

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.22.019

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-13-22



Разработка параметрической модели определения газового состава воздушной среды (аммиак, сероводород, углекислый газ) животноводческого помещения

Владимир Вячеславович Кирсанов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор

kirvv2014@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

Игорь Мамедяревич Довлатов[✉], канд. техн. наук, научный сотрудник

dovlatovim@mail.ru

Сергей Сергеевич Юрочка, младший научный сотрудник

yurochkasr@gmail.com

Илья Владимирович Комков, специалист

ilyakomkov10@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Параметры микроклимата влияют на продуктивность животных и их физиологическое состояние. Превышение допустимых концентраций газов приводит к заболеваниям животных, падению продуктивности и падежу молодняка КРС, поэтому целесообразно прогнозировать концентрацию газового состава в животноводческом помещении. С целью определения и распределения вредных газов (аммиак, сероводород, углекислый газ) в животноводческом помещении осуществлено 3D-моделирование фрагмента фермы в программном комплексе SolidWorks 2020. Созданы параметрические модели движения газов в различных условиях и определены оптимальные точки замеров концентрации газов в животноводческом помещении. Произведенное моделирование позволило определить направление воздушных потоков, обнаружить скопления и облака газов. Максимальная концентрация углекислого газа выявлена на уровне 0,9 м (скорость воздуха – 0 м/с) и на уровне 1,3 м (скорость – 0,75 м/с). Наибольшая концентрация сероводорода отмечена в области, граничащей с коньковым пространством (скорость воздуха – 0 м/с), и на уровне 2,25 м (скорость – 2 м/с). Наибольшая концентрация аммиака наблюдается под крышей и в области под коньком (скорость воздуха – 2 м/с). Рекомендовано устанавливать датчики сероводорода и аммиака под коньком, датчики углекислого газа, сероводорода и аммиака – в стойле, датчики углекислого газа и сероводорода – у кормового стола. Измерение концентрации необходимо производить на высоте 500, 1500 и 3000 мм. При увеличении концентрации выделяемого газа и прочих равных условиях увеличивается концентрация газа в облаке, но структура облака изменяется незначительно. Датчики опроса параметров необходимо устанавливать в закрытых продуваемых боксах, как в погодных метеостанциях.

Ключевые слова: микроклимат, КРС, аммиак, углекислый газ, сероводород, параметрическая модель, моделирование

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

© Кирсанов В.В., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Комков И.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Development of a parametric model for determining the gas composition of the air environment (ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide) of livestock premises

Vladimir V. Kirsanov, Corresponding Member of RAS, DSc (Eng), Professor

kirvv2014@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

Igor M. Dovlatov[✉], CSc (Eng), Research Engineer

dovlatovim@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3058-2446>

Sergey S. Yurochka, Junior Research Engineer

yurochkasr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Илья В. Комков, Expert

ilyakomkov10@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. Indoor climate parameters influence the productivity of animals and their physiological condition. Exceeding permissible concentrations of gases leads to animal diseases, loss of productivity, and the mortality of young cattle. Therefore, it is reasonable to predict the concentration of gas composition in the livestock houses. To determine and distribute harmful gases (ammonia, hydrogen sulphide, and carbon dioxide) in the livestock house, the authors performed the 3D modeling of a fragment of the farm in the SolidWorks 2020 software package. Parametric models of gas movement under different conditions were created and optimal measurement points of gas concentration in the livestock house were determined. The simulations made it possible to determine the direction of air flows and detect accumulations and clouds of gases. The maximum concentration of carbon dioxide was detected at 0.9m (an air speed of 0 m/sec) and at 1.3m (a speed of 0.75 m/sec). The highest concentration of hydrogen sulphide was found in the area bordering the ridge space (an air speed of 0 m/s) and at the level of 2.25 m (a speed of 2 m/s). The highest concentration of ammonia was observed under the roof and in the area under the ridge (an air speed of 2 m/s). It is recommended to install hydrogen sulphide and ammonia sensors under the ridge, while carbon dioxide, hydrogen sulphide and ammonia sensors – in the stall, carbon dioxide and hydrogen sulphide sensors – near the feed table. Concentrations should be measured at heights of 500, 1500, and 3000 mm. When the concentration of emitted gas increases and other conditions are equal, the concentration of gas in the cloud increases, but the structure of the cloud changes insignificantly. Parameter interrogation sensors should be installed in enclosed ventilated boxes in the same manner as in weather stations.

Keywords: indoor climate, cattle, ammonia, carbon dioxide, hydrogen sulfide, parametric model, modeling

For citation: 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. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):13-22. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22>.

Введение. Мониторинг и контроль показателей параметров микроклимата являются одними из важнейших аспектов животноводства. Для осуществления данного процесса определены ПДК – концентрации веществ, которые при повседневном контакте в течение длительного времени не вызывают патологических отклонений или заболеваний¹ [1-5].

При превышении ПДК того или иного газа у коровы развивается стресс, ухудшается физиологическое состояние вплоть до летального исхода. Также отсутствие нормирования потоков в зимний период приводит к значительному повышению риска заболеваний у крупного рогатого скота в связи с воздействием низких температур. В жаркий период есть риск получения теплового удара и неблагоприятной является сухость воздуха. Все перечисленные факторы значительно увеличивают стресс у КРС и, помимо возможных заболеваний, могут привести к падению продуктивности до 30...35%. Падеж молодняка при несоблюдении вышеизложенных условий может достигать 35% [6-13].

Цель исследований: теоретическое моделирование определения накопления и распределения

вредных газов (аммиак, сероводород, углекислый газ) в животноводческом помещении.

Задачами исследования являлись:

- разработка 3D-модели фрагмента фермы для загрузки в специализированную программу SolidWorks;
- описание газового состава воздуха в животноводческом помещении и различных внешних условий для параметрических моделей;
- создание модели движения газов в животноводческих помещениях в различных условиях с помощью специализированного программного обеспечения;
- определение оптимальных точек замеров газовой составляющей внутри животноводческого помещения;
- выявление влияния увеличения концентрации выделяемого газа на структуру облака.

Материалы и методы. В ходе исследований в программных комплексах SketchUp 2020 разработана упрощенная модель фермы с полным соответствием габаритных размеров помещений, приточных и вытяжных отверстий.

Моделирование движения воздуха внутри помещения производилось в программном комплексе SolidWorks 2020.

Для проведения параметрического моделирования по определению газового состава воздушной среды внутри животноводческого помещения разработана

¹ Об утверждении Ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации: приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 21 октября 2020 г. № 622.

3D-модель фермы, в которой присутствуют упрощения: изображение коров, отсутствуют стойла, закрыты ворота, отсутствуют коммуникации на колоннах и прочие мелкие допущения. Данные допущения были сделаны с целью оптимизации модели для возможности параметрического моделирования. В противном случае мощности вычислительных машин не хватит, а влияние добавленных упрощений на результат будет незначительным. Допущение, применяемое в расчете, заключается в том, что рассматривается участок фермы (часть коровника, где размещено 10 коров).

Результаты и их обсуждение. Для разработки параметрической модели авторами дополнительно проведено исследование газового состава воздуха (производные аммиака, сероводород, метан, органические соединения, аммиак). С помощью молярной массы газов (углекислый газ – 44 г/моль; сероводород – 34 г/моль; кислород – 32 г/моль; угарный газ – 28 г/моль; аммиак – 17 г/моль; метан – 16 г/моль), определяемой по таблице Менделеева, можно обнаружить их локализацию.

На распределение газов в помещении для КРС влияют количество тепла, массовая концентрация углекислого газа и массовые концентрации аммиака с сероводородом. Для коров количество выделяемого тепла составляет 1000 Вт; массовая концентрация углекислого газа – 0,04 мг/м³, аммиака – 50 мг/м³,

сероводорода – 1 мг/м³. Следовательно, наиболее эффективно проводить мониторинг углекислого газа ввиду того, что концентрация CO₂ быстрее других газов достигает отметки, приближенной к верхней границе ПДК. Также ряд газов имеет специфичную локализацию, в которой затруднительно располагать датчики. Датчик углекислого газа имеет наибольший срок эксплуатации по сравнению с датчиками других газов.

Параметрическое моделирование. Внешний вид разработанной параметрической модели определения газового состава воздушной среды животноводческого помещения, реализованной в виде фрагмента фермы, в котором размещено 10 гол., представлен на рисунке 1.

В свежем воздухе концентрация углекислого газа (CO₂) составляет от 0,03 до 0,045%. В соответствии с ветеринарным журналом о состоянии животных в выдыхаемом коровой воздухе концентрация углекислого газа составляет 4%.

Параметрическая модель 1. Летом, при штиле и отсутствии движения воздуха, углекислый газ в коровнике распространяется, как представлено на рисунке 2. Данная модель показывает, какая концентрация углекислого газа от 10 животных содержится в объеме 31,5×11,2×2,5 м (Д×Ш×В). В зоне скопления животных количество углекислого газа возрастает. Полученные результаты некорректно

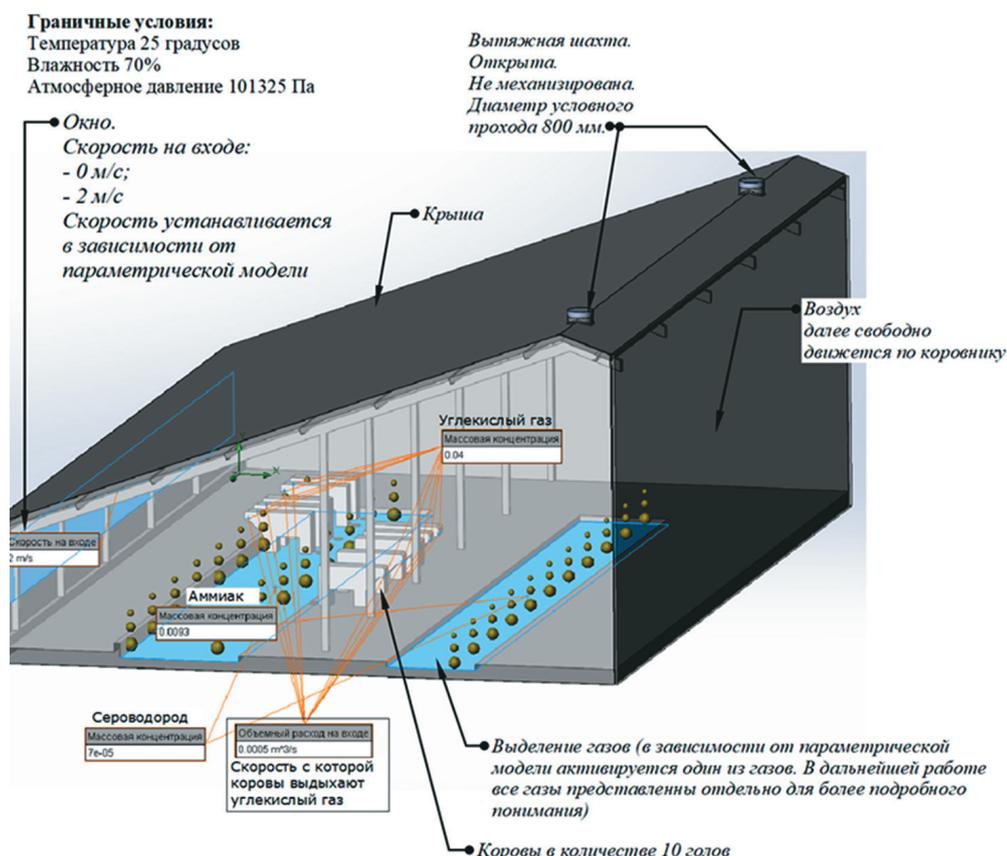


Рис. 1. Параметрическая модель граничных условий

Fig. 1. Parametric model of boundary conditions

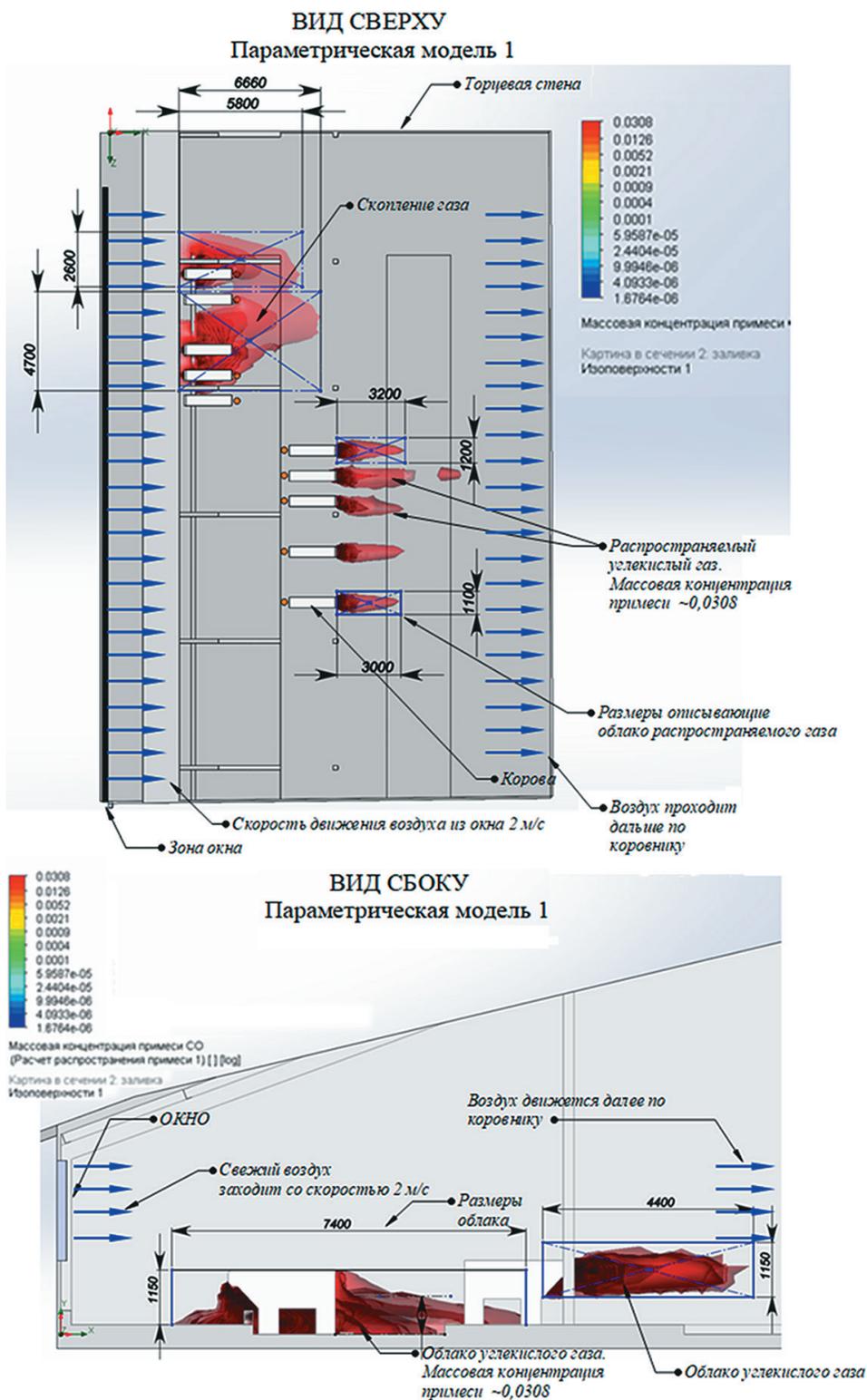


Рис. 2. Параметрическая модель распространения CO₂ (0,04) (отсутствие воздушного потока)

Fig. 2. Parametric model of CO₂ spreading (0.04) (no airflow)

использовать для прогнозирования превышения ПДК по углекислому газу, но корректно использовать для прогнозирования установки исполнительных механизмов микроклимата (датчиков, вентиляторов, шторок и пр.).

Параметрическая модель 2. При наличии воздушного потока параметрическая модель имеет другой

вид (рис. 3). На рисунке стрелками синего цвета изображены произвольные потоки движения воздуха, равные 0,75 м/с. Выявлено, что наибольшая концентрация углекислого газа достигается на уровне морды коровы, что соответствует 0,9 м. Рекомендуется рассматривать место установки датчиков на опорных стойках в интервале 0,4...1,0 м от пола.

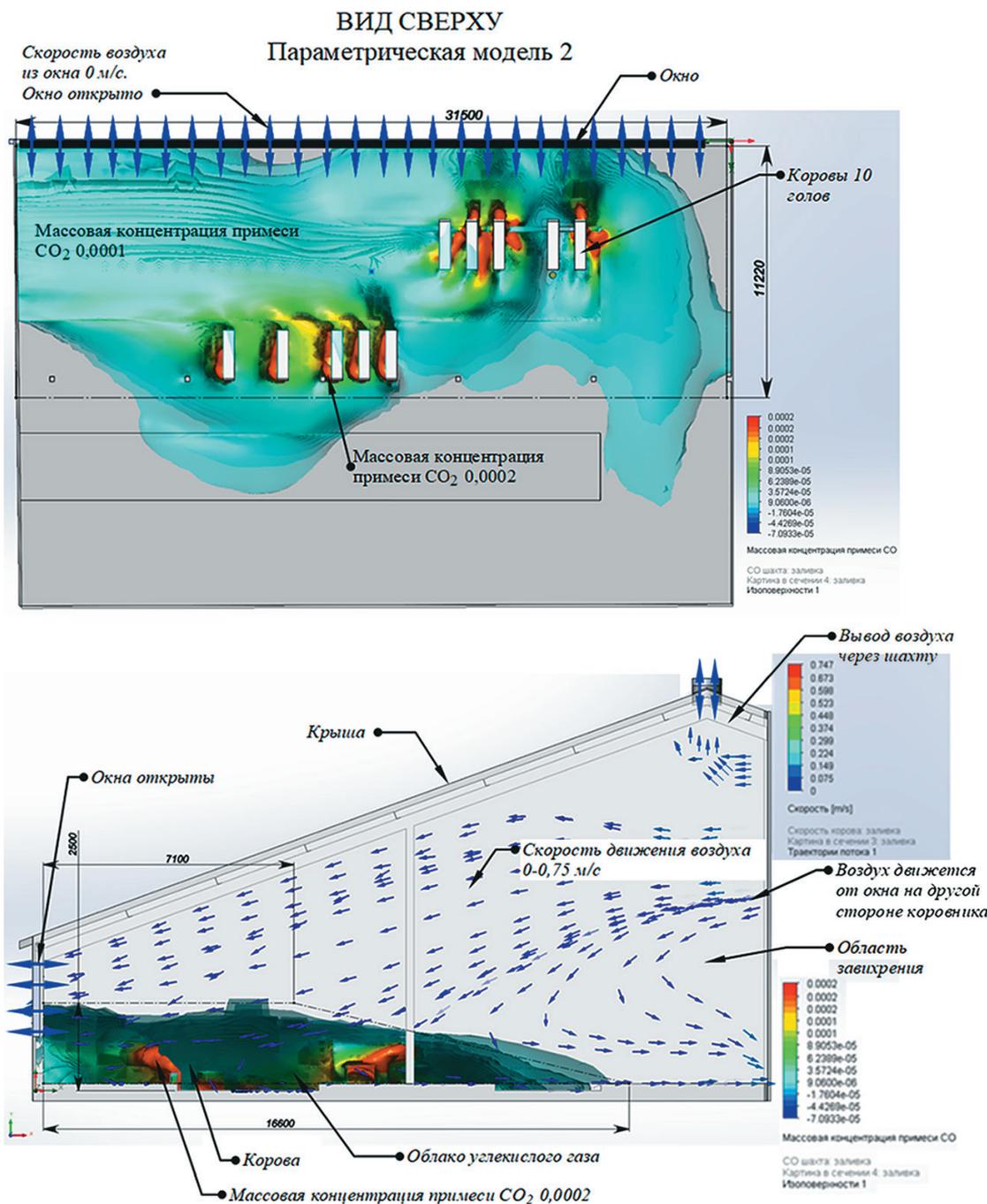


Рис. 3. Параметрическая модель распространения CO₂ (скорость воздушного потока – 0,75 м/с)

Fig. 3. Parametric model of CO₂ spreading (airflow velocity – 0.75 m/s)

В обоих случаях углекислый газ растворяется в общем объеме свежего воздуха, и его концентрация становится предельно малой, поэтому на модели отображение отсутствует. Следует вывод о том, что место установки и точку замеров углекислого газа на ферме следует выбирать с учетом внешней среды, но в любом случае расположение датчиков, измеряющих углекислый газ, не следует устанавливать выше 1,2 м.

Параметрическая модель показывает, что вся зеленая зона имеет концентрацию углекислого газа 1%, бирюзовая зона – от 0,045 до 0,07%. Благодаря данной модели мы можем наглядно видеть, что наибольшая

концентрация CO₂ локализуется возле животных, но при наличии достаточного воздушного потока происходит распространение данного газа по большей части коровника. Также можно увидеть, что уровень локации CO₂ выше высоты животного на несколько десятков сантиметров, выше локализация не установлена. Установлено, что максимальная концентрация углекислого газа наблюдается в области перед животным на уровне 1,30 м.

Параметрическая модель 3. На рисунке 4 показано облако распространения H₂S концентрацией 20 мг/м³ при условии, что свежий воздух поступает из окон со скоростью 2 м/с.

Параметрическая модель показывает скопление газа сероводорода в области работы скреперной установки, где находятся кал и моча. Газ, растворенный и перемещенный потоком воздуха, скапливается под потолком, сероводород легче других газов подвергается засасыванию вытяжкой. Это место скопления газа является постоянным и не зависит от временных характеристик. При изменении скорости входящего свежего воздуха насыщенность газа в облаке будет меняться. Было обнаружено, что наибольшая концентрация сероводорода находится на высоте 2,25 м.

Параметрическая модель 4. На рисунке 5 смоделирована ситуация, когда скорость воздушного потока имеет нулевое значение. Воздух произвольно движется со скоростью не более 0,3 м/с.

Из рисунка 5 следует, что основная часть сероводорода скапливается под коньком. Часть сероводородного облака оседает на полу, высотой не более 500 мм. Воздушные потоки и завихрения «прибивают» газ к полу в область, предназначенную для отдыха животных. Известно, что наибольшая концентрация сероводорода наблюдается в области, граничащей с коньковым пространством.

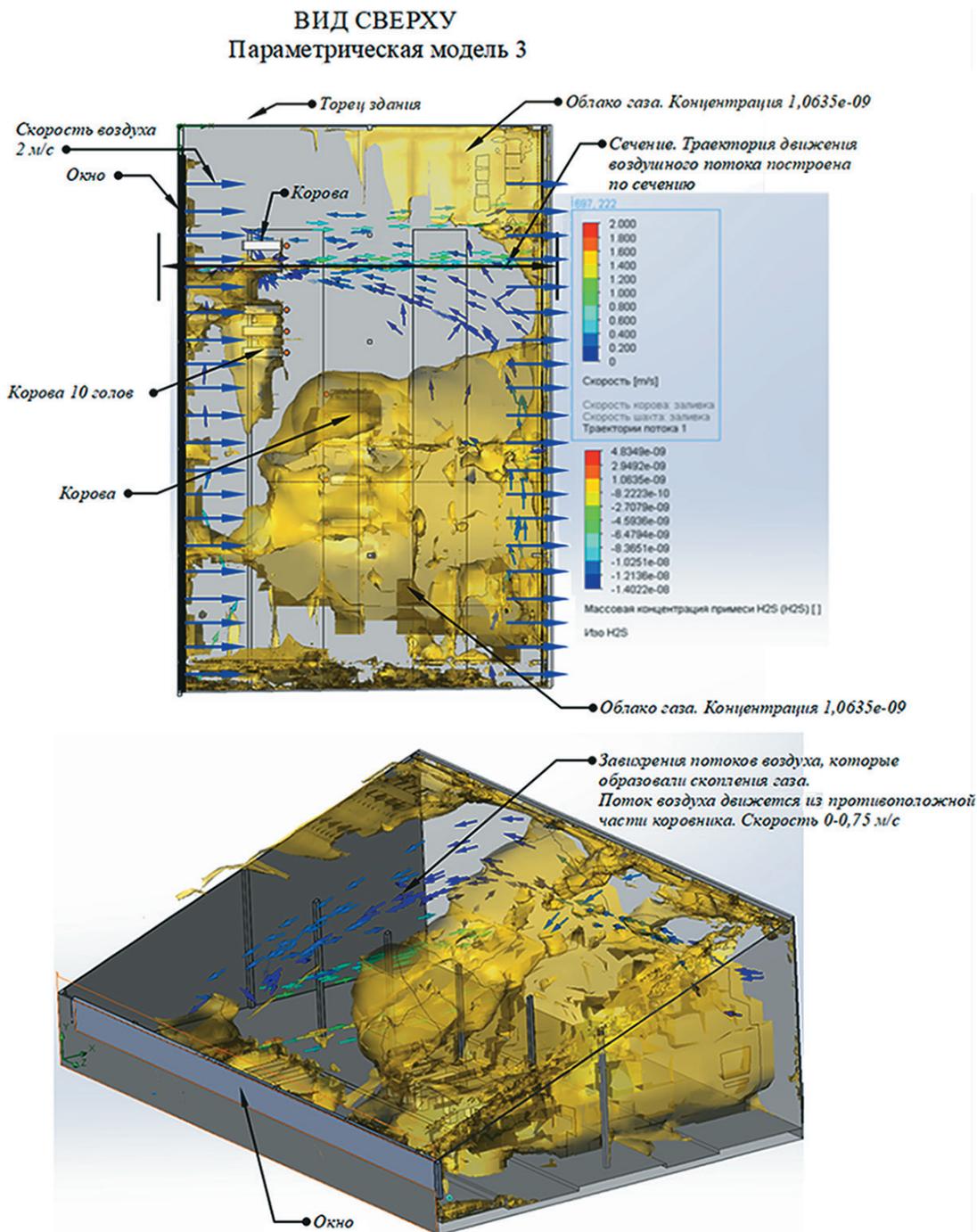


Рис. 4. Параметрическая модель распространения H₂S 20 мг/м³ (скорость воздушного потока – 2 м/с)

Fig. 4. Parametric model of H₂S spreading – 20 mg/m³ (airflow velocity 2 m/s)

Параметрическая модель 5. На рисунке 6 изображены закрытые окна, воздух произвольно движется со скоростью не более 0,3 м/с. Основная часть аммиака

скапливается под коньком. Малая часть аммиачного облака оседает на полу, высотой не более 500 мм, в том числе у кормового стола. Воздушные потоки

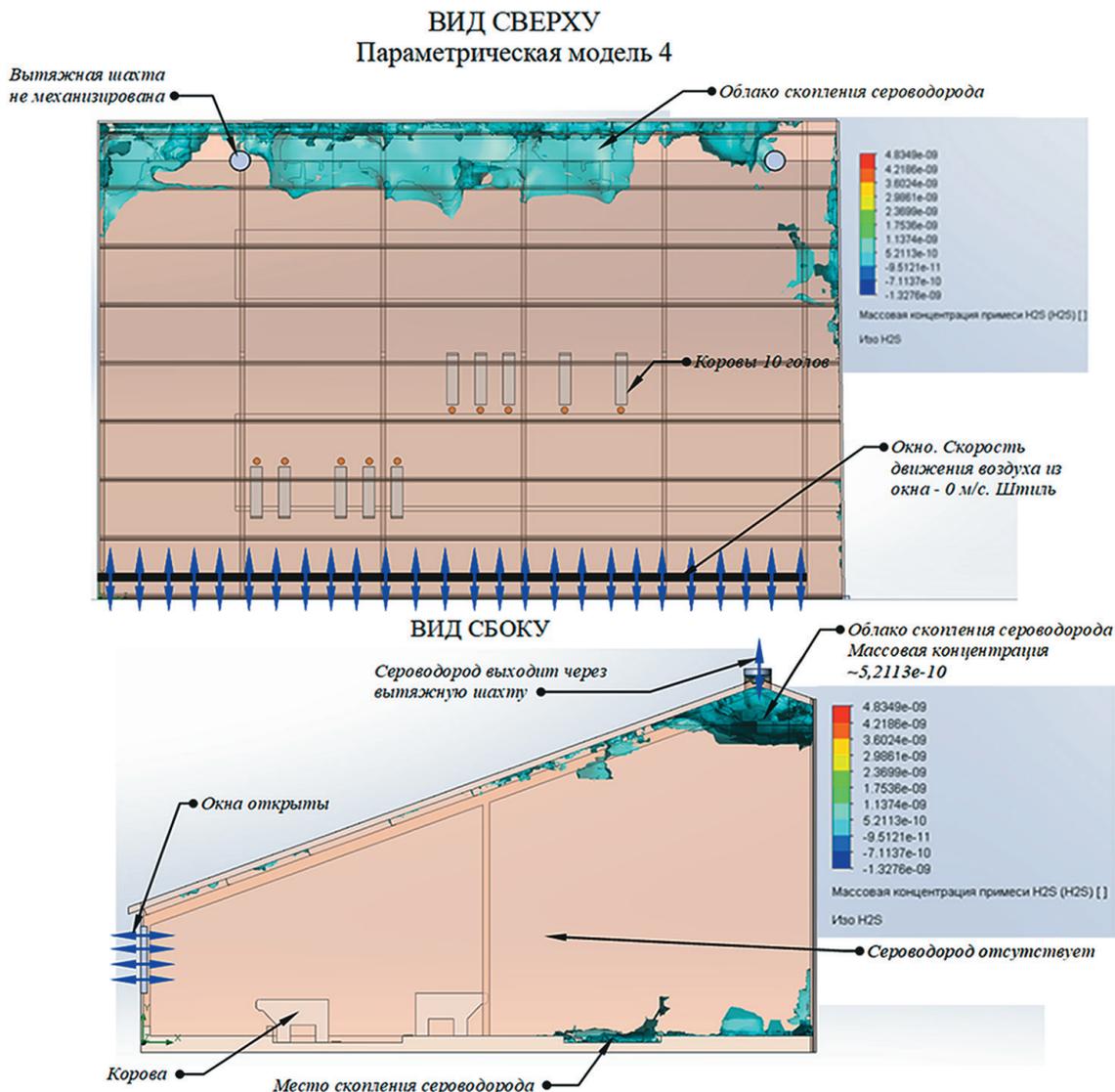


Рис. 5. Параметрическая модель распространения H₂S 20 мг/м³ (отсутствие воздушного потока)

Fig. 5. Parametric model of H₂S spreading – 20 mg/m³ (no airflow)

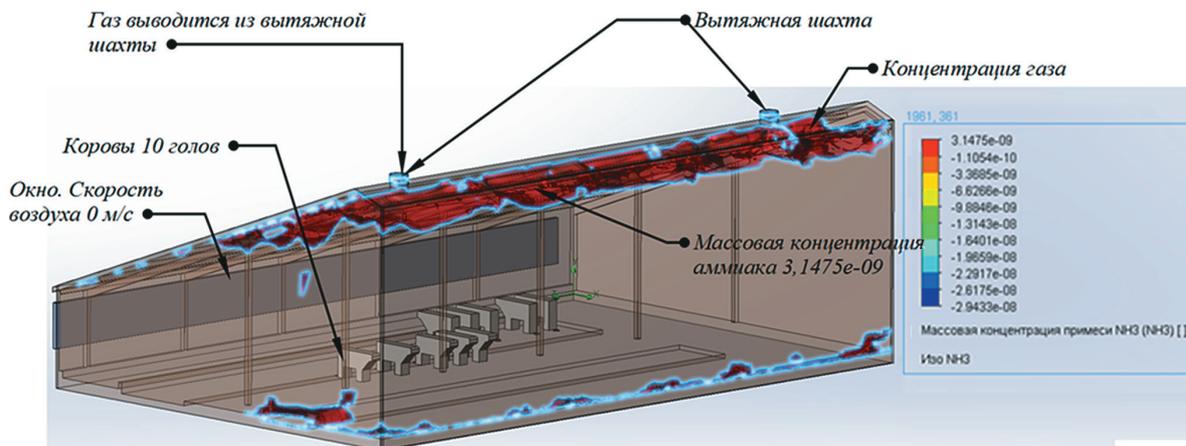


Рис. 6. Параметрическая модель распространения NH₃ 50 мг/м³ (скорость воздушного потока – не более 0,3 м/с)

Fig. 6. Parametric model of NH₃ spreading – 50 mg/m³ (air velocity max. 0.3 m/s)

и завихрения «прибивают» газ к полу, где животные отдыхают.

Анализируя модели распространения газа, прослеживаем закономерность: при штиле аммиак и сероводород скапливаются под коньком и выводятся из шахт; при поступлении через окно свежего воздуха со скоростью 2 м/с часть газа выводится из коровника, другая часть распространяется по коровнику и оседает в областях завихрения воздушных потоков.

Следовательно, организовав правильно движение воздушных потоков внутри помещения, можно добиться полного удаления газов из коровника. Также установлено, что наибольшая концентрация аммиака наблюдается в области коньковой зоны.

Параметрическая модель 6. На рисунке 7 изображено облако скопления аммиака. За счет перемещающихся потоков воздуха облако имеет схожие места скопления, но более плотную концентрацию.

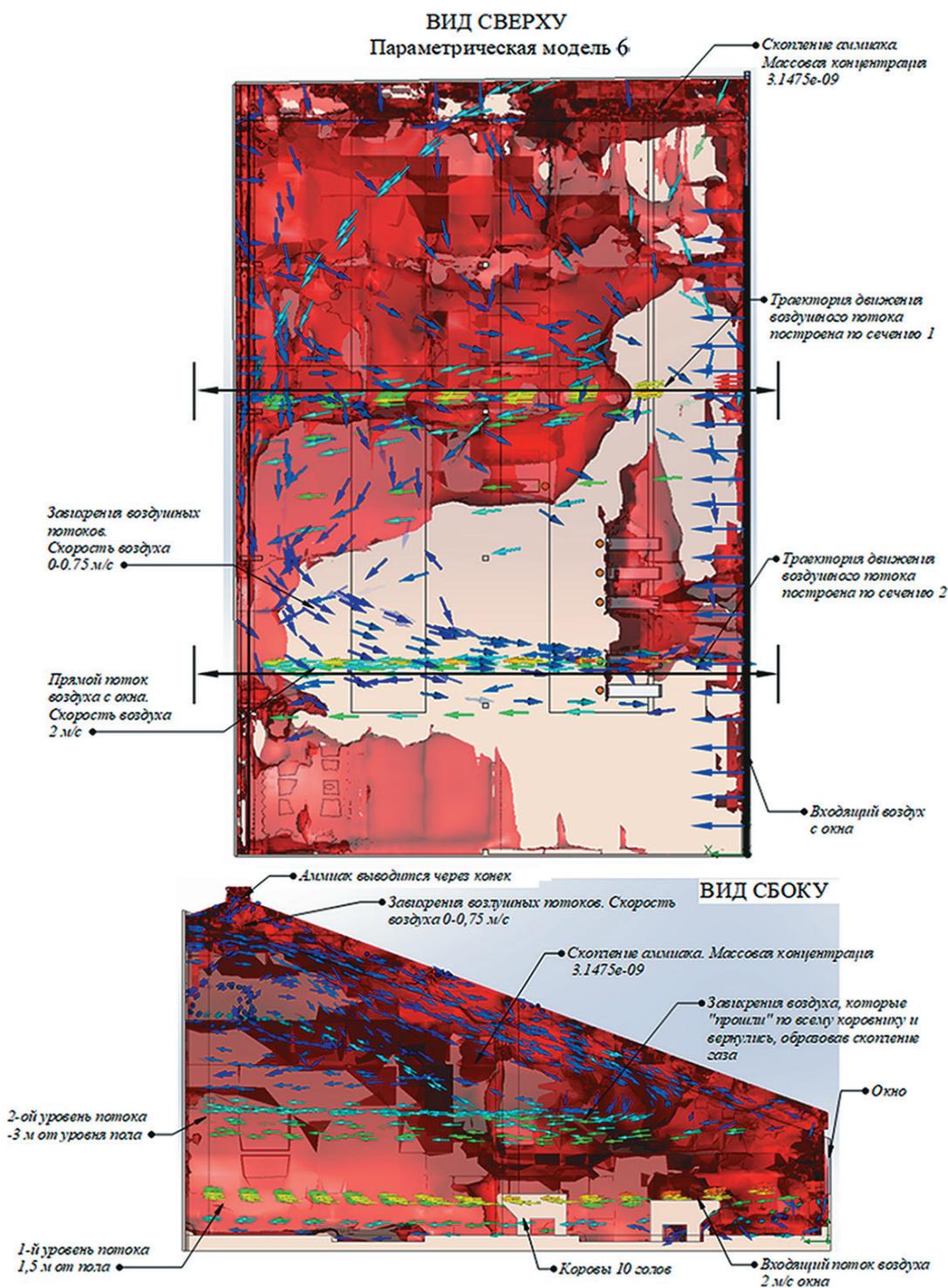


Рис. 7. Параметрическая модель распространения NH_3 50 мг/м^3 (скорость воздушного потока – 2 м/с)

Fig. 7. Parametric model of NH_3 spreading – 50 mg/m^3 (air velocity – 2 m/s)

Масса аммиака в 2 раза больше массы сероводорода, следовательно, его концентрация в облаке выше. Дополнительно выявлено, что в области отдыха коров аммиака меньше, и он стремится подняться выше.

Согласно данным параметрической модели при скорости в 2 м/с распределение аммиака является довольно обширным по всему помещению. Наибольшая концентрация аммиака наблюдается под крышей.

На следующем этапе исследований будет разработана методика исследования движения воздушных потоков и оценки газового состава воздуха внутри животноводческого помещения.

В дальнейших исследованиях будут смоделированы зимний/осенне-весенний варианты, увеличено число объектов, изменены начальные параметры микроклимата.

Выводы

1. Моделирование позволило определить направление воздушных потоков, обнаружить скопления

Список использованных источников

1. Довлатов И.М., Юферев Л.Ю. Увеличение живой массы разводимой птицы при очистке воздуха комбинированным рециркулятором // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67, № 3 (40). С. 124-131. EDN: WRWXXK
2. Kostarev S., Kochetova O., Ivanova A., Sereda T. Project development of a «smart» premise system for pig keeping. *E3S Web of Conferences*. 2021;254:08029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125408029>
3. Довлатов И.М., Рудзик Э.С. Улучшение микроклимата в сельскохозяйственном помещении за счет обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. № 3 (28). С. 47-52. EDN: YLSZET
4. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G., Lovarelli D., Provolo G. Dairy Cow Behavior Is Affected by Period, Time of Day and Housing. *Animals*. 2022;12(4):512. <https://doi.org/10.3390/ani12040512>
5. Довлатов И.М., Юрочка С.С. Разработка энергоэффективной системы микроклимата для беспривязного содержания дойного стада // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 3. С. 73-80. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
6. Иванов Ю.Г., Кирсанов В.В., Юрочка С.С. Исследования параметров микроклимата в зоостанции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Доклады ТСХА*. Вып. 291. Ч. V. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2019. С. 115-118. EDN: IFYIGH
7. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(3):2230. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22030>
8. Lovarelli D., Riva E., Mattachini G., Guarino M., Provolo G. Assessing the effect of barns structures and environmental conditions in dairy cattle farms monitored in Northern Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021;52(4):12-29.
9. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Особенности микроклимата коровников с естественной системой вентиляции // *Ветеринария, зоотехния и биотехнология*. 2015. № 6. С. 52-56. EDN: TZUJER

и облака газа. Датчики сероводорода и аммиака рекомендуется устанавливать под коньком; датчики углекислого газа, сероводорода и аммиака – в стойле; датчики углекислого газа и сероводорода – у кормового стола. Измерения концентрации необходимо производить на высоте 500, 1500 и 3000 мм.

2. Максимальная концентрация CO₂ выявлена на уровне 0,9 м при скорости воздуха 0 м/с, при скорости 0,75 м/с – на уровне 1,3. Наибольшая концентрация H₂S отмечена при скорости 0 м/с на уровне области, граничащей с коньковым пространством, при скорости 2 м/с – на уровне 2,25 м. Наибольшая концентрация NH₃ при скорости 2 м/с наблюдается под крышей и в области под коньком.

3. При увеличении концентрации выделяемого газа и прочих равных условиях структура облака изменяется незначительно, увеличивается концентрация газа в облаке. Датчики опроса параметров необходимо устанавливать в закрытых продуваемых боксах, как в погодных метеостанциях.

References

1. Dovlatov I.M., Yuferev L.Yu. Increase in live weight of bred poultry during air purification with a combined recirculator. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2020;67:3:124-131. (In Rus.)
2. Kostarev S., Kochetova O., Ivanova A., Sereda T. Project development of a “smart” premise system for pig keeping. *E3S Web of Conferences*. 2021;254:08029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125408029>
3. Dovlatov I.M., Rudzik E.S. Improvement of microclimate in agricultural premises due to disinfection of air with ultraviolet radiation. *Innovations in agriculture*. 2018;3:47-52. (In Rus.)
4. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G., Lovarelli D., Provolo G. Dairy Cow Behavior Is Affected by Period, Time of Day and Housing. *Animals*. 2022;12(4):512. <https://doi.org/10.3390/ani12040512>
5. Dovlatov I.M., Yurochka S.S. Development of an energy-efficient microclimate system for dairy herd loose keeping. *Agricultural machines and technologies*. 2021;15(3):73-80. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
6. Ivanov Yu.G., Kirsanov V.V., Yurochka S.S. Studies of indoor climate parameters in the animal research station of Timiryazev Agricultural Academy. *Doklady TSKHA*. 2019;291(V):115-118. (In Rus.)
7. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(3):2230. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22030>
8. Lovarelli D., Riva E., Mattachini G., Guarino M., Provolo G. Assessing the effect of barns structures and environmental conditions in dairy cattle farms monitored in Northern Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021;52(4):12-29.
9. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Features climate barns with natural ventilation system. *Veterinary, animal science and biotechnology*. 2015;6:52-56. (In Rus.)
10. Kochetova O.V., Kostarev S.N., Tatarnikova N.A., Sereda T.G. Development of microclimate control system in cattle barns for cattle housing in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth*

10. Kochetova O.V., Kostarev S.N., Tatarnikova N.A., Sereda T.G. Development of microclimate control system in cattle barns for cattle housing in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839:032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032030>

11. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Физиологическое состояние коров в зависимости от микроклимата помещений // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 8. С. 53-56. EDN: RAVXZX

12. Наливайко А.П. Система регулирования микроклимата на фермах и комплексах КРС // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. 2017. № 6. С. 177-180. EDN: YLJLKT

13. Dovlatov I., Yuferev L., Pavkin D. Efficiency Optimization of Indoor Air Disinfection by Radiation Exposure for Poultry Breeding. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1072:177-189. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_18

Вклад авторов

В.В. Кирсанов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, литературный анализ, обработка результатов исследования.

И.М. Довлатов – обработка результатов исследования, доработка текста и общих выводов.

С.С. Юрочка – литературный анализ, обработка результатов исследования.

И.В. Комков – верстка и формирование работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 29.11.2022; поступила после рецензирования и доработки 29.03.2023; принята к публикации 06.04.2023

and *Environmental Science*. 2021;839:032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032030>

11. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Physiological state of cows depending on house microclimate. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2013;8:53-56. (In Rus.)

12. Nalivayko A.P. The system of climate control on farms and cattle complexes. *Youth scientific and educational potential in solving actual problems of the XXI century*. 2017;6:177-180. (In Rus.)

13. Dovlatov I., Yuferev L., Pavkin D. Efficiency Optimization of Indoor Air Disinfection by Radiation Exposure for Poultry Breeding. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1072:177-189. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_18

Contribution of the authors

V.V. Kirsanov – research supervision, formulating the main research tasks, literature review, processing research results.

I.M. Dovlatov – processing research results, finalizing the text and making general conclusions.

S.S. Yurochka – literature review, processing the research results.

I.V. Komkov – making the article layout and design

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 29.11.2022; revised 29.03.2023; accepted 06.04.2023