

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ  
МАНИТОРИНГА АММИАКА В ЗАМКНУТЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

**Абдуллаев Н.К.**

*Джизакский государственный педагогический университет*

**Муминова Н.И.**

*Филиал Казанского федерального университета в г. Джизак, Узбекистан*

**ИНФОРМАЦИЯ О  
СТАТЬЕ**

**АННОТАЦИЯ:**

**ИСТОРИЯ СТАТЬИ:**

*Received: 19.12.2025*

*Revised: 20.12.2025*

*Accepted: 21.12.2025*

**КЛЮЧЕВЫЕ  
СЛОВА:**

*окисление аммиака,  
очистка газовых  
выбросов,  
полупроводниковый  
сенсор, детекция  
аммиака, дефектная  
структура,  
фотокатализ.*

*В воздушной среде животноводческих комплексов возможно накопление таких токсичных газов, как диоксид углерода, аммиак и сероводород, образующихся вследствие высокой плотности размещения поголовья, нерегулярной уборки и неэффективной работы систем вентиляции.*

*Превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) данных газов приводит к снижению продуктивности животных и повышает их восприимчивость к заболеваниям. Аммиак, являющийся продуктом разложения азотсодержащих органических соединений (моча, экскременты), представляет особую опасность. Мониторинг его концентрации требует высокочувствительных и экспрессных методов анализа.*

*В работе описан процесс разработки абсорбционно-полупроводниковых методов определения аммиака в газовых смесях. Полученные результаты позволяют заключить, что созданные газочувствительные материалы обладают высокой конкурентоспособностью по сравнению с традиционными металлооксидными сенсорами для*

*определения концентраций аммиака в атмосферном воздухе. Установлена корреляционная зависимость между аналитическим сигналом сенсора и концентрацией аммиака в анализируемой смеси.*

Аммиак ( $\text{NH}_3$ ) — бесцветный газ с характерным резким запахом, температурой плавления  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  и температурой кипения  $-36\text{ }^\circ\text{C}$ . Обладает высокой растворимостью в воде, этаноле и ряде других органических растворителей. В природных условиях образуется при деградации азотсодержащих органических соединений. Оказывает раздражающее действие на слизистые оболочки и способен провоцировать отёк лёгких. Порог ощущения запаха соответствует концентрации  $\sim 37\text{ мг/м}^3$ . Газообразные смеси аммиака с воздухом в диапазоне концентраций 15–28 об.% являются взрывоопасными [1, 2].

В животноводческих помещениях вследствие уплотнённого содержания скота, нарушения графиков уборки и неадекватной работы вентиляционных систем может наблюдаться кумуляция вредных газов: диоксида углерода, аммиака и сероводорода. Систематическое превышение ПДК этих соединений ведёт к снижению продуктивности и иммунной резистентности животных.

Аммиак в воздухе помещений ферм является продуктом микробиологического разложения мочевины и других азотсодержащих субстратов. Его максимально допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны животноводческих объектов составляет  $20\text{ мг/м}^3$  ( $0.02\text{ мг/л}$ ) [3–5]. Для атмосферного воздуха населённых мест установлены следующие нормативы: среднесуточная ПДК —  $0.04\text{ мг/м}^3$ , максимальная разовая ПДК —  $0.2\text{ мг/м}^3$  [6, 7].

Мировой опыт мониторинга загрязняющих веществ в атмосфере, включая аммиак, подразумевает использование трехуровневой системы контроля: ручной отбор проб с последующим лабораторным анализом, стационарные станции на основе хромато-масс-спектрометрии и мобильные автоматизированные станции, способные к непрерывному мониторингу в реальном времени [8, 9].

Создание сети мобильных мониторинговых станций невозможно на основе традиционных химико-аналитических методов, требующих значительного времени на анализ, или с использованием дорогостоящего и громоздкого оборудования, такого как хромато-масс-спектрометры и лазерные оптические анализаторы. Реализация подобных систем становится достижимой благодаря применению химических сенсоров, сочетающих высокую чувствительность с быстрым временем отклика [9, 10].

Повышенные требования к характеристикам сенсорных устройств для детекции аммиака обуславливают необходимость поиска и разработки новых селективных газочувствительных материалов (ГЧМ) и технологических процессов, позволяющих получать мембраны с заданными свойствами. Активно развиваются технологии синтеза многокомпонентных ГЧМ, среди которых наиболее распространён золь-гель метод. Как показано в литературе [20], использование оксидов титана, железа, олова и вольфрама в качестве прекурсоров для формирования полупроводниковой сенсорной мембраны обеспечивает возможность детектирования аммиака в многокомпонентных газовых смесях.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения полупроводникового сенсора на основе тетраэтоксисилана (ТЭОС), модифицированного оксидами титана, железа и олова, для мониторинга содержания аммиака в воздухе замкнутых экологических систем, в частности, в животноводческих помещениях.

Были разработаны полупроводниковые сенсоры на основе ТЭОС и оксидов металлов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ) при массовом соотношении оксидов 85:10:5. Данные сенсоры предназначены для мониторинга концентраций аммиака в атмосферном воздухе замкнутых экологических систем в широком динамическом диапазоне.

К достоинствам разработанных сенсоров аммиака относятся высокая чувствительность, быстрое время отклика и миниатюрные габариты, что делает их высокоперспективными для применения в замкнутых экологических системах, таких как животноводческие помещения.

Конструктивное исполнение газовых сенсоров во многом определяется типом используемой подложки. В данной работе в качестве подложки для нанесения газочувствительного материала (ГЧМ) использовалась спираль из остеклованного микропровода диаметром 20 мкм. Чувствительный элемент был изготовлен по золь-гель технологии и состоял из ТЭОС и оксидов в следующем процентном соотношении: 85%  $\text{TiO}_2$ , 10%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 5%  $\text{SnO}_2$ .

Для испытания сенсоров использовался автоматизированный испытательный стенд. Исследование влияния температуры на газочувствительность наноматериала проводилось в интервале температур от 50 до 550 °С. Результаты измерений представлены в Таблице 1.

**Таблица 1. Зависимость сопротивления сенсора аммиака от температуры нагревательного элемента ( $C_{nh3} = 500 \text{ мг/м}^3$ )**

Температура GSM, °C	Сопротивление GSM	Температура GSM, °C	Сопротивление GSM
	$x \pm \Delta x$		$x \pm \Delta x$
50	1610	300	680
50	1315	350	663
100	1202	400	716
150	1076	450	795
200	893	500	898
250	753	550	892

Проведённая работа демонстрирует высокую эффективность разработанных сенсоров для мониторинга аммиака в замкнутых экологических системах, обеспечивающих стабильную работу в широком диапазоне концентраций.

**Расчёт чувствительности и экспериментальные наблюдения**

На основе экспериментальных данных изменение чувствительности слоя (S) при различных температурах было рассчитано с использованием уравнения (1):

$$S = R_{\text{возд}} / R_{\text{газ}} = \sigma_{\text{газ}} / \sigma_{\text{возд}} \quad (1)$$

где:  $\sigma_{\text{газ}}$ ,  $R_{\text{газ}}$  — удельная электрическая проводимость и сопротивление плёнки при воздействии газа заданной концентрации;  $\sigma_{\text{возд}}$ ,  $R_{\text{возд}}$  — удельная электрическая проводимость и сопротивление плёнки в чистом воздухе (соответствует значению проводимости при нулевой концентрации детектируемого газа).

**Стабильность полупроводникового сенсора аммиака.** Ключевым показателем сенсоров является стабильность сигнала во времени. Для установления возможности практического применения датчика концентрации аммиака в производственных условиях было проведено исследование его стабильности при длительном воздействии аммиака. В ходе исследования использовалась газоздушная смесь с концентрацией аммиака  $500 \text{ мг/м}^3$ . Рабочая температура сенсора составляла  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Испытания проводились в камере искусственного климата, позволяющей поддерживать относительную влажность воздуха от фонового уровня до 90% в температурном диапазоне от  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Регулирование и поддержание температуры воздуха осуществлялось автоматически посредством электронных мостов с точностью  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Заключение.** Разработана селективная полупроводниковая методика определения аммиака в атмосферном воздухе и многокомпонентных технологических газовых смесях. Созданный на её основе полупроводниковый сенсор позволяет осуществлять мониторинг содержания аммиака в различных газоздушных средах.

Экспериментально подтверждена возможность создания чувствительных и селективных сенсоров аммиака с использованием газочувствительных материалов на основе оксидов титана, железа и олова. Установлена функциональная зависимость аналитического сигнала сенсора от концентрации аммиака в анализируемой смеси.

### **Литература**

1. Andrush V.G., Brynza M.A. Ammonia content in the air of the working area of dairy farms. // Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy 2022. N 2, P. 183-186 (in Russian). <http://doi.org/10.51794/27132064-2021-4-103>
2. Malysheva A.G., Abramov E.G., Nezhentsev K.N. //Determination of ammonia in the air by ion chromatography. - Hygiene and Sanitation, N 4, 2011. P. 83-85. (in Russian). <http://doi.org/10.52142/21332032-2020-3-109>
3. Бондаренко Н.Б., Кондакова Н.В., Старовойтов С.В., Бутко Д.А. Технология снижения газовых выбросов животноводческих ферм // Вестник Российского университета дружбы народов. 2024. N 1. С. 32-40.
4. Dmitrienko M.A., Ginak A.I. Ammonia as a gaseous biomarker of helicobacter pylori infection // Izvestiya SPbGTI (TU). 2016. N. 33(59). P. 56–63(in Russian).
5. Abdurakhmanova Z., Abdurakhmanov, E., Murodova, Z., Suvonkulov, S., Shukrulloev, B. Development of Selective Electrodes for Drug Detection. // Lecture Notes in Networks and Systems, 2024, 1120 LNNS, P. 307–314.
6. Hristov A.N., Hanigan M., Cole A., Todd R., McAllister T.A., Ndegwa P.M., Rotz. A. Review: Ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots // Canadian Journal of Animal Science. 2011. N 91 (1). P. 1-35.
7. Второй В.Ф., Второй С.В., Ильин Р.М. Исследование параметров микроклимата коровника переносным измерительным комплексом // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 3(108). С. 154-163.
8. Sidikova, K., Muminova, N., & Abdurakhmanov, E. (2024). Synthesis of porous gas materials for a semiconductor carbon (II) oxide sensor and their investigation. In E3S Web of Conferences (Vol. 474, p. 01023). EDP Sciences
9. Abdurakhmanov, E., Sidikova, K.G., Muradova, Z.B., Abdurakhmanova, Z.E. Development of a Selective Carbon Monoxide Sensor. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 839(4), 042078.
10. Podolskaya E.E., Bondarenko E.V., Marchenko V.O., Sviridova S.A. Manure management during loose housing of animals. Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock. 2021; 4(44):103-107 (In Russ.)

=====  
11. Hristov A.N., Hanigan M., Cole A., Todd R., McAllister T.A., Ndegwa P.M., Rotz. A. Review: Ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots // Canadian Journal of Animal Science. 2011; 91 (1): 1-35. (In Eng.)

12. Muminova, N., Sidikova, K., & Abdurakhmanov, E. (2024). Investigation of teos hydrolytic polycondensation in the synthesis of gas-sensitive films for a semiconductor carbon (II) oxide sensor. In E3S Web of Conferences (Vol. 474, p. 01021). EDP Sciences DOI:[10.1051/e3sconf/202447401021](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447401021)