

Научная статья

УДК 631.95; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-267-281

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПОСЛОЙНОГО СОСТАВА ВОЗДУХА НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

✉ Суховский Даниил Андреевич;

Шкрабак Роман Владимирович;

Шкрабак Владимир Степанович.

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин,

Санкт-Петербург, Россия

✉ Danich132@yandex.ru

Аннотация. Животноводство – важная отрасль сельского хозяйства, обеспечивающая продовольственную безопасность за счет производства мяса и молока, являющихся основными источниками животного белка. Вместе с тем интенсивное развитие этой отрасли связано со значительным воздействием на окружающую среду. Одной из ключевых экологических проблем является эмиссия токсичных и парниковых газов в процессе содержания животных и хранения навоза. В помещениях животноводческих комплексов выделяются аммиак (NH_3), метан (CH_4), углекислый газ (CO_2) и сероводород (H_2S), которые не только угрожают здоровью работников, но и вносят вклад в изменение климата и загрязнение атмосферы. Целью исследования стало изучение концентрации и пространственного распределения этих газов в воздушной среде животноводческих помещений с использованием специализированного оборудования и программного обеспечения автоматического послойного измерения и регулирования параметров производственной среды. Исследования проводились на базе дойного стада Санкт-Петербургского государственного аграрного университета и ПАО «Предпортовый». Результаты показали превышение предельно допустимых концентраций почти всех исследуемых веществ, особенно в приземном слое воздуха (0,5–1,0 м), где их скопление обусловлено высокой плотностью и физико-химическими свойствами. С увеличением высоты концентрации снижаются. Внедрение автоматизированной системы мониторинга позволяет своевременно выявлять зоны повышенного загрязнения и активировать системы вентиляции, что способствует снижению антропогенной нагрузки внутри помещений и минимизации выбросов в атмосферу. Полученные данные подчеркивают необходимость регулярного экологического контроля воздушной среды и внедрения ресурсосберегающих технологий, направленных на улучшение экологической безопасности животноводческих производств.

Ключевые слова: окружающая среда, послойное измерение состава воздуха, производственные факторы, газы, экологическая безопасность, сельскохозяйственные объекты

Для цитирования: Суховский Д.А., Шкрабак Р.В., Шкрабак В.С. Результаты экспериментальных исследований влияния послойного состава воздуха на экологическую среду в животноводстве // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 267–281. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-267-281.

Scientific article

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF THE LAYERED COMPOSITION OF AIR ON THE ECOLOGICAL ENVIRONMENT IN ANIMAL HUSBANDRY

✉ Sukhovsky Daniil A.;

Shkrabak Roman V.;

Shkrabak Vladimir S.

Sankt-Petersburg state agricultural university, Pushkin, Saint-Petersburg, Russia

✉ Danich132@yandex.ru

Abstract. Animal husbandry is an important branch of agriculture that ensures food security through the production of meat and milk, which are the main sources of animal protein. At the same time, the intensive development of this industry is associated with a significant impact on the environment. One of the key environmental problems is the emission of toxic and greenhouse gases during animal husbandry and manure storage. Ammonia (NH₃), methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S) are released in the premises of livestock complexes, which not only threaten the health of workers, but also contribute to climate change and atmospheric pollution. The purpose of the study was to study the concentration and spatial distribution of these gases in the air environment of livestock facilities using specialized equipment and software for automatic layer-by-layer measurement and regulation of the parameters of the production environment. The research was conducted on the basis of the dairy herd of Saint-Petersburg State Agricultural University and PJSC «Predportovy». The results showed that the maximum permissible concentrations of almost all the substances studied were exceeded, especially in the surface air layer (0,5–1,0 m), where their accumulation is due to high density and physico-chemical properties. Concentrations decrease with increasing altitude. The introduction of an automated monitoring system makes it possible to identify areas of high pollution in a timely manner and activate ventilation systems, which helps to reduce the anthropogenic load inside the premises and minimize emissions into the atmosphere. The data obtained emphasize the need for regular environmental monitoring of the air environment and the introduction of resource-saving technologies aimed at improving the environmental safety of livestock production.

Keywords: environment, layer-by-layer measurement of air composition, production factors, gases, environmental safety, agricultural facilities

For citation: Sukhovsky D.A., Shkrabak R.V., Shkrabak V.S. The results of experimental studies of the effect of the layered composition of air on the ecological environment in animal husbandry // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 267–281. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-267-281.

Введение

Животноводство – одна из ключевых отраслей сельского хозяйства, обеспечивающая население продуктами питания. Оно производит такие важные компоненты рациона, как мясо и молоко [1, 2]. В условиях растущего глобального спроса на животноводческую продукцию и стремления к повышению эффективности производства все шире применяются интенсивные технологии содержания сельскохозяйственных животных. Эти системы способствуют значительному увеличению объемов продукции на единицу площади, но в то же время усиливают негативное воздействие на микроклимат и качество воздуха в производственных помещениях.

Несмотря на важную роль в аграрном секторе, животноводство связано с существенными экологическими последствиями и производственными рисками, в том числе для здоровья работников ферм. В ходе содержания животных, переработки навоза и функционирования вентиляционных систем в помещениях выделяются и накапливаются различные токсичные газы. Среди наиболее опасных при высоких концентрациях – аммиак (NH_3), метан (CH_4), углекислый газ (CO_2) и сероводород (H_2S) [3–5]. Их образование обусловлено биохимическими процессами разложения органических веществ, дыханием животных и метаболизмом в их пищеварительной системе. При неэффективной вентиляции или нарушении графика удаления навоза концентрация этих соединений в воздухе может превышать предельно допустимые нормы, создавая угрозу для здоровья людей и окружающей среды.

Повышенное содержание указанных газов в воздухе производственных помещений оказывает вредное воздействие на здоровье работников ферм. Аммиак вызывает раздражение дыхательных путей, глаз и кожных покровов, провоцируя кашель, головную боль и снижение трудоспособности. Сероводород при значительных концентрациях обладает высокой токсичностью и может вызывать тяжелые отравления, вплоть до смертельного исхода. Избыток углекислого газа приводит к ощущению удушья и головокружению, а метан, помимо роли в формировании парникового эффекта, представляет собой пожаро- и взрывоопасную смесь при накоплении в замкнутых пространствах [6–10]. При этом важно, что последствия воздействия этих веществ проявляются не только в острой форме, но и при длительном, хроническом воздействии.

Для создания безопасных условий труда и эффективного контроля качества воздуха на животноводческих объектах разработано специализированное устройство, предназначенное для измерения концентрации вредных газов. Оно оснащено датчиками, обеспечивающими непрерывный мониторинг уровня аммиака, сероводорода, углекислого газа и метана в режиме реального времени. Полученные данные поступают в аналитическую систему, которая оценивает текущее состояние воздушной среды, сопоставляет их с нормативными значениями и при превышении допустимых пределов формирует предупредительные сигналы, а также автоматически запускает системы вентиляции. Такой подход позволяет оперативно реагировать на ухудшение качества воздуха, а также отслеживать его изменения на протяжении суток, недели или всего производственного цикла. Особое преимущество таких систем – возможность выполнения не только единичных замеров, но и послойного мониторинга, что особенно важно в помещениях, где наблюдается значительная вертикальная неоднородность распределения газовых компонентов, например, в коровниках с подстилочным содержанием или системами удаления навоза.

Методы исследования

В качестве средства измерения параметров производственной среды в животноводческих комплексах применялось устройство для измерения параметров производственной среды высокогабаритных сельскохозяйственных объектов (патент Российская Федерация № 232984). Для сбора и обработки данных использовалась программа, обеспечивающая автоматическое послойное измерение и регулирование параметров производственной среды в стационарных сельскохозяйственных объектах (патент Российская Федерация № 2025683161). Калибровка датчиков на плате проводилась в соответствии с поверенным производственным оборудованием ГАНК-4. Проведение измерений осуществлялось на двух объектах: на базе дойного стада (415 голов) учебного хозяйства Санкт-Петербургского государственного аграрного университета и на молочнотоварном животноводческом комплексе ПАО «Предпортовый», где содержится 1 011 голов скота, включая 480 дойных коров.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе экспериментального исследования проводились систематические измерения концентраций основных газов – аммиака, метана, углекислого газа и сероводорода – высокий уровень которых оказывает негативное воздействие на здоровье людей, животных и состояние окружающей среды. Замеры выполнялись в зоне между рядами коровника на различных высотных уровнях с целью анализа вертикального распределения загрязняющих веществ и выявления зон, превышающих гигиенические и производственные нормативы. Процесс проведения измерений, включая схемы размещения оборудования и последовательность сбора данных, представлены на рис. 1–6.

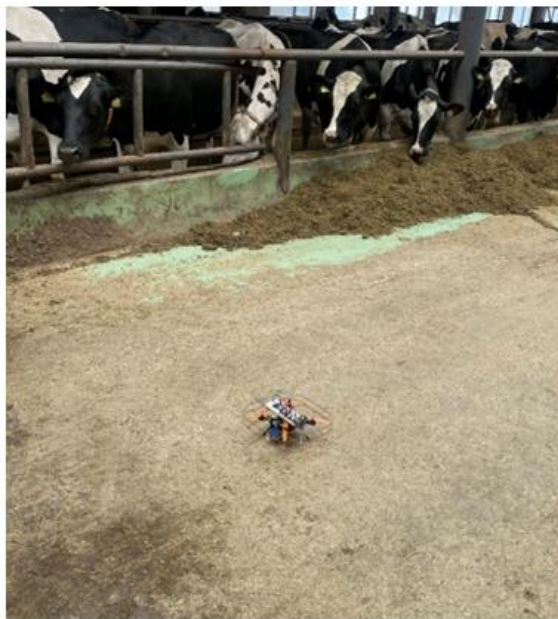


Рис. 1. Прототип устройства измерения параметров производственной среды в стационарных сельскохозяйственных объектах



Рис. 2. Измерение концентраций газов (CH_4 , NH_3 , H_2S , CO_2) прототипом на приземистом уровне до 0,5 м

На рис. 1 показан прототип мобильного измерительного устройства, установленного в зоне между рядами коровника. Компактное устройство оснащено датчиками для одновременного мониторинга концентраций ключевых газов – NH_3 , CH_4 , H_2S и CO_2 . Его размещение в приземной зоне обеспечивает сбор данных, отражающих реальные условия загазованности, близкие к основным источникам выделения вредных веществ – животным и навозным слоем.

На рис. 2 изображен момент проведения измерений в наиболее опасной с точки зрения накопления тяжелых газов зоне – на высоте до 0,5 м от пола. В этом слое, где преимущественно скапливаются такие газы, как аммиак, сероводород и углекислый газ, их концентрации могут значительно превышать средние по помещению показатели. Полученные результаты позволяют детально оценить вертикальное распределение загрязнителей и используются для разработки направленных мер по оптимизации вентиляции и снижению профессиональных и производственных рисков.



Рис. 3. Измерение концентраций газов (CH_4 , NH_3 , H_2S , CO_2) прототипом на уровне 1,5 м (уровень органов дыхания)



Рис. 4. Измерение параметров газов (CH_4 , NH_3 , H_2S , CO_2) поверенным прибором ГАНК-4 на уровне более 2 м

На рис. 3 изображено проведение измерений на высоте 1,5 м – уровне, соответствующем средней высоте расположения органов дыхания человека. Это позволяет оценить фактическое воздействие загрязняющих газов на работников фермы.

На рис. 4 показан процесс верификации данных, полученных с помощью разработанного прототипа, с использованием поверенного сертифицированного измерительного прибора ГАНК-4, установленного на высоте свыше 2 м – в зоне, недалеко от воздуховодов вентиляционной системы. Данная высота выбрана для оценки эффективности удаления загрязнённого воздуха и выявления возможных застойных зон в верхних слоях помещения. Применение поверенного оборудования обеспечивает высокую точность измерений, что позволяет надёжно подтвердить достоверность данных прототипа и использовать их для его калибровки и валидации.



Рис. 5. Измерение параметров газов (CH_4 , NH_3 , H_2S , CO_2) прототипом на уровне 4 м



Рис. 6. Сверка полученных показаний измерений поверенным прибором и прототипом

На рис. 5 показано проведение измерений на высоте 4 м от пола – в зоне, приближенной к уровню расположения вытяжных систем. В данном слое, как правило, наблюдается накопление легких газов, таких как метан, в то время как концентрации более тяжелых компонентов снижается за счет естественного распределения. Замеры на этой высоте позволяют оценить эффективность функционирования вытяжной вентиляции, а также выявить возможные утечки, застойные области или неоднородность воздушных потоков по вертикальному сечению помещения. Полученные данные важны для анализа общей системы воздухообмена и оптимизации ее работы.

На рис. 6 показан процесс сравнительного анализа данных, в ходе которого сопоставлялись показания разработанного прототипа с результатами измерений, полученными с помощью сертифицированного поверенного прибора ГАНК-4. Данная процедура является обязательным этапом валидации экспериментальной методики и направлена на подтверждение точности и достоверности работы прототипа. Совпадение или высокая степень корреляции между данными служит обоснованием для дальнейшего практического применения устройства в системах мониторинга воздушной среды на животноводческих объектах.

Таким образом, экспериментальные исследования были организованы с учетом вертикальной неоднородности воздушной среды в животноводческом помещении, что позволило получить комплексную картину распределения концентраций аммиака, метана, сероводорода и углекислого газа по высоте. Результаты исследований представлены в табл. 1–4, где приведены средние, максимальные и минимальные значения концентраций газов по каждому уровню за период наблюдений.

Таблица 1

Результаты измерения концентрации аммиака в помещении животноводческого комплекса

| Номер испытания | Высота h, м | Концентрация аммиака, мг/м ³ | | | |
|-----------------|-------------|---|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0,5 | 10,5 | 10,7 | 10,6 | 10,4 |
| 2 | 1 | 17,6 | 17,9 | 17,5 | 17,3 |
| 3 | 1,5 | 24,8 | 24,4 | 24,5 | 24,7 |
| 4 | 2 | 28 | 27,6 | 27,7 | 27,9 |
| 5 | 2,5 | 29 | 29,7 | 29,4 | 29,5 |
| 6 | 3 | 21,8 | 22,0 | 21,8 | 21,5 |
| 7 | 3,5 | 15,2 | 15,5 | 15,7 | 15,3 |
| 8 | 4 | 11,9 | 11,7 | 11,6 | 11,5 |
| 9 | 4,5 | 8,3 | 7,9 | 8,2 | 8,1 |
| 10 | 5 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,3 |

Результаты измерений концентрации аммиака на различных высотных уровнях, представленные в табл. 1, выявляют четко выраженное вертикальное распределение газа в помещении. Наибольшие значения (до 29,9 мг/м³) зафиксированы на высоте 2,5 м – в зоне интенсивного выделения аммиака при разложении навоза и его начального распределения до попадания в зону действия вентиляции. Особую опасность представляет уровень 1,5 м – высота расположения органов дыхания обслуживающего персонала, где концентрация аммиака превышает 24 мг/м³. Это значение существенно выше предельно допустимой концентрации (ПДК = 20 мг/м³ [7]), что указывает на повышенный риск для здоровья работников и необходимость оптимизации режима вентиляции.

Таблица 2

**Результаты измерения концентрации углекислого газа
в помещении животноводческого комплекса**

| Номер испытания | Высота h, м | Концентрация углекислого газа, мг/м ³ | | | |
|-----------------|-------------|--|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0,5 | 2,36 | 2,4 | 2,4 | 2,45 |
| 2 | 1 | 2,4 | 2,41 | 2,41 | 2,42 |
| 3 | 1,5 | 2,35 | 2,36 | 2,36 | 2,37 |
| 4 | 2 | 1,4 | 1,42 | 1,44 | 1,46 |
| 5 | 2,5 | 1,2 | 1,24 | 1,2 | 1,26 |
| 6 | 3 | 1 | 0,91 | 0,88 | 0,8 |
| 7 | 3,5 | 0,81 | 0,72 | 0,76 | 0,84 |
| 8 | 4 | 0,6 | 0,51 | 0,45 | 0,36 |
| 9 | 4,5 | 0,42 | 0,43 | 0,33 | 0,24 |
| 10 | 5 | 0,2 | 0,2 | 0,26 | 0,26 |

Результаты измерений концентрации углекислого газа, представленные в табл. 2, показывают четкую зависимость его содержания от высоты: максимальные значения (до 2,45 мг/м³) зафиксированы в приземной зоне (0,5–1,5 м), где сосредоточены основные источники выделения CO₂ – дыхание животных. Однако на высоте 1,5 м – уровне дыхательной зоны персонала – концентрация CO₂ превышает 2,3 мг/м³, что находится на верхней границе допустимых временных норм (в производственных условиях предельно допустимые значения могут колебаться в диапазоне 2,0–2,5 мг/м³, хотя санитарные нормы устанавливают ПДК на уровне 1,0 мг/м³ [8]).

Таблица 3

Результаты измерения концентрации метана в помещении животноводческого комплекса

| Номер испытания | Высота h, м | Концентрация метана, мг/м ³ | | | |
|-----------------|-------------|--|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0,5 | 822 | 819,1 | 818,64 | 818,27 |
| 2 | 1 | 764 | 759,08 | 759,16 | 758,84 |
| 3 | 1,5 | 685 | 680,55 | 680,9 | 679,9 |
| 4 | 2 | 591 | 589,27 | 589,1 | 589,49 |
| 5 | 2,5 | 513 | 509,54 | 508,67 | 508,1 |
| 6 | 3 | 455 | 450,18 | 450,43 | 451,08 |
| 7 | 3,5 | 383 | 379,65 | 379,87 | 380,49 |
| 8 | 4 | 321 | 320,9 | 320,95 | 321,57 |
| 9 | 4,5 | 261 | 259,23 | 260,07 | 261,02 |
| 10 | 5 | 204 | 199,39 | 199,29 | 198,76 |

Результаты измерений концентрации метана, представленные в табл. 3, выявляют выраженную вертикальную градиацию: максимальные значения (до 822 мг/м³) зафиксированы на высоте 0,5 м – непосредственно в приземной зоне, где происходит интенсивное выделение газа в ходе ферментации органических отходов и кишечной деятельности животных. При этом, несмотря на отсутствие превышения нижнего предела взрывоопасности (около 5 000 мг/м³ [10]), стабильное присутствие метана в приземной зоне требует регулярного контроля – как с точки зрения пожарно-технической безопасности, так и в целях минимизации его вклада в парниковый эффект.

Таблица 4

**Результаты измерения концентрации сероводорода
в помещении животноводческого комплекса**

| Номер испытания | Высота h, м | Концентрация сероводорода, мг/м ³ | | | |
|-----------------|-------------|--|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0,5 | 1,92 | 1,87 | 1,94 | 1,99 |
| 2 | 1 | 2,22 | 2,15 | 2,26 | 2,31 |
| 3 | 1,5 | 2,46 | 2,38 | 2,49 | 2,53 |
| 4 | 2 | 2,34 | 2,28 | 2,36 | 2,42 |
| 5 | 2,5 | 2,14 | 2,07 | 2,18 | 2,21 |
| 6 | 3 | 2,08 | 1,99 | 2,11 | 2,15 |
| 7 | 3,5 | 1,76 | 1,69 | 1,78 | 1,84 |
| 8 | 4 | 1,64 | 1,57 | 1,66 | 1,72 |
| 9 | 4,5 | 1,60 | 1,53 | 1,62 | 1,68 |
| 10 | 5 | 1,58 | 1,51 | 1,59 | 1,65 |

Результаты измерений концентрации сероводорода, представленные в табл. 4, показывают чётко выраженную вертикальную градиацию распределения газа. Максимальные значения (до 2,53 мг/м³) зафиксированы на высоте 1,5 м – в зоне активного выделения H₂S при анаэробном разложении органических отходов, особенно в условиях повышенной влажности и недостатка кислорода. При этом все зарегистрированные концентрации остаются ниже предельно допустимой нормы (ПДК = 10 мг/м³ [9]). Стабильность показателей при повторных измерениях подтверждает воспроизводимость данных и достоверность применяемой методики.

На основе экспериментальных данных, приведенных в таблицах, построены графики распределения концентраций аммиака, углекислого газа, метана и сероводорода по высотным уровням (рис. 7–10). На графиках обозначены аналитические зависимости, по которым построены кривые распределения. Визуализация позволяет наглядно представить характер вертикального распределения газов, выявить критические зоны с максимальным накоплением вредных веществ и обосновать требования к проектированию и настройке систем вентиляции.

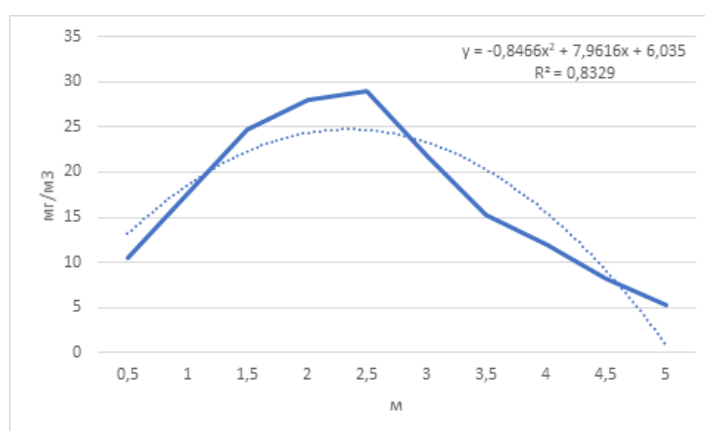


Рис. 7. График распределения концентрации аммиака в воздухе в проходе между рядами животноводческого комплекса в зависимости от высоты

График распределения концентрации аммиака по высоте (рис. 7) демонстрирует выраженный максимум: пиковое значение (около 29 мг/м³) зафиксировано на высоте 2,5 м, что соответствует зоне интенсивного выделения газа в процессе разложения навоза и метаболической активности животных. Концентрация снижается как в приземной области (до 0,5 м), так и в верхних слоях воздуха (выше 3 м), что указывает на частичную эффективность работы вентиляционных систем по отводу загрязнённого воздуха. Однако на высоте 1,5 м – уровне дыхательной зоны обслуживающего персонала – концентрация аммиака остаётся выше предельно допустимой нормы, что свидетельствует о потенциальной угрозе для здоровья работников и необходимости оптимизации режима воздухообмена. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,83$ подтверждает высокую степень достоверности аппроксимации и надёжность экспериментальных данных. Форма кривой указывает на неоднородное перемешивание воздушных масс в помещении, что обуславливает локальное накопление вредных веществ.

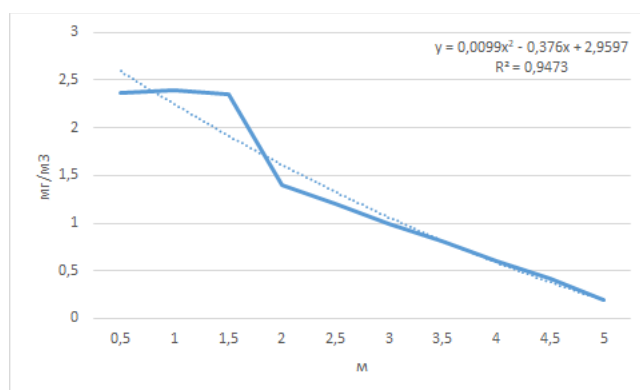


Рис. 8. График распределения концентрации углекислого газа в воздухе в проходе между рядами животноводческого комплекса в зависимости от высоты

График распределения концентрации углекислого газа по высоте (рис. 8) демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению его содержания с увеличением высоты, что обусловлено локализацией источников выделения – животных и органических отходов – в приземной зоне. Наибольшие значения (около 2,4 мг/м³) зафиксированы на высоте 0,5–1,5 м, где сосредоточена основная масса поголовья и происходит интенсивное дыхание. При этом концентрация CO₂ на уровне 1,5 м превышает рекомендуемые пределы для производственных помещений (1,0–2,0 мг/м³), что может указывать на недостаточную интенсивность вентиляции или высокую плотность размещения животных. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$ свидетельствует о высокой точности аппроксимации и достоверности экспериментальных данных.

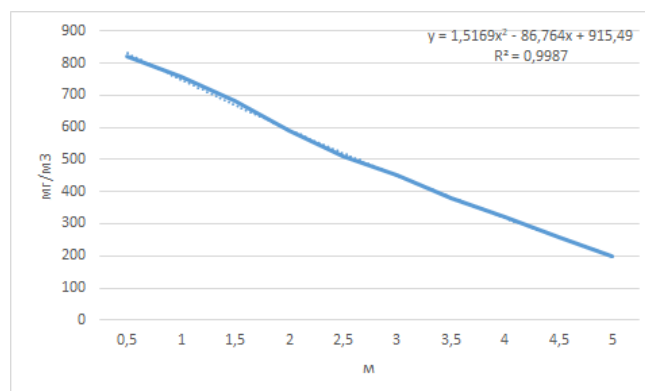


Рис. 9. График распределения концентрации метана в воздухе в проходе между рядами животноводческого комплекса в зависимости от высоты

График распределения концентрации метана по высоте (рис. 9) показывает плавное уменьшение его содержания – от максимальных значений около 820 мг/м³ на уровне 0,5 м до примерно 200 мг/м³ на высоте 5 м. Эта закономерность соответствует физическим свойствам метана, который легче воздуха и стремится подниматься вверх, однако интенсивно выделяется в приземной зоне в ходе кишечной ферментации и разложения органических отходов. Тем не менее значительные концентрации метана сохраняются на средних высотах (до 3–4 м), что указывает на неэффективный отвод газа системами вентиляции. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$ свидетельствует о почти полном соответствии модели экспериментальным данным, подтверждая исключительно высокую точность и надёжность полученной зависимости.

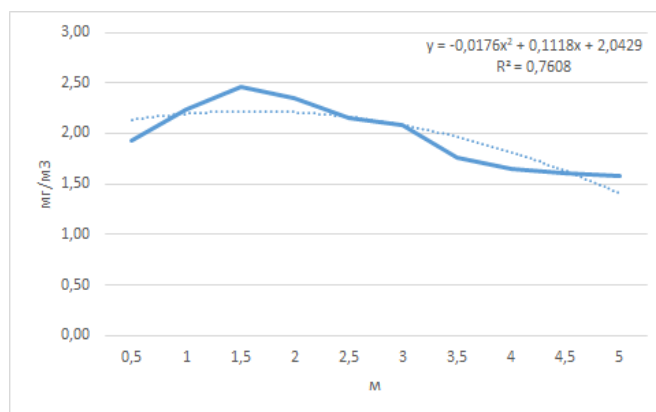


Рис. 10. График распределения концентрации сероводорода в воздухе в проходе между рядами животноводческого комплекса в зависимости от высоты

График распределения концентрации сероводорода по высоте (рис. 10) демонстрирует чётко выраженный максимум на уровне 1,5 м, где зафиксированы значения около 2,5 мг/м³. Эта зона соответствует интенсивному выделению H_2S при анаэробном разложении органических отходов, особенно в условиях высокой влажности. Снижение концентрации как в приземной области (до 0,5 м), так и в верхних слоях помещения указывает на частичное рассеивание газа под действием работы вентиляции. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,76$ свидетельствует об удовлетворительной согласованности модели с экспериментальными данными. Форма кривой подтверждает неоднородность воздушных потоков и наличие застойных зон, способствующих локальному накоплению токсичного газа.

Для более глубокого анализа характера загрязнения воздушной среды в животноводческом помещении проведено исследование вертикального распределения четырёх ключевых газовых компонентов – аммиака, углекислого газа, метана и сероводорода. Ниже приведены количественные показатели их концентраций на начальном (0,5 м) и конечном (5 м) уровнях измерений, а также общие закономерности изменения содержания по высоте:

1. Аммиак:

- начальная концентрация: около 10 мг/м³ на уровне 0,5 м;
- тенденция: стабильное снижение концентрации с ростом высоты;
- конечная концентрация: около 5 мг/м³ на уровне 5 м.

2. Углекислый газ:

- начальная концентрация: около 2,3 мг/м³ на уровне 0,5 м;
- тенденция: устойчивое снижение концентрации с ростом высоты;
- конечная концентрация: около 0,2 мг/м³ на уровне 5 м.

3. Метан:

- начальная концентрация: около 800 мг/м³ на уровне 0,5 м;

- тенденция: постепенное уменьшение концентрации с ростом высоты;
- конечная концентрация: около 200 мг/м³ на уровне 5 м.

3. Сероводород:

- начальная концентрация: около 1,95 мг/м³ на уровне 0,5 м;
- тенденция: резкое снижение концентрации с ростом высоты;
- конечная концентрация: около 1,53 мг/м³ на уровне 5 м.

На основе комплексного анализа вертикального распределения вредных газов выявлены ключевые закономерности, имеющие важное теоретическое и практическое значение для обеспечения безопасных условий в животноводческих помещениях. Особое внимание уделено зонам повышенного риска, требованиям к регулированию качества воздуха в коровниках и оценке эффективности предложенной системы мониторинга:

1. Зона повышенной опасности: максимальные концентрации всех исследуемых газов зафиксированы в приземном слое, что связано с их источниками – дыханием животных, разложением навоза и ферментационными процессами. Особенно опасно накопление тяжёлых газов, таких как сероводород и углекислый газ, поскольку их высокие концентрации в этой зоне могут привести к удушью, отравлениям и даже летальным исходам как у животных, так и у обслуживающего персонала.

2. Регуляторные требования: для соблюдения норм безопасности труда и санитарно-гигиенических стандартов требуется целенаправленное управление воздушной средой именно в нижних слоях помещения, где наблюдается наибольшее загрязнение. Целесообразно внедрение автоматизированных систем контроля и регулирования, ориентированных на приземную зону, что позволит оперативно реагировать на превышение ПДК.

3. Эффективность системы: предложенная система автоматического определения и регулирования состава воздуха позволяет своевременно выявлять опасные зоны и принимать профилактические меры. Она обеспечивает своевременное обнаружение опасных скоплений газов и активацию мер по их устранению, включая запуск локальных вентиляционных и климатических установок, что способствует быстрому снижению концентраций до безопасных значений.

Таким образом, проведенный анализ позволяет не только выявить зоны критического риска, но и обосновать необходимость внедрения интеллектуальных систем управления загазованностью помещения, ориентированных на особенности вертикального распределения загрязняющих веществ. Учёт пространственного распределения концентраций вредных газов способствует более эффективной организации вентиляции, снижению нагрузки на здоровье животных и обслуживающего персонала, а также обеспечивает соответствие условий производства действующим санитарным, экологическим и производственным нормативам.

На основании полученных результатов измерений можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Внедрить автоматизированную систему контроля с использованием разработанного устройства для мониторинга параметров воздушной среды на различных высотных уровнях, что обеспечит оперативное выявление опасных концентраций газов.

2. Использовать программное обеспечение, способное в режиме реального времени сопоставлять измеренные данные с предельно допустимыми концентрациями и при превышении пороговых значений автоматически активировать системы вентиляции или кондиционирования.

3. Сконцентрировать усилия по улучшению качества воздуха на приземном слое, где зафиксированы максимальные концентрации вредных веществ, что наиболее актуально для обеспечения безопасности персонала и благополучия животных.

Заключение

Использование разработанных измерительных и аналитических средств позволило не только зафиксировать, но и подробно охарактеризовать пространственное распределение концентраций аммиака, метана, углекислого газа и сероводорода в животноводческих помещениях. Выявлено, что в приземной зоне (0,5–1,5 м) концентрация аммиака существенно превышает предельно допустимые нормы, что создает прямую угрозу здоровью обслуживающего персонала, может оказывать негативное влияние на физиологическое состояние животных и способствовать ухудшению экологической обстановки в помещении и за его пределами.

В сложившихся условиях внедрение современных систем мониторинга газовой среды в животноводстве представляет собой не просто техническое усовершенствование, а необходимое условие для обеспечения безопасных, экологически устойчивых и экономически эффективных производственных процессов. Интеграция автоматизированных измерительных устройств с программным обеспечением, способным оперативно реагировать на отклонения от нормативных показателей, обеспечивает своевременную корректировку параметров воздушной среды и предупреждение потенциально опасных ситуаций.

Такие технологии создают основу для сочетания между высокой продуктивностью отрасли и ответственным подходом к безопасности труда, благополучию животных и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [11–15].

Список источников

1. Шкрабак В.С. Отраслевые проблемы охраны труда и пути их эффективного решения // Безопасный и комфортный город: сб. научных трудов по материалам IV Междунар. науч.-практ. конф. Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. С. 561–564. EDN ACZHMV.
2. Шкрабак Р.В. Производственный травматизм и заболеваемость – общемировая проблема веков: пути динамичного снижения и ликвидации // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 4 (52). С. 78–84.
3. Контарева В.Ю. Условия труда в животноводстве и их влияние на здоровье работников // Перспективы устойчивого развития аграрно-пищевых систем на основе рационального использования региональных генетических и сырьевых ресурсов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Донской государственный аграрный университет, 2023. С. 266–270. EDN FWIJD.
4. Анализ основных причин профессиональной заболеваемости работников животноводства / Е.С. Шаброва [и др.] // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 130–134. DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp130-134. EDN RGKMIZ.
5. Assessing influence factors on daily ammonia and greenhouse gas concentrations from an open-sided cubicle barn in hot Mediterranean climate / P.R. D’Urso [et al.] // Animals. 2021. № 11 (5). P. 1400. DOI: 10.3390/ani11051400.
6. Комлацкий Г.В., Элизбаров Р.В. Технологические аспекты снижения выбросов парниковых газов в животноводстве // Научный журнал КубГАУ. 2022. № 181 (07). С. 116–126. DOI: 10.21515/1990-4665-181-012. EDN: ZCNTZO.
7. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Влияние системы удаления навоза на концентрацию аммиака в коровниках с беспривязным содержанием // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2 (119). С. 104–117. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116. EDN OOTRET.
8. Технология снижения газовых выбросов животноводческих ферм / Н.Б. Бондаренко [и др.] // Вестник РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 1. С. 32–40. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40.

9. Довлатов И.М., Юрочка С.С., Благоев Д.А. Анализ экспериментальных данных газового состава воздуха на животноводческой ферме // *Аграрная наука*. 2023. № 7. С. 116–120. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-372-7-116-120. EDN SIYBAH.
10. Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е. Роль метана в современном изменении климата. М.: Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, 2018. 106 с. EDN TZBKQY.
11. Андреев Л.Н., Жеребцов Б.В. Система автоматизации параметров воздушной среды животноводческих помещений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. № 5 (91). С. 133–138. EDN NTPLHT.
12. Заходякина Е.О., Туманова М.И. Безопасность труда при работе на животноводческих предприятиях // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. статей по материалам 77-й науч.-практ. конф. студентов по итогам НИР за 2021 г.: в 3-х ч. Ч. 2*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2022. С. 260–262. EDN OAUBSX.
13. Повышение безопасности труда работников животноводства / Т.А. Шендакова [и др.] // *Вестник аграрной науки Дона*. 2023. Т. 16. № 3 (63). С. 85–94. DOI: 10.55618/20756704_2023_16_3_85-94. EDN RSNMCM.
14. Economic and Environmental Benefits of Digital Agricultural Technological Solutions in Livestock Farming: A Review / G. Papadopoulos [et al.] // *Smart Agricultural Technology*. 2025. С. 13.
15. Supporting a healthy environment through livestock / M. Bran [et al.] // *Competitiveness of Agro-Food and Environmental Economy*. 2019. P. 40–46. DOI: 10.24818/cafee/2019/8/04.

References

1. Shkrabak V.S. Otrasleye problemy ohrany truda i puti ih effektivnogo resheniya // *Bezopasnyj i komfortnyj gorod: sb. nauchnyh trudov po materialam IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Orel: Orlovskij gosudarstvennyj universitet im. I.S. Turgeneva*, 2020. S. 561–564. EDN ACZHMV.
2. Shkrabak R.V. Proizvodstvennyj travmatizm i zabolevaemost' – obshchemirovaya problema vekov: puti dinamichnogo snizheniya i likvidacii // *Vestnik agrarnoj nauki Dona*. 2020. № 4 (52). S. 78–84.
3. Kontareva V.Yu. Usloviya truda v zhivotnovodstve i ih vliyanie na zdorov'e rabotnikov // *Perspektivy ustojchivogo razvitiya agrarno-pishchevyh sistem na osnove racional'nogo ispol'zovaniya regional'nyh geneticheskikh i syr'evykh resursov: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Donskoj gosudarstvennyj agrarnyj universitet*, 2023. S. 266–270. EDN FWIJDC.
4. Analiz osnovnyh prichin professional'noj zabolevaemosti rabotnikov zhivotnovodstva / E.S. Shabrova [i dr.] // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2021. № 12. S. 130–134. DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp130-134. EDN RGKMIZ.
5. Assessing influence factors on daily ammonia and greenhouse gas concentrations from an open-sided cubicle barn in hot Mediterranean climate / P.R. D'Urso [et al.] // *Animals*. 2021. № 11 (5). P. 1400. DOI: 10.3390/ani11051400.
6. Komlackij G.V., Elizbarov R.V. Tekhnologicheskie aspekty snizheniya vybrosov parnikovyh gazov v zhivotnovodstve // *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2022. № 181 (07). S. 116–126. DOI: 10.21515/1990-4665-181-012. EDN ZCNTZO.
7. Vtoryj V.F., Vtoryj S.V. Vliyanie sistemy udaleniya navoza na koncentraciyu ammiaka v korovnikah s besprivyaznym soderzhaniiem // *AgroEkoInzheneriya*. 2024. № 2 (119). S. 104–117. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116. EDN OOTRET.
8. Tekhnologiya snizheniya gazovykh vybrosov zhivotnovodcheskikh ferm / N.B. Bondarenko [i dr.] // *Vestnik RUDN. Ser.: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2024. T. 32. № 1. S. 32–40. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40.
9. Dovlatov I.M., Yurochka S.S., Blagov D.A. Analiz eksperimental'nykh dannykh gazovogo sostava vozduha na zhivotnovodcheskoj ferme // *Agrarnaya nauka*. 2023. № 7. S. 116–120. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-372-7-116-120. EDN SIYBAH.

10. Semenov S.M., Govor I.L., Uvarova N.E. Rol' metana v sovremennom izmenenii klimata. M.: Institut global'nogo klimata i ekologii im. akademika Yu.A. Izraelya, 2018. 106 s. EDN TZBKQY.
11. Andreev L.N., Zherebcov B.V. Sistema avtomatizacii parametrov vozduшной sredy zhivotnovodcheskih pomeshchenij // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. № 5 (91). S. 133–138. EDN NTPLHT.
12. Zahodyakina E.O., Tumanova M.I. Bezopasnost' truda pri rabote na zhivotnovodcheskih predpriyatiyah // Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: sb. statej po materialam 77-j nauch.-prakt. konf. studentov po itogam NIR za 2021 g.: v 3-h ch. Ch. 2. Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. I.T. Trubilina, 2022. S. 260–262. EDN OAUBSX.
13. Povyshenie bezopasnosti truda rabotnikov zhivotnovodstva / T.A. Shendakova [i dr.] // Vestnik agrarnoj nauki Dona. 2023. T. 16. № 3 (63). S. 85–94. DOI: 10.55618/20756704_2023_16_3_85-94. EDN RSNCMM.
14. Economic and Environmental Benefits of Digital Agricultural Technological Solutions in Livestock Farming: A Review / G. Papadopoulos [et al.] // Smart Agricultural Technology. 2025. S. 13.
15. Supporting a healthy environment through livestock / M. Bran [et al.] // Competitiveness of Agro-Food and Environmental Economy. 2019. P. 40–46. DOI: 10.24818/cafee/2019/8/04.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 06.11.2025; одобрена после рецензирования: 20.11.2025; принята к публикации: 09.12.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 06.11.2025; approved after review: 20.11.2025; accepted for publication: 09.12.2025

Сведения об авторах:

Суховский Даниил Андреевич, старший преподаватель кафедры безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), e-mail: danich132@yandex.ru, SPIN-код: 3205-5754

Шкрабак Роман Владимирович, заведующий кафедрой безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), кандидат технических наук, доцент, e-mail: shkrabakrv@mail.ru, SPIN-код: 5773-7541

Шкрабак Владимир Степанович, профессор кафедры безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), доктор технических наук, профессор, e-mail: v.shkrabak@mail.ru, SPIN-код: 1017-8986

Information about the authors:

Sukhovskiy Daniil A., senior lecturer at the department of safety of technological processes and productions of Saint-Petersburg state agrarian university (196601, Pushkin, Peterburgskoe highway, 2), e-mail: danich132@yandex.ru, SPIN: 3205-5754

Shkrabak Roman V., head of the department of safety of technological processes and production of Saint-Petersburg state agrarian university (196601, Pushkin, Peterburgskoe highway, 2), candidate of technical sciences, docent, e-mail: shkrabakrv@mail.ru, SPIN: 5773-7541

Shkrabak Vladimir S., professor of the department of safety of technological processes and productions of Saint Petersburg state agrarian university (196601, Pushkin, Peterburgskoe highway, 2), doctor of technical sciences, professor, e-mail: v.shkrabak@mail.ru, SPIN: 1017-8986