

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.193:621.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-50-57>**Математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов с учетом локальных параметров среды животноводческих комплексов***А.В. Букреев<sup>1</sup>, А.К. Букреева<sup>2</sup>*<sup>1,2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup>[vim@aleksey-bukreev.ru](mailto:vim@aleksey-bukreev.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167><sup>2</sup>[mamakhaeva@mail.ru](mailto:mamakhaeva@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>

**Аннотация.** Высокая скорость коррозии электрооборудования на животноводческих комплексах (ЖК) является серьезной проблемой. Для прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования ЖК необходимо учитывать пространственно-временную неоднородность концентрации аммиака и сероводорода, температуру и влажность. Исследования направлены на разработку комплексной математической модели, позволяющей прогнозировать скорость электрохимической коррозии токоведущих элементов (меди и алюминия) с учетом меняющихся параметров микроклимата. Предлагаемая модель основана на системе уравнений, объединяющей электрохимические, электрические и тепловые процессы. Для верификации модели использовали установку с климатической камерой, системой точного контроля температуры и влажности, газовым дозатором и газоанализатором «ОКА-Т-Н<sub>2</sub>S-NH<sub>3</sub>». Проверка адекватности модели заключалась в сравнении расчетных значений скорости коррозии с экспериментальными данными, не использовавшимися при калибровке модели. Исходные данные модели включали в себя физико-химические свойства материалов и значения скорости коррозии меди и алюминия, полученные в климатической камере при варьировании концентраций аммиака (0...50 ppm) и сероводорода (0...20 ppm), температуры (20...30°C) и относительной влажности (70...90%). Установили, что повышение относительной влажности с 70 до 90% приводит к увеличению скорости коррозии в 1,6...2,3 раза в зависимости от материала и состава газовой среды. Выявили чувствительность скорости коррозии меди к концентрации сероводорода (порядок реакции – 0,85) и алюминия к концентрации аммиака (порядок реакции – 0,72). При концентрации аммиака 0...50 ppm и фоновом содержании сероводорода 10 ppm скорость коррозии меди возрастает с 0,11 до 0,26 мм/год, алюминия – с 0,105 до 0,225 мм/год. Для сероводорода в диапазоне 0...20 ppm и фоновом содержании аммиака 20 ppm скорость коррозии меди изменяется от 0,16 до 0,35 мм/год, алюминия – от 0,063 до 0,142 мм/год. Коэффициент детерминации 0,92 свидетельствует о высоком уровне соответствия модели экспериментальным данным. Разработанная модель позволит выявлять остаточный ресурс электрооборудования, прогнозировать рост сопротивления контактов и перейти к предиктивной системе технического обслуживания.

**Ключевые слова:** скорость коррозии; скорость коррозии электрооборудования; микроклимат; аммиак; сероводород; остаточный ресурс электрооборудования; математическая модель электрохимической коррозии

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0004.

**Для цитирования.** Букреев А.В., Букреева А.К. Математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов с учетом локальных параметров среды животноводческих комплексов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 50-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-50-57>

## ORIGINAL ARTICLE

**Mathematical model of electrochemical corrosion of current-conducting elements considering local environmental parameters in livestock farms***A.V. Bukreev<sup>1</sup>, A.K. Bukreeva<sup>2</sup>*<sup>1,2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup>[vim@aleksey-bukreev.ru](mailto:vim@aleksey-bukreev.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167><sup>2</sup>[mamakhaeva@mail.ru](mailto:mamakhaeva@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>

**Abstract.** The high corrosion rate of electrical equipment in livestock facilities represents a critical operational challenge. To predict the residual service life of such equipment, it is necessary to account for the spatiotemporal heterogeneity of ammonia and hydrogen sulfide concentrations, as well as variations in temperature and humidity. The study aimed

to develop a comprehensive mathematical model for predicting the electrochemical corrosion rate of current-carrying components (copper and aluminum) as a function of changing indoor climate parameters. The proposed model is based on a system of equations that integrates electrochemical, electrical, and thermal processes. For model verification, an experimental setup was employed comprising a climate chamber, a precision control system for temperature and humidity, a gas dispenser, and an OKA-T-H<sub>2</sub>S-NH<sub>3</sub> gas analyzer. Validation of the model was performed by comparing calculated corrosion rate values with experimental data that were not used during model calibration. Input data for the model included the physicochemical properties of the materials and the corrosion rates of copper and aluminum obtained under varying conditions within the climate chamber: ammonia concentrations ranging from 0 to 50 ppm, hydrogen sulfide concentrations from 0 to 20 ppm, temperatures from 20 to 30°C, and relative humidity levels from 70 to 90%. The results established that increasing relative humidity from 70% to 90% leads to an increase in corrosion rate by a factor of 1.6 to 2.3, depending on the material and the composition of the gaseous environment. The corrosion rate of copper was found to be particularly sensitive to hydrogen sulfide concentration, with a reaction order of 0.85, while that of aluminum was most sensitive to ammonia concentration, with a reaction order of 0.72. At ammonia concentrations ranging from 0 to 50 ppm and a background hydrogen sulfide concentration of 10 ppm, the corrosion rate of copper increases from 0.11 to 0.26 mm/year, and that of aluminum increases from 0.105 to 0.225 mm/year. For hydrogen sulfide concentrations between 0 and 20 ppm, with a background ammonia concentration of 20 ppm, the corrosion rate of copper varies from 0.16 to 0.35 mm/year, while that of aluminum varies from 0.063 to 0.142 mm/year. A coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.92 indicates a high level of agreement between the model and experimental data. The developed model will enable the determination of residual service life of electrical equipment, the prediction of contact resistance increase, and the transition to a predictive maintenance system.

**Keywords:** corrosion rate; corrosion rate of electrical equipment; indoor climate; ammonia; hydrogen sulfide; residual life of electrical equipment; mathematical model of electrochemical corrosion

**Funding.** The research work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the State assignment of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (project No. FGUN-2025-0004).

**For citation:** Bukreev A.V., Bukreeva A.K. Mathematical model of electrochemical corrosion of current-conducting elements considering local environmental parameters in livestock farms. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):50-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-50-57>

## Введение

Эксплуатация электрооборудования в помещениях животноводческих комплексов (ЖК) сопряжена с экстремально высокими темпами коррозионного износа [1, 2]. Агрессивная среда на таких объектах формируется за счет одновременного воздействия повышенной относительной влажности (85...95%), конденсации влаги и высоких концентраций газообразных агентов – таких, как аммиак (NH<sub>3</sub>) и сероводород (H<sub>2</sub>S) [3, 4]. Эти газы, растворяясь в тонких пленках электролита на поверхности металлов, формируют проводящие коррозионные среды с низким рН, что интенсифицирует процессы электрохимической коррозии [5, 6]. Эффективное управление микроклиматом, включая распределение воздушных потоков и снижение температурного градиента, может способствовать уменьшению локальных концентраций агрессивных агентов [7, 8].

Скорость коррозии электрооборудования имеет значительный экономический масштаб. По данным исследований, ежегодные потери от коррозии в агропромышленном комплексе могут составлять до 15...20% от общей стоимости электрооборудования [9, 10], при этом до 40% всех отказов электротехнического оборудования на ЖК прямо или косвенно

связано с коррозионными процессами. Выход из строя токоведущих частей (шин, контактов автоматических выключателей, клеммных соединений) не только ведет к дорогостоящему ремонту, но и провоцирует возгорание и длительные простои технологических циклов.

Разработка точного инструмента, прогнозирующего остаточный ресурс электрооборудования, является основой для перехода к предиктивной системе технического обслуживания. Такой подход позволяет оптимизировать затраты на ремонт и предотвратить катастрофические последствия отказов критически важных систем – таких, как вентиляция и кормораздача.

Большинство существующих моделей коррозии носят обобщенный характер и не учитывают пространственно-временную неоднородность (локальность) параметров микроклимата внутри ЖК. Например, концентрация аммиака может варьироваться на порядок: от 5...10 ppm в зонах с хорошей вентиляцией до 50...100 ppm и выше вблизи систем навозоудаления и кормораздачи. Неоднородность температурно-влажностного режима приводит к образованию зон с постоянной конденсацией [11]. Перспективным направлением снижения пиковых концентраций агрессивных газов является применение технических решений по очистке воздушных

выбросов непосредственно в местах их интенсивного образования [12].

Для прогнозирования коррозии в атмосферных условиях разработан ряд подходов, каждый из которых обладает ограничениями в контексте специфики животноводческих комплексов. Наиболее распространенные модели, основанные на стандартах (ISO 9223), устанавливают корреляцию между усредненными за длительный период (месяц, год) параметрами среды и скоростью коррозии. Их ключевой недостаток – игнорирование пространственно-временной локальности. Поскольку они оперируют среднеобъемными показателями, то неспособны выявить критические зоны внутри ЖК, где параметры могут на порядок превышать усредненные значения. Это приводит к опасному завышению прогнозируемого ресурса оборудования в наиболее уязвимых местах (у систем навозоудаления, кормораздачи). Использование комбинированных систем вентиляции – таких, как естественно-гибридные, позволяет более эффективно управлять температурой и влажностью, снижая локальные экстремальные значения [8]. Применение потолочных вентиляторов также способствует выравниванию температуры по высоте помещения и улучшению воздухообмена, что может понизить агрессивность среды [7]. Дополнительным методом снижения микробиологической нагрузки и, как следствие, потенциального образования агрессивных компонентов является использование ультрафиолетового оборудования [13].

Детализированные электрохимические модели, основанные на уравнениях Батлера-Фольмера и законах диффузии, описывают физико-химические механизмы коррозии на поверхности металла [14, 15]. Эти модели теоретически более точны, но они неприменимы в условиях ЖК, поскольку не учитывают динамику формирования и состав электролитической пленки. Толщина пленки критически зависит от локальных и мгновенных значений температуры и влажности, которые хаотично меняются в пространстве и времени.

Таким образом, классические модели, учитывающие усредненные данные и сложные электрохимические модели, не в состоянии адекватно прогнозировать скорость деградации в наиболее уязвимых зонах, что создает значительный разрыв между расчетным и фактическим ресурсами работы электрооборудования. Следовательно, необходимо разработать новую детализированную математическую модель, учитывающую физическую обоснованность и реальные условия эксплуатации электрооборудования ЖК. Такая модель должна количественно связать локальные значения концентраций агрессивных агентов и параметров микроклимата с кинетикой электрохимической коррозии металлов.

**Цель исследований:** разработка комплексной математической модели, позволяющей количественно оценить скорость коррозионно-электрохимической деградации материалов токоведущих частей (медь, алюминий) и контактных соединений в зависимости от локальной концентрации агрессивных агентов и микроклиматических параметров (температуры и относительной влажности воздуха).

### Материалы и методы

Разработку математической модели электрохимической коррозии токоведущих элементов в условиях животноводческих комплексов осуществляли с учетом пространственно-временной неоднородности параметров микроклимата. В качестве объекта исследований выбраны основные материалы, применяемые в токоведущих частях электрооборудования, – медь (М1) и алюминий (АД31).

В качестве исходных данных модели использовали экспериментальные значения скорости коррозии меди и алюминия, полученные в климатической камере при варьировании концентраций аммиака (0...50 ppm) и сероводорода (0...20 ppm), температуры (20...30°C) и относительной влажности (70...90%). Учитывали справочные данные о физико-химических свойствах материалов (плотность, удельное электрическое сопротивление, теплоемкость) и параметры микроклимата, характерные для различных зон животноводческих комплексов: кормораздачи, навозоудаления и вентилируемые участки.

Основным ограничением модели является предположение об однородности материала и отсутствии защитных покрытий на поверхности образцов.

Модель строили на основе системы уравнений, объединяющей электрохимические, электрические и тепловые процессы и уравнения скорости коррозии с учетом локальных концентраций агрессивных газов, влажности и температуры. В модель включена функция влияния влажности, описываемая сигмоидальной зависимостью для учета порогового эффекта, и функция временной зависимости для описания нестационарных эффектов, включая торможение процесса растущим слоем продуктов коррозии. В расчете толщины коррозионного слоя учитывали скорость коррозии и плотность металла. На основе полученной толщины слоя определяется рост переходного сопротивления контактных соединений. Модель учитывает также уравнение теплового баланса, связывающее джоулево теплообразование, теплоотвод в окружающую среду и теплоемкость контактного узла для расчета его температуры.

Используемый математический аппарат включает в себя кинетическое уравнение коррозии с учетом  $C_{NH_3}$ ,  $C_{H_2S}$  и порядков реакции, интегральные зависимости для накопления продуктов коррозии и расчета

теплового состояния, а также методы нелинейной регрессии для определения параметров модели по экспериментальным данным. Выходными данными модели являются скорость коррозии, толщина коррозионного слоя, переходное сопротивление контакта и температура контактного соединения.

Экспериментальная база для получения исходных данных и верификации модели включала в себя установку с климатической камерой, системой точного контроля температуры и влажности, газовым дозатором и портативным газоанализатором «ОКА-Т-Н<sub>2</sub>S-Н<sub>3</sub>». Образцы меди и алюминия размерами 50 x 25 x 2 мм предварительно шлифовали, обезжиривали и взвешивали на аналитических весах с точностью ±0,1 мг. После экспозиции в течение 720 ч продукты коррозии удаляли в соответствии со стандартом ГОСТ 9.908-85, после чего образцы повторно взвешивали образцы, определяли потерю массы. Каждый эксперимент повторяли трижды для обеспечения статистической значимости.

### Результаты и их обсуждение

Коррозионная деградация электрооборудования в условиях животноводческих комплексов представляет собой сложный многофакторный процесс. Для его математического описания предлагаем систему взаимосвязанных уравнений (1), учитывающих электрохимические, химические и физические аспекты:

$$\begin{cases} V_{кор}(t) = k^0 \cdot (C_{NH3})^\alpha \cdot (C_{H2S})^\beta \cdot f(\varphi) \cdot \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \cdot g(t), \\ \delta_{кор(t)} = \int_t^0 \left[ \frac{V_{кор(\tau)}}{\rho_{мет}} \right] d\tau, \\ R_k(t) = \left( \frac{\rho_s}{A_{кон}} \right) \cdot \delta_{кор}(t), \\ T_{кон(t)} = \left( \frac{1}{m \cdot c_p} \right) \cdot \int_t^0 [I^2(\tau) \cdot R_{c(\tau)} - h \cdot A \cdot (T_{кон(\tau)} - T_c)] d\tau. \end{cases} \quad (1)$$

Определяющим для всей системы является уравнение скорости коррозии ( $V_{кор}(t)$ ), поскольку оно задает интенсивность коррозионного процесса в зависимости от параметров окружающей среды ( $C_{NH3}$ ,  $C_{H2S}$ ,  $\varphi$ ,  $T$ ) и времени  $t$ :

$$V_{кор}(t) = k^0 \cdot (C_{NH3})^\alpha \cdot (C_{H2S})^\beta \cdot f(\varphi) \cdot \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \cdot g(t), \quad (2)$$

где  $k^0$  – предэкспоненциальный множитель, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $C_{NH3}$ ,  $C_{H2S}$  – концентрации аммиака и сероводорода, безразм. (ppm);  $\alpha$ ,  $\beta$  – порядки реакции по соответствующим компонентам, безразм.;  $f(\varphi)$  – функция влияния влажности, безразм.;  $E_k$  – энергия активации процесса коррозии, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К;  $g(t)$  – функция временной зависимости, безразм.

Функция влияния влажности ( $f(\varphi)$ ) описывается сигмоидальной зависимостью:

$$f(\varphi) = \frac{1}{[1 + \exp(-k_\varphi \cdot (\varphi - \varphi_{кр}))]}, \quad (3)$$

где  $k_\varphi$  – коэффициент чувствительности к влажности, 1/%;  $\varphi_{кр}$  – критическое значение относительной влажности, при котором происходит интенсивное образование электролитической пленки на поверхности металла, %.

Временная зависимость скорости коррозии ( $g(t)$ ) определяется выражением:

$$g(t) = t^{\eta-1} \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (4)$$

где  $\eta$  – параметр, характеризующий нелинейность процесса во времени;  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий тормозящее влияние растущего слоя продуктов коррозии.

Накопление продуктов коррозии описывается уравнением для толщины коррозионного слоя ( $\delta_{кор(t)}$ ), которое интегрирует скорость коррозии во времени с учетом плотности металла  $\rho_{мет}$ . Толщина коррозионного слоя определяется по выражению:

$$\delta_{кор(t)} = \int_t^0 \left[ \frac{V_{кор(\tau)}}{\rho_{мет}} \right] d\tau, \quad (5)$$

где  $\rho_{мет}$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – переменная интегрирования (время), с.

Влияние коррозии на электрические характеристики контакта определяется уравнением для переходного сопротивления  $R_k(t)$ , которое связывает рост сопротивления со скоростью накопления коррозионного слоя через удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  и эффективную площадь контакта  $A_{кон}$ .

Для описания роста переходного сопротивления контактных соединений используется уравнение:

$$R_k(t) = \left( \frac{\rho_s}{A_{кон}} \right) \cdot \delta_{кор}(t), \quad (6)$$

где  $\rho_s$  – удельное поверхностное сопротивление продуктов коррозии, Ом·м;  $A_{кон}$  – эффективная площадь контакта, м<sup>2</sup>;  $\delta_{кор}$  – толщина коррозионного слоя, м.

Тепловые процессы в контактном соединении описываются уравнением теплового баланса, учитывающим джоулево теплообразование  $I^2 \cdot R_c$ , теплоотвод в окружающую среду и теплоемкость контактного узла:

$$T_{кон(t)} = \left( \frac{1}{m \cdot c_p} \right) \cdot \int_t^0 [I^2(\tau) \cdot R_{c(\tau)} - h \cdot A \cdot (T_{кон(\tau)} - T_c)] d\tau, \quad (7)$$

где  $m$  – масса контактного узла, кг;  $c_p$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $I$  – ток нагрузки, А;  $R_c$  – сопротивление контакта, Ом;  $h$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $A$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $T_{кон}$  – температура контакта, К;  $T_c$  – температура окружающей среды, К;  $\tau$  – переменная интегрирования (время), с.

Комплексная модель позволяет прогнозировать развитие коррозионных процессов в электрооборудовании животноводческих комплексов с учетом взаимного влияния химических, электрических и тепловых факторов.

Рисунки 1, 2 наглядно демонстрируют различное поведение меди и алюминия к агрессивной среде животноводческих комплексов, что важно для выбора материалов и проектирования систем защиты электрооборудования.

Медь более чувствительна к концентрации  $H_2S$ , а алюминий – к влажности воздуха (большой разброс между кривыми при разных уровнях влажности). При низких концентрациях  $H_2S$  скорость коррозии незначительна, с увеличением концентрации наблюдается экспоненциальный рост. Увеличение влажности с 70 до 90% и концентрации сероводорода 20 ppm приводит к росту скорости коррозии меди с 0,16 до 0,35 мм/год (увеличение – в 2,19 раза), в то время как для алюминия в тех же условиях скорость возрастает с 0,063 до 0,142 мм/год (увеличение – в 2,25 раза).

Алюминий демонстрирует более сильную зависимость от концентрации аммиака, что подтверждается

его высоким порядком реакции (табл.). Для обоих материалов наблюдается степенная зависимость скорости коррозии от концентрации аммиака. Увеличение влажности с 70 до 90% усиливает коррозионное воздействие аммиака на оба материала, но в большей степени – на алюминий. При концентрации аммиака 50 ppm повышение влажности с 70 до 90% приводит к росту скорости коррозии алюминия с 0,11 до 0,26 мм/год (увеличение – в 2,36 раза), в то время как для меди в тех же условиях скорость возрастает с 0,105 до 0,225 мм/год (увеличение – в 2,14 раза). При низких концентрациях аммиака скорость коррозии незначительна, с увеличением концентрации  $NH_3$  наблюдается ускоренный ее рост.

Для определения оптимальных значений параметров модели ( $k^0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $E_k$ ,  $\eta$ ,  $\lambda$ ), обеспечивающих соответствие расчетных и экспериментальных данных, полученные экспериментальные значения скорости коррозии при различных комбинациях концентраций газов, влажности и температуры обрабатывали методами нелинейного регрессионного анализа (табл.).

Порядок реакции позволяет оценить, насколько каждый материал подвержен коррозии в условиях

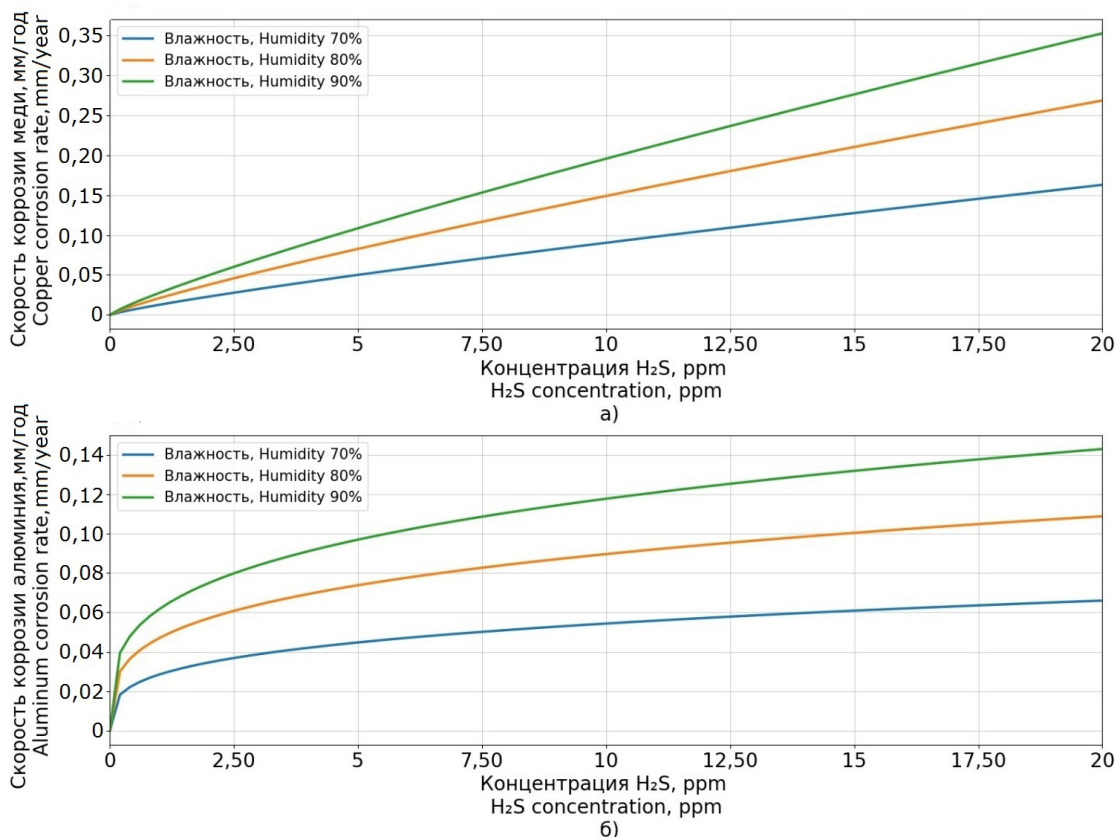
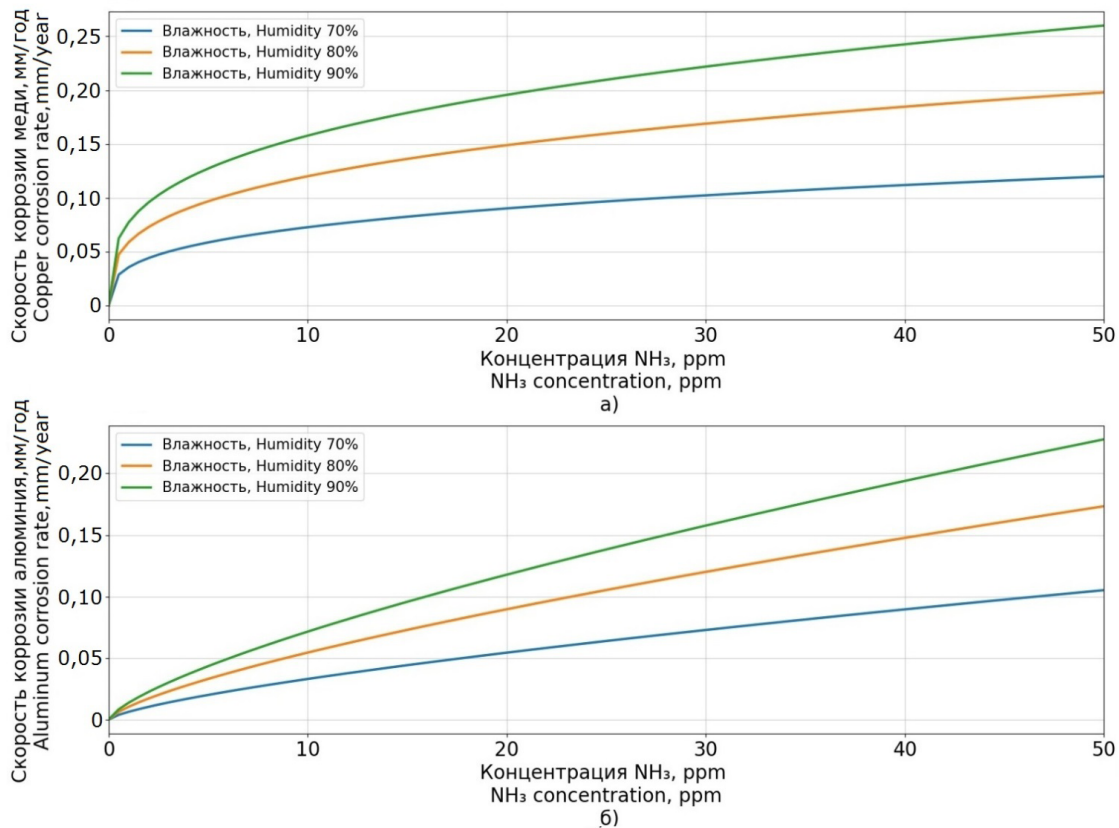


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии ( $V_{кор}(t)$ ) меди (а) и алюминия (б) от концентрации сероводорода при различных уровнях влажности ( $T = 25^\circ C$ ;  $C_{NH_3} = 20$  ppm)

Fig. 1. Relationship between the corrosion rate ( $V_{кор}(t)$ ) of copper (а) and aluminum (б) and the concentration of hydrogen sulfide at different humidity levels ( $T = 25^\circ C$ ,  $C_{NH_3} = 20$  ppm)



**Рис. 2. Зависимость скорости коррозии ( $V_{кор}(t)$ ) меди (а) и алюминия (б) от концентрации аммиака при различных уровнях влажности ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{H_2S} = 10 \text{ ppm}$ )**

**Fig. 2. Relationship between the corrosion rate ( $V_{кор}(t)$ ) of copper (а) and aluminum (б) and the concentration of ammonia at different humidity levels ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{H_2S} = 10 \text{ ppm}$ )**

варьирования параметров микроклимата и агрессивности среды животноводческих комплексов. Для меди модель демонстрирует наибольшую чувствительность к концентрации сероводорода (параметр  $\beta = 0,85$ ), для алюминия – к аммиаку (параметр  $\alpha = 0,72$ ).

Для проверки адекватности разработанной модели выполнили сравнение расчетных значений скорости коррозии с экспериментальными данными, не использовавшимися при калибровке модели. Верификацию проводили для 30 независимых комбинаций

параметров среды (концентрация газов, влажность, температура) в пределах заданного диапазона. Среднеквадратическое отклонение рассчитанных и экспериментальных значений скорости коррозии составило 0,018 мм/год для меди и 0,014 мм/год для алюминия, что не превышает 15% от средних измеренных величин. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) для обеих серий экспериментов превысил 0,92, что свидетельствует о высоком уровне соответствия модели экспериментальным данным. Таким образом, модель адекватно описывает кинетику коррозионных процессов

Таблица

**Параметры коррозионной деградации**

Table

**Corrosion degradation parameters**

Параметр	Медь	Алюминий
Предэкспоненциальный множитель $k^0$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	1,25 ± 0,15	0,89 ± 0,12
Порядок реакции по NH <sub>3</sub> , $\alpha$	0,31 ± 0,05	0,72 ± 0,06
Порядок реакции по H <sub>2</sub> S, $\beta$	0,85 ± 0,07	0,28 ± 0,04
Энергия активации процесса коррозии $E_k$ , кДж/моль	45,2 ± 3,1	39,8 ± 2,7
Параметр, характеризующий нелинейность процесса во времени, $\eta$	0,65 ± 0,04	0,78 ± 0,05
Коэффициент, учитывающий тормозящее влияние растущего слоя продуктов коррозии $\lambda$ , год <sup>-1</sup>	0,12 ± 0,02	0,08 ± 0,01

в условиях, имитирующих среду животноводческих помещений.

Практическая значимость работы заключается в возможности снижения эксплуатационных потерь электрооборудования до 20% за счет своевременного выявления критических зон коррозионного износа и оптимизации затрат на ремонт и замену элементов.

### Выводы

1. Разработанная комплексная математическая модель электрохимической коррозии токоведущих элементов (меди и алюминия), учитывающая локальные параметры среды животноводческих комплексов (концентрацию аммиака и сероводорода, относительную влажность и температуру), позволяет количественно оценить скорость коррозионной деградации материалов и ее влияние на элек-

трические и тепловые характеристики контактных соединений.

2. Скорость коррозии меди чувствительна к концентрации сероводорода (порядок реакции  $\beta = 0,85$ ), скорость коррозии алюминия – к концентрации аммиака (порядок реакции  $\alpha = 0,72$ ).

3. Увеличение влажности с 70 до 90% значительно ускоряет коррозионные процессы: скорость коррозии меди возрастает в 2,14...2,19 раза, алюминия – в 2,25...2,36 раза, что связано с интенсивным образованием электролитической пленки на поверхности металлов.

4. Модель позволяет прогнозировать рост переходного сопротивления контактов и их температуры в условиях реальной эксплуатации, что является основой для перехода к предиктивной системе технического обслуживания электрооборудования.

### Список источников

- Oki M., Anawe P.A. A review of corrosion in agricultural industries. *Physical Science International Journal*. 2015;5(4):216-222. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>
- Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А., Прохоренков В.Д. Влияние агрессивных атмосфер животноводства на коррозию металлов // Наука в центральной России. 2020. № 1 (43). С. 69-80. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-69-80>
- Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А. О коррозионных проблемах в сельскохозяйственном производстве // Наука в центральной России. 2021. № 5 (53). С. 79-90. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-5-79-90>
- Александров Д.В., Юферев Л.Ю. Энергосберегающая система защиты от коррозии металлоконструкций сельскохозяйственных объектов // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 25-29. EDN: VRWBTT
- Вигдорович В.И., Князева Л.Г., Зазуля А.Н. и др. Использование летучих ингибиторов типа «ИФХАН» для защиты стального оборудования в атмосфере животноводческих помещений // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 55-58. EDN: XTDNYH
- Вигдорович В.И., Князева Л.Г., Цыганкова Л.Е. и др. Влияние летучего ингибитора ИФХАН-114 на эффективность работы ряда контактных гальванических пар металлов и скорость коррозии их составляющих в атмосфере животноводческих помещений // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 6. С. 65-69. <https://doi.org/10.31857/S250026270001841-0>
- Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Выбор потолочных вентиляторов в системе микроклимата животноводческих помещений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19, № 1. С. 69-76. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76>
- 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>
- Muley N.S., Parihar R.T. Corrosion in Agriculture Instruments and Equipments: Reasons and Solutions. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2022;9(5):477-484
- Adel O., Mohamed M.E., Khamis E. Thermodynamic, electrochemical and surface characterization

### References

- Oki M., Anawe P.A. A review of corrosion in agricultural industries. *Physical Science International Journal*. 2015;5(4):216-222. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>
- Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Kuryato N.A., Prokhorenkov V.D. Influence of aggressive atmospheres of animal breeding on corrosion of metals. *Science in Central Russia*. 2020;1:69-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-69-80>
- Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Kuryato N.A. About corrosion problems in agricultural production. *Science in Central Russia*. 2021;5:79-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-5-79-90>
- Aleksandrov D.V., Yuferov L.Yu. Energy saving system for corrosion protection of steel structures in agriculture. *Vestnik VIESKH*. 2016;1:25-29. (In Russ.).
- Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Zazulya A.N. et al. Application of a number of volatile inhibitors for protection of agricultural equipment in atmosphere of livestock indoors. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2017;1:55-58. (In Russ.)
- Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E. et al. Influence of the volatile inhibitor ifhan-114 on the efficiency of a number of contact galvanic metal pairs and the rate of corrosion of their constituents in the atmosphere of livestock buildings. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2018;6:65-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S250026270001841-0>
- Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Selection of ceiling fans for the microclimate system of livestock facilities. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025;19(1):69-76 (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76>
- Dovlatov I.M., Yurochka S.S. Development of an energy-efficient microclimate system for dairy herd loose keeping. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(3):73-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
- Muley N.S., Parihar R.T. Corrosion in Agriculture Instruments and Equipments: Reasons and Solutions. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2022;9(5):477-484.
- Adel O., Mohamed M.E., Khamis E. Thermodynamic, electrochemical and surface characterization of copper corrosion inhibition in acidic solution using rice straw extract. *Scientific Reports*. 2025;15(1):27753. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12482-w>

of copper corrosion inhibition in acidic solution using rice straw extract. *Scientific Reports*. 2025;15(1):27753. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12482-w>

11. 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>

12. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А. Техническое решение для очистки выбросов климатически активных газов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18, № 2. С. 103-110. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110>

13. Юферев Л.Ю. Применение энергосберегающего ультрафиолетового электрооборудования в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16, № 2. С. 69-75. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-69-75>

14. Bard A.J., Faulkner L.R., White H.S. *Electrochemical methods: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2022. 805 p.

15. Шибков А.А., Кочегаров С.С. Компьютерное и физико-химическое моделирование эволюции фрактального коррозионного фронта // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2021. Т. 13, № 1. С. 105-124. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-1-105-124>

#### Информация об авторах

<sup>1</sup> **Букреев Алексей Валерьевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; [vim@aleksey-bukreev.ru](mailto:vim@aleksey-bukreev.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>; SPIN-код: 3922-8260, AuthorID: 925007

<sup>2</sup> **Букреева Анжела Канвекровна**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; <https://orcid.org/0000-0002-8582-108>; SPIN-код: 4079-4380, AuthorID: 1039558

<sup>1,2</sup> Федеральное научное агроинженерное учреждение ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

#### Вклад авторов

А.В. Букреев – концептуализация, методология, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.К. Букреева – ресурсы, создание черновика рукописи.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 22.10.2025, после рецензирования и доработки 10.03.2026, принята к публикации 14.05.2026

11. 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 Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22>

12. Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Egorov S.A. Technical solution for purifying emissions of climate-active gases. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):103-110. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110>

13. Yuferov L.Yu. The use of energy-saving ultraviolet electrical equipment in agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(2):69-75. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-69-75>

14. Bard A.J., Faulkner L.R., White H.S. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2022. 805 p.

15. Shibkov A.A., Kochegarov S.S. Computer and physical-chemical modeling of the evolution of a fractal corrosion front. *Computer Research and Modeling*. 2021;13(1):105-124. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-1-105-124>

#### Author Information

**Aleksey V. Bukreev**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [vim@aleksey-bukreev.ru](mailto:vim@aleksey-bukreev.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>; Scopus ID: 57192074502; Researcher ID AAE-1336-2022

**Anzhela K. Bukreeva**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [mamakhaeva@mail.ru](mailto:mamakhaeva@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>; Scopus ID: 57473516200; Researcher ID AAZ-6062-2020

<sup>1,2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

#### Author Contribution

A.V. Bukreev – conceptualization, methodology, formal analysis, writing – manuscript review and editing;

A.K. Bukreeva – resources, writing – original draft.

#### Conflict of interests

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

Received 22.10.2025; Revised 10.03.2026; Accepted 14.05.2026