

Научная статья

УДК 631.22 636.083

doi: 10.28983/asj.y2023i10pp154-160

СО₂ как индикаторный газ для определения воздухообмена в коровнике

Валерий Федорович Вторый, Сергей Валерьевич Вторый

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vvtoryj@yandex.ru

Аннотация. Производство молока и говядины сопровождается выделением в атмосферу климатически активных газов (СО₂, СН₄, N₂O, NH₃, H₂S), которые создают «парниковый эффект» и наносят ущерб окружающей среде. Дневной выброс газов лактирующей коровой может составлять до 7 кг в СО₂-эквиваленте. Для контроля и снижения выбросов этих газов необходимо определение их массы, что представляет проблему для прямых замеров при естественной системе вентиляции коровников. В настоящее время применяются косвенные измерения с использованием индикаторных газов. Целью исследований является конкретизация методики расчета кратности воздухообмена с использованием СО₂ в качестве индикаторного газа для условий коровника. Методика исследований состоит из этапа экспериментальных исследований на молочных фермах КРС и расчета воздухообмена в коровниках. Воздухообмен, температура и скорость движения воздуха имеют тесную взаимосвязь и влияют на формирование газового состава атмосферы коровника, что подтверждается и нашими исследованиями. Коэффициент детерминации уравнения регрессии $R^2 = 0.99$ свидетельствует о безусловном влиянии интенсивности воздухообмена на концентрацию СО₂ в коровнике. В зимнее время среднее значение концентрации СО₂ в коровнике выше в 2,4 раза, чем летом, что определяется разницей воздухообменов в 2,3–8,0 раза раз. Коэффициенты вариации характеризующие разброс значений концентрации СО₂ по площади коровника составляют зимой 16,1 %, летом 17,9 % и существенно не различаются. Следовательно, метод расчета воздухообмена с использованием СО₂ в качестве индикаторного газа может применяться в расчетах выбросов климатически активных газов на фермах крупного рогатого скота.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; коровник; климатически активные газы; парниковые газы; углекислый газ.

Для цитирования: Вторый В. Ф., Вторый С. В. СО₂ как индикаторный газ для определения воздухообмена в коровнике // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 154–160. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp154-160>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

CO₂ as a tracer gas for determining the air exchange in a cow barn

Valerii F. Vtoryi, Sergei V. Vtoryi

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, Saint Petersburg, Russia
e-mail: vvtoryj@yandex.ru

Abstract. Milk and beef production goes along with the atmospheric emission of climatically active gases (CO₂, CH₄, N₂O, NH₃, H₂S), which create a “greenhouse effect” and damage the environment. A lactating cow may release up to 7 kg of gases in CO₂-equivalent per day. To control and reduce emissions of these gases, it is necessary to determine their mass. The direct measurements pose a certain problem under the natural ventilation system in the cow barns. The current solution is the indirect measurements making use of tracer gases. The research aimed to refine the methodology for calculating the air exchange rate using CO₂ as a tracer gas in the cow barn environment. The research included the experimental study on the dairy cattle farms and calculation of air exchange in the cow barns. Our research confirmed that the air exchange, temperature and air velocity had a close



interrelation. They affected the gas composition of the inside air in the cow barn. The determination coefficient of the regression equation $R^2 = 0.99$ testified to the unconditional influence of air exchange intensity on CO_2 concentration in the cow barn. In winter, the average CO_2 concentration in the cow barn was 2.4 times higher than in summer. That was determined by the difference in the air exchange by 2.3 to 8 times. Variation coefficients characterizing the CO_2 dispersion over the cow barn area were 16.1 % in winter and 17.9 % in summer, i.e. did not differ significantly. So, the method of calculating the air exchange with CO_2 as a tracer gas can be used to determine the emissions of climatically active gases on cattle farms.

Keywords: cattle; cow barn; climatically active gases; greenhouse gases; carbon dioxide.

For citation: Vtoryi V. F., Vtoryi S. V. CO_2 as a tracer gas for determining the air exchange in a cow barn. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(10):154–160. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp154-160>.

Введение. В процессе сельскохозяйственного производства происходит выделение в атмосферу парниковых газов (ПГ), а именно углекислого газа CO_2 , метана CH_4 , оксида азота N_2O суммарное воздействие которых определяется CO_2 -эквивалентом. В животноводстве источниками ПГ являются животные, выдыхаемый ими CO_2 , в результате внутренней ферментации выделяется CH_4 , системы сбора и хранения навоза приводят к выбросам CH_4 и N_2O .

Кроме ПГ в процессе жизнедеятельности животных выделяются аммиак NH_3 и сероводород H_2S . Эти газы при превышении предельно допустимой концентрации (ПДК) могут быть опасны для животных и обслуживающего персонала и оказывают отрицательное влияние на окружающую среду. В совокупности с ПГ они представляют группу климатически активных газов (КАГ).

Для контроля величины и снижения выбросов КАГ в окружающую среду при содержании крупного рогатого скота (КРС) необходимо иметь методы и системы измерения и контроля этих процессов.

Выбросы КАГ молочными фермами крупного рогатого скота (КРС) процесс, зависящий от множества факторов, что подтверждается рядом исследований. На выбросы газов влияют сезон, при этом наблюдалась и суточная закономерность, физиологическое состояние коров, рацион кормления и другие факторы [6, 8, 11]. Диапазоны выбросов газов при воздействии этих факторов могут находиться для CH_4 от 14,8 до $17,3 \pm 2,1$ г·ч/корову, N_2O составили 0,085 до $0,120 \pm 0,060$ г·ч/корову. В среднем дневной выброс газов лактирующей коровой может составлять до 7 кг, или 2,5 т в год CO_2 -эквиваленте.

Навоз является источником выбросов CH_4 , N_2O . В среднем ежегодные выбросы N_2O из навоза могут изменяться от 0 до 25 г N_2O /кг живой массы крупного рогатого скота и зависят от способа обработки навоза [10]. Эмиссия NH_3 из навоза происходит в процессе его хранения и удаления из коровника и зависит от ряда внешних и внутренних условий [12, 4].

Наиболее сложной проблемой является измерения выбросов газов из коровника. Современные средства измерения позволяют зафиксировать только концентрацию газов внутри и снаружи помещения, но измерить объем выбросов не способны. Особенно остро эта проблема стоит при измерениях в помещениях с естественной системой вентиляции и неустойчивыми, турбулентными движениями воздуха.

Для определения скорости воздухообмена в зданиях с естественной вентиляцией нашли широкое применение методы косвенных измерений. Методы косвенных измерений основываются на тепловом балансе, балансе CO_2 , разности давлений, измерения индикаторных газов, многозонное моделирование.

Проведенный анализ нормативных документов и литературных источников по оценке выбросов климатически активных газов показал, что методики косвенных измерений с использованием индикаторных газов позволяют с погрешностью до 20 %, а в ряде случаев и более рассчитать объем выделяющихся газов в атмосферу [9]. Наиболее часто в качестве индикатора используется CO_2 с учетом массы тела и удоя. Отмечено, что при расчетах существующие модели у высокопродуктивных коров по сравнению с низкопродуктивными завышали выделение CO_2 в среднем на 17 % [7].

Анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что в целом результаты, отраженные в публикациях по выбросам КАГ очень разноречивы и требуются исследования для уточнения расчетов и коэффициентов эмиссии газов при содержании крупного рогатого скота в условиях РФ.

Целью исследований является конкретизация методики расчета кратности воздухообмена с использованием CO_2 в качестве индикаторного газа для условий коровника.





Методика исследований. Методика исследований состоит из двух этапов. Первый этап – экспериментальные исследования по измерению концентраций КАГ в действующих коровниках. Второй этап – методика расчета воздухообмена в коровниках на принципах косвенных методов измерения с использованием CO_2 в качестве индикаторного газа.

Исследования на первом этапе проводились на фермах Ленинградской области с привязным содержанием коров и поголовьем 150–200 голов. Фиксировались температура и относительная влажность воздуха, концентрация углекислого газа, аммиака, с одновременным замером этих параметров на прилегающей территории на расстоянии 10-15 м от фермы. Замер параметров производился стационарным измерительным комплексом круглосуточно, установленным в средней точке коровника и переносным комплектом в девяти точках, что позволило определить динамику временного и территориального изменения параметров микроклимата. Стационарный и переносной измерительные комплексы состояли из датчика температуры и относительной влажности ДВТ-02, датчика концентрации CO_2 EE820, архиватора МСД-200 с питанием постоянным током напряжением 24 В. Объем памяти архиватора обеспечивает 270 млн записей с дальнейшей трансляцией на компьютер в виде таблиц EXCEL для обработки и анализа.

На втором этапе производились расчеты с использованием данных полученных на первом этапе и принципов косвенных методов измерения с использованием CO_2 в качестве индикаторного газа. Методической основой для расчетов являются положения изложенные в [3, 1], которые устанавливают методы определения объемного расхода воздуха, кратности воздухообмена и использования CO_2 в качестве индикаторного газа в коровниках.

Исходные данные для расчета воздухообмена с использованием CO_2 : внутренний объем коровника V , м^3 ; количество голов коров n , гол.; средний суточный удой молока g , кг/гол.сут.; средняя масса одной головы m , кг; средняя концентрация CO_2 в коровнике q_k , ppm; средняя концентрация CO_2 в наружном воздухе q_n , ppm; средняя температура воздуха в коровнике t , $^{\circ}\text{C}$;

Внутренний объем коровника V имеется в проектной документации или получается в результате обмеров. Данные n , g , m – результат зоотехнического учета. Остальные данные q_k , q_n , t , ρ – результат непосредственных измерений этих параметров в коровнике.

Расчет воздухообмена.

1. Расчет параметров CO_2 .

Плотность CO_2 в коровнике ρ_k и наружном воздухе ρ_n , $\text{кг}/\text{м}^3$, в зависимости от температуры воздушной среды рассчитывается по выражению (1):

$$\rho_{(k,n)} = -0.0065 \times t + 1.908; \quad (1)$$

коэффициент перевода ppm в $\text{мг}/\text{м}^3$ $k_{(k,n)}$:

$$k_{(k,n)} = q_{(k,n)} \times \rho_{(k,n)}; \quad (2)$$

анализ данных представленных в методических рекомендациях [5] позволил определить зависимость выделения лактирующей коровой Q_{CO_2} при дыхании в виде математической модели (3):

$$Q_{\text{CO}_2} = -7.8 + 0.2197 \times m + 0.0211 \times g^2 + 0.0011 \times g \times m, \text{ л/ч}, \quad (3)$$

где g – средний суточный удой (5–30), кг/гол., или от 1500 до 9000 кг/гол. год; m – масса коровы (400–600), кг.

Температура воздуха в помещении оказывает влияние на процесс выделения CO_2 животным [2], что можно учесть коэффициентом k_t , вычисляемым по выражению

$$k_t = 0.0003 \times t^2 + 0.0181 \times t + 0.7592, \quad (4)$$

где k_t – поправочный температурный коэффициент; t – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

С учетом коэффициентов ρ и k_t , рассчитанных по формулам (1, 4), масса выдыхаемого углекислого газа M_{CO_2} одним животным в час будет составлять

$$M_{\text{CO}_2} = Q_{\text{CO}_2} \times \rho \times k_t \times 10^3, \text{ мг/ч}. \quad (5)$$

Эмиссия CO_2 из навоза, находящегося в помещении, составляет 1-4 % от CO_2 выдыхаемого животными, эту составляющую можно не учитывать в расчетах.

2. Расчет концентрации CO_2 в коровнике при отсутствии воздухообмена q_0 , мг/м^3 :

$$q_0 = \frac{M_{\text{CO}_2} \times n}{V}. \quad (6)$$

3. Интенсивность воздухообмена характеризуется кратностью воздухообмена k_V и рассчитывается по выражению

$$k_V = \frac{q_0}{(q_k - q_n)}, \text{ ч}^{-1}. \quad (7)$$

Результаты исследований. Проведенные замеры параметров микроклимата на действующих молочных фермах КРС в зимний период (январь–февраль) показали, что в этот период существует весьма ограниченный воздухообмен. В этот период времени температура наружного воздуха в течение суток составляла от -5 до -12 °С, естественный фон CO_2 450–480 ppm, NH_3 0,55–0,60 мг/м³. Расчеты кратности воздухообмена выполнены по предлагаемой методике.

В соответствии с принятой технологией содержания и обслуживания коров в дневное время выполняются технологические операции (раздача кормов, уборка навоза, проветривание коровника), в ночное время помещение закрыто и воздухообмен происходит за счет системы естественной вентиляции, что недостаточно (рис. 1). Снижение воздухообмена сопровождается ростом температуры воздуха в коровнике. Эти зависимости могут использоваться в алгоритмах систем управления обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях.

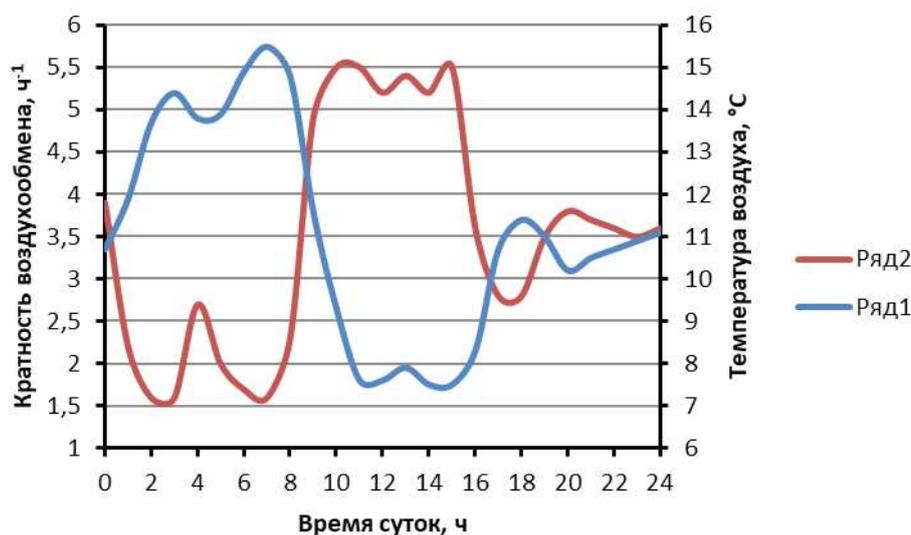


Рис. 1. Взаимосвязь кратности воздухообмена с температурой воздуха в коровнике: ряд 1 – температура воздуха на ферме, °С; ряд 2 – кратность воздухообмена, ч⁻¹

Интенсивность воздухообмена существенно влияет на параметры микроклимата в коровнике. Необходимо отметить, что для каждого животноводческого помещения воздухообмен определяется значительным количеством факторов от внешних погодных условий до особенностей выполнения технологических процессов на данной конкретной ферме. На рис. 2 представлена зависимость температуры воздуха в коровнике от воздухообмена в исследуемом коровнике.

Эта зависимость (см. рис. 2) имеет прямолинейный характер и коэффициент детерминации $R^2 = 0,789$ уравнения (8) свидетельствует о высоком влиянии воздухообмена на формирование температурного режима в помещении для содержания коров. Взаимосвязь этих переменных носит обратный характер, чем меньше воздухообмен, тем выше температура воздуха в коровнике за счет выделения большого количества тепла животными.

$$t = -1.723 \times k_V + 16.85. \quad (8)$$

Интенсивность воздухообмена определяется скоростью движения воздуха в коровнике v (рис. 3). Скорость движения воздуха зависит от типа вентиляции (естественная или принудительная), инфильтрации воздуха через стены, перекрытия помещения, окна, двери и другие каналы поступления свежего наружного воздуха и удаления загрязненного из помещения.



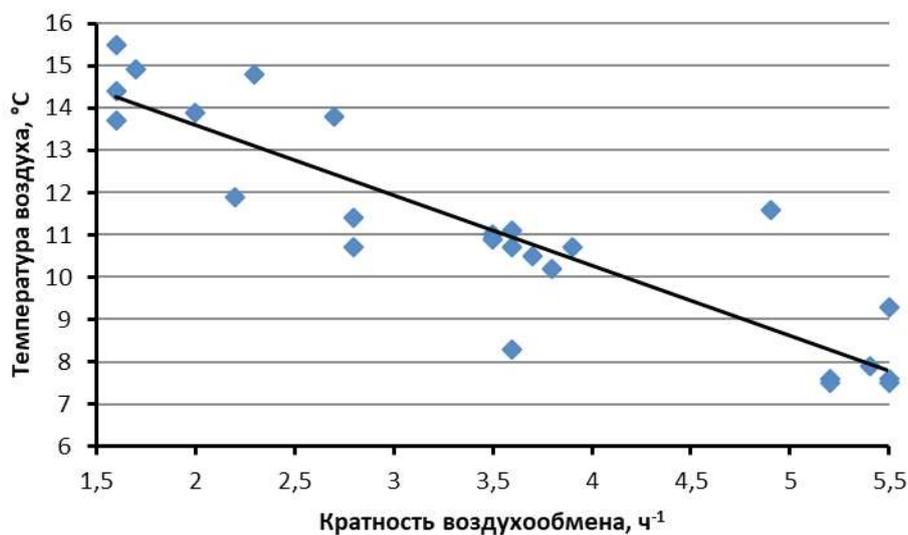


Рис. 2. Зависимость температуры воздуха от кратности воздухообмена в коровнике

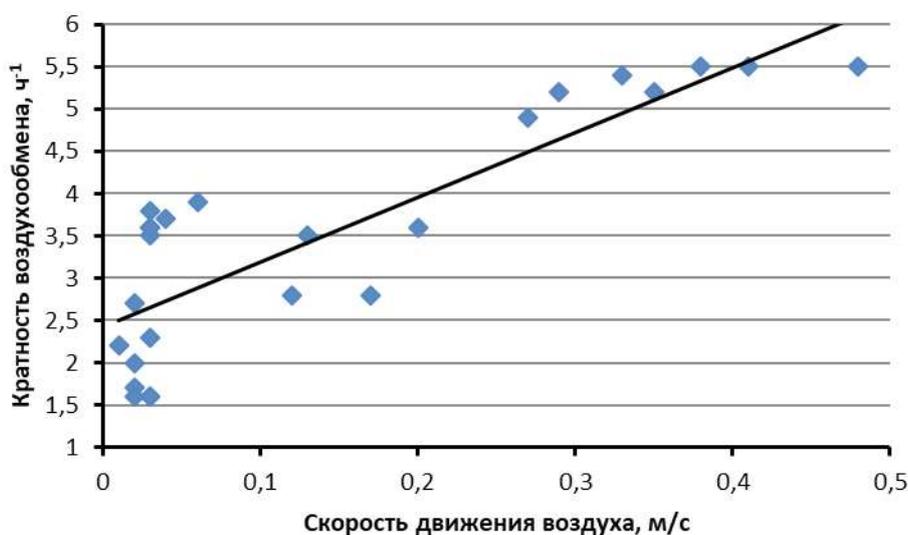


Рис. 3. Зависимость кратности воздухообмена от скорости движения воздуха в коровнике

Наиболее предпочтительна принудительная вентиляция, позволяющая управлять потоками воздуха в зависимости от производственной необходимости. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,700$ уравнения (9) свидетельствует о существенном влиянии скорости движения воздуха на интенсивность воздухообмена.

$$kV = 7,261v + 2,31, \quad (9)$$

где v – скорость движения воздуха, м/с.

За счет воздухообмена формируется газовый состав в животноводческих помещениях. На рис. 4 и уравнением (10) представлена зависимость концентрации CO_2 от кратности воздухообмена.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$ уравнения (10) свидетельствует о безусловном влиянии интенсивности воздухообмена на концентрацию CO_2 в коровнике. Необходимо отметить, что ПДК CO_2 для коровников установлена на уровне 4900 мг/м^3 (2500 ppm) и она в нашем случае обеспечивается при кратности воздухообмена $k_V > 2$.

$$q_k = 338.2 \times k_V^2 - 3359 \times k_V + 10225. \quad (10)$$

Используя обратную зависимость кратности воздухообмена от концентрации CO_2 и уравнение (11), можно определить для данного коровника при измеренных значениях концентрации CO_2 кратность воздухообмена, необходимую для обеспечения комфортных условий животным. Эта



методика может служить основой расчета выбросов климатически активных газов (CH_4 , N_2O , NH_3 , H_2S) в окружающую среду данной фермой.

$$k_v = 2E - 07 \times q_k^2 - 0.002 \times q_k + 9.319. \quad (11)$$

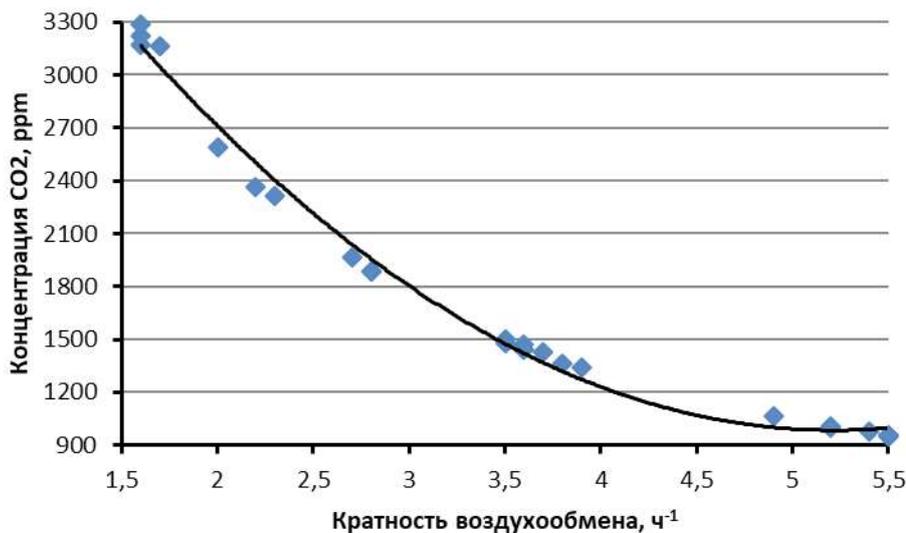


Рис. 4. Зависимость концентрации CO_2 от кратности воздухообмена

Статистический анализ результатов измерения концентрации CO_2 в исследуемых коровниках с привязным содержанием и естественной системой вентиляции представлен в таблице.

Средние статистические значения концентрации CO_2

Показатель	Январь–февраль	Август
Концентрация CO_2 , ppm:		
среднее значение;	2120	881
минимальное значение;	1616	661
максимальное значение.	2567	1161
Среднеквадратичное отклонение σ , ppm	321	155
Коэффициент вариации v , %	16,1	17,9
Кратность воздухообмена, ч ⁻¹	1,5–5,3	до 12,0

Из таблицы следует, что в зимнее время среднее значение концентрации CO_2 в кровнике в 2,4 раза выше, чем летом, что определяется разницей воздухообменов в 2,3–8,0 раза. Коэффициенты вариации v , характеризующие разброс значений концентрации CO_2 по площади коровника, составляют зимой 16,1 % и летом 17,9 %, они существенно не различаются.

Заключение. Производство продуктов животноводства в частности молока сопровождается выделением в атмосферу климатически активных газов, в состав которых входят парниковые CO_2 , CH_4 , N_2O и NH_3 , H_2S . Для определения величины выбросов КАГ в окружающую среду при содержании крупного рогатого скота с целью их сокращения необходимо иметь методы и системы измерения.

Наиболее сложной проблемой является измерения выбросов объемов газов из коровников с естественной системой вентиляции, прямое измерение объема выбросов в этом случае невозможно из-за отсутствия соответствующих средств измерения. Для таких случаев имеются методики косвенных измерений с использованием индикаторных газов и погрешностью измерений до 20 % и более.

Теоретические и исследования газового состава воздуха в коровниках с привязным содержанием показали, что существует тесная взаимосвязь между концентрацией CO_2 и интенсивностью воздухообмена и влияния объема воздухообмена на параметры микроклимата, например температуру и скорость движения воздуха. В зимнее время среднее значение концентрации CO_2 в кровнике в 2,4 раза выше, чем летом, что определяется разницей воздухообменов в 2,3–8,0 раза.

Полученные коэффициенты вариации характеризующие разброс значений концентрации CO_2 по площади коровника существенно не различаются, соответственно, метод расчета воздухообмена с использованием CO_2 в качестве индикаторного газа может применяться для определения выбросов климатически активных газов на фермах крупного рогатого скота в течении года.



1. Брюханов А.Ю., Козлова Н.П., Максимов Н.В. Способ определения и мониторинга величины массовых выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду из животноводческого помещения и система для его осуществления. Патент №2477886. Опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.
2. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Источники углекислого газа на молочных фермах крупного рогатого скота // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. № 23(4). С. 572–579. DOI:10.30766/2072-9081.2022/23/4/572-579.
3. ГОСТ Р 54857-2011 Здания и сооружения. Определение кратности воздухообмена помещений методом индикаторного газа. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2012. 20 с.
4. Гриднев П.И., Гриднева Т.Т. Эмиссия парниковых газов и аммиака из навоза в процессе уборки и подготовки его к использованию // *Вестник ВНИИМЖ*. 2017. №1(25). С.25–33.
5. РД-АПК 1.10.01.-1-18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2018. 166 с.
6. Broucek J. Production of Methane Emissions from Ruminant Husbandry: A Review // *Journal of Environmental Protection*. 2014. Vol. 5. P. 1482–1493. DOI: /10.4236/jep.2014.515141.
7. Huhtanen P., Bayat A.R., Lund P., Hellwing A.L.F., Weisbjerg M.R. *Short communication: Variation in feed efficiency hampers use of carbon dioxide as a tracer gas in measuring methane emissions in on-farm conditions* // *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103. No. 10. P. 9090–9095. DOI:10.3168 / jds.2020-18559.
8. Jackson H.A., Kinsman R.G., Massé D., Munroe J.A., Suer F.D., Patni N.K., Buckley D.J., Pattey E., Desjardins R., Wolynetz M.S. Measuring greenhouse gas emissions in a controlled environment dairy barn // *An ASAE Meeting Presentation*. 1993. URL: https://www.researchgate.net/publication/246794198_Measuring_greenhouse_gas_emissions_in_a_controlled_dairy_barn. (Дата обращения: 03.05.2023 г.).
9. Janke D., Yi Q., Thormann L., Hempel S., Amon B., Nosek Š., van Overbeke P., Amon T. Direct Measurements of the volume flow rate and emissions in a large naturally ventilated building // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Art. 6223. DOI: 10.3390/s20216223.
10. Rotz C. A. Symposium review: Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms // *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101. No. 7. P. 6675–6690. DOI: 10.3168/jds.2017-13272.
11. Rzeźnik W., Mielcarek P., Rzeźnik I. Effect of season on gases emissions from free-stall barns for dairy cows // *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 61(2). P. 86–91.
12. Vtoryi V., Vtoryi S., Lantsova E. Research Results of Ammonia Emission from Cattle Manure. In: *Environmentally Friendly Agriculture and Forestry for Future Generations. Book of Full Papers of International Scientific XXXVI CIOSTA & CIGR SECTION V Conference (26-28 May 2015, Saint-Petersburg, Russia)*. Saint Petersburg: SPBSAU. 2015. P. 293–296.

REFERENCES

1. Briukhanov A.Yu., Kozlova N.P., Maksimov N.V. Method for determining and monitoring the value of mass emissions of pollutants into the environment from livestock buildings and the system for its implementation. Patent on invention of RF No. 2477886. Publ. 20.03.2013. Bulletin No.8. (In Russ.).
2. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Sources of carbon dioxide emissions on a cattle dairy farm. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(4): 572–579. (In Russ.). DOI: 10.30766/2072-9081.2022/23/4/572-579.
3. State Standard 54857-2011 Buildings and structures. Determination of air change factor of rooms by method of indicator gas. Moscow: StandartinformPubl. 2012. 20 p. (In Russ.).
4. Gridnev P.I., Gridneva T.T. The greenhouse gases and ammonia emission at the manurecleaning and preparing it to use process. *Journal of VNIIMZH*. 2017; 1(25): 25–33. (In Russ.).
5. RD-APK 1.10.01.01-18. Management Directive for Agro-Industrial Complex “Recommended Practice for Engineering Designing of Cattle Farms and Complexes”. Moscow: Rosinformagrotekh; 2018: 166. (In Russ.).
6. Broucek J. Production of Methane Emissions from Ruminant Husbandry: A Review // *Journal of Environmental Protection*. 2014. Vol. 5. P. 1482–1493. DOI: /10.4236/jep.2014.515141.
7. Huhtanen P., Bayat A.R., Lund P., Hellwing A.L.F., Weisbjerg M.R. *Short communication: Variation in feed efficiency hampers use of carbon dioxide as a tracer gas in measuring methane emissions in on-farm conditions* // *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103. No. 10. P. 9090–9095. DOI:10.3168 / jds.2020-18559.
8. Jackson H.A., Kinsman R.G., Massé D., Munroe J.A., Suer F.D., Patni N.K., Buckley D.J., Pattey E., Desjardins R., Wolynetz M.S. Measuring greenhouse gas emissions in a controlled environment dairy barn // *An ASAE Meeting Presentation*. 1993. URL: https://www.researchgate.net/publication/246794198_Measuring_greenhouse_gas_emissions_in_a_controlled_dairy_barn. (Accessed 03.05.2023).
9. Janke D., Yi Q., Thormann L., Hempel S., Amon B., Nosek Š., van Overbeke P., Amon T. Direct Measurements of the volume flow rate and emissions in a large naturally ventilated building // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Art. 6223. DOI: 10.3390/s20216223.
10. Rotz C. A. Symposium review: Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms // *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101. No. 7. P. 6675–6690. DOI: 10.3168/jds.2017-13272.
11. Rzeźnik W., Mielcarek P., Rzeźnik I. Effect of season on gases emissions from free-stall barns for dairy cows // *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 61(2). P. 86–91.
12. Vtoryi V., Vtoryi S., Lantsova E. Research Results of Ammonia Emission from Cattle Manure. In: *Environmentally Friendly Agriculture and Forestry for Future Generations. Book of Full Papers of International Scientific XXXVI CIOSTA & CIGR SECTION V Conference (26-28 May 2015, Saint-Petersburg, Russia)*. Saint Petersburg: SPBSAU. 2015. P. 293–296.

*Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 23.06.2023; принята к публикации 30.06.2023.
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 23.06.2023; accepted for publication 30.06.2023.*

