction models for quantification of total methane emission from enteric fermentation of young Holstein cattle at various ages. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, vol. 183, no. 6, pp. 160–166. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.004

9. Lee H., Kim M., Masaki T., Oikawa K., Ashihara A., Ikuta K., Iwamoto E., Nonaka I., Haga S., Roh S., Suzuki T., Terada F., Uemoto Y. Prediction equation development for methane-related traits accounting for physiological traits in Japanese Black cattle. *Animal Science Journal*, 2026, vol. 97, art. e70144. https://doi.org/10.1111/asj.70144

10. Marumo J. L., LaPierre P. A., Van Amburgh M. E. Enteric methane emissions prediction in dairy cattle and effects of Monensin on methane emissions: a meta-analysis. *Animals*, 2023, vol. 13, no. 8, art. 1392. https://doi.org/10.3390/ani13081392

11. Soares D. M., Bernardino S., Rodrigues N., Gama I., Almeida J. M., Teixeira R. F. M., Santos-Silva J., Alves S. P., Domingos T., Martin C., Marques G. M., Bessa R. J. B. Effect of a corn silage-based finishing diet on growth, carcass

composition, meat quality, methane emissions and carbon footprint of crossbred angus young bulls. *Sustainability*, 2025, vol. 17, no. 18, art. 8417. https://doi.org/10.3390/su17188417

12. Lee M., Auvermann B. W., Tedeschi L. O., Koziel J. A., Brandani C. B., Gouvea V. N., Smith J. K., Casey K. D. Ammonia emissions from beef cattle feed yards: a review. *Frontiers in Animal Science*, 2025, vol. 6, art. 1608387. https://doi.org/ 10.3389/fanim.2025.1608387

13. Aboltins A., Melece L., Priekulis J. Model for ammonia emissions' assessment and comparison of various dairy cattle farming systems and technologies. *Agronomy Research*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 322–332. https://doi.org/10.15159/AR.19.081

14. Lee H.-M., Kim K.-C., Kim M.-W., Lee J.-Y., Joo H.-S. Estimation of ammonia emission inventory using life cycle assessment based on livestock manure flow: a case study of the manure management sector in Korea. *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 8, art. 910. https://doi.org/10.3390/atmos15080910

15. Bleizgys R., Naujokiene V. Ammonia emissions from cattle manure under variable moisture exchange between the manure and the environment. *Agronomy*, 2023, vol. 13, no. 6, art. 1555. https://doi.org/10.3390/agronomy13061555

16. Brown M. S., Cole N. A., Gruber S., Kube J., Teeter J. S. Modeling and prediction accuracy of ammonia gas emissions from feedlot cattle. *Applied Animal Science*, 2019, vol. 35, no. 3, pp. 347–356. https://doi.org/10.15232/aas.2018-01834

17. Kirsanov V. V., Dovlatov I. M., Yurochka S. S., Komkov I. V. Development of a parametric model for determining the gas composition of the air environment (ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide) of livestock premises. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 13–22 (in Russian). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22

18. Vtoryi S. V., Mironova T. Yu., Gordeeva T. I., Mateichik S. N. Calculation of emission level of climate-active gases in milk production. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*, 2024, no. 4 (121), pp. 131–143 (in Russian). https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-4121- 131-143

19. Wang C., Li B., Zhang G., Rom H. B., Strom J. S. Model estimation and measurement of ammonia emission from naturally ventilated dairy cattle buildings with slatted floor designs. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, vol. 56, no. 9, pp. 1252–1259. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10465678

20. Hempel S., Willink D., Janke D., Ammon C., Amon B., Amon T. Methane emission characteristics of naturally ventilated cattle buildings. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 10, art. 4314. https://doi.org/10.3390/su12104314

21. Janke D., Yi. Q., Thormann L., Hempel S., Amon B., Nosek S., Van Overbeke P., Amon T. Direct measurements of the volume flow rate and emissions in a large naturally ventilated building. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, art. 6223. https://doi.org/10.3390/s20216223

22. Vtoryi V. F., Vtoryi S. V. $CO_2$ as a tracer gas for determining the air exchange in a cow barn. *Agrarnyi nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal*, 2023, no. 10, pp. 154–160 (in Russian). https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp154-160

## Информация об авторах

*Вторый Сергей Валерьевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (Фильтровское шоссе, 3, 196634, Санкт-Петербург, Тярлево, Российская Федерация). http://orcid.org/0000-0002-7169-1625. E-mail: 2vt_1981@list.ru

*Гордеев Владислав Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Фильтровское шоссе, 3, 196634, Санкт-Петербург, Тярлево, Российская Федерация) http://orcid.org/0000-0001-6181-396X. E-mail: cow-sznii@yandex.ru

*Ковалев Сергей Владимирович* – младший научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Фильтровское шоссе, 3, 196634, Санкт-Петербург, Тярлево, Российская Федерация). http://orcid.org/0009-0009-1310-4283. E-mail: kovalyov.sv@yandex.ru

*Комоедов Алексей Дмитриевич* – младший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Фильтровское шоссе, 3, 196634, Санкт-Петербург, Тярлево, Российская Федерация). http://orcid.org/0009-0008-7718-6436. E-mail: komoedov.alexej@yandex.ru.

## Information about the authors

*Sergei V. Vtoryi* – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher of the Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" (IEEP – branch of FSAC VIM) (3, Filtrovskoje Shosse, 196634, Saint Petersburg, Tiarlevo, Russian Federation). http://orcid.org/0000-0002-7169-1625. E-mail: 2vt_1981@list.ru

*Vladislav V. Gordeev* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Livestock Production, IEEP – branch of FSAC VIM (3, Filtrovskoje Shosse, 196634, Saint Petersburg, Tiarlevo, Russian Federation). http://orcid.org/0000-0001-6181-396X. E-mail: cow-sznii@yandex.ru

*Sergei V. Kovalev* – Junior Researche of the Department of Agroecology in Livestock Production, IEEP – branch of FSAC VIM (3, Filtrovskoje Shosse, 196634, Saint Petersburg, Tiarlevo, Russian Federation). http://orcid.org/0009-0009-1310-4283. E-mail: kovalyov.sv@yandex.ru

*Alexey D. Komoedov* – Junior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, IEEP – branch of FSAC VIM (3, Filtrovskoje Shosse, 196634, Saint Petersburg, Tiarlevo, Russian Federation). http://orcid.org/0009-0008-7718-6436. E-mail: komoedov.alexej@yandex.ru