

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.841.7, 661.832.322.56

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-4-9>**Результаты экспериментальных исследований влияния электрических полей на содержание аммония в животноводческих стоках***О.Н. Дидманидзе¹, А.В. Евграфов², Н.Н. Пуляев³, Д.А. Филимонов⁴*^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>² labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>³ pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>⁴ dfilimonov3@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>

Аннотация. При внесении животноводческих стоков на сельскохозяйственные поля необходимо снизить в них содержание аммония. С целью разработки более эффективных способов очистки сточных вод изучено воздействие электрического поля на изменение концентрации аммонийных соединений азота в водных растворах (электролите). Экспериментальные исследования проведены на разработанной установке, использующей принцип электролиза. Для имитации содержания аммония в электролите использовалась дистиллированная вода с добавлением аммиачной селитры. Электролит объемом 500 мл помещался между электродами и обрабатывался постоянным током в течение 1, 3, 4 и 9 мин. Исследования проводились при концентрации NH_4^+ в электролите 60, 90 и 300 мг/л. После завершения эксперимента определялись концентрация азотных соединений и водородный показатель pH электролита. Установлено, что воздействие электрического поля на водный раствор NH_4^+ приводит к снижению концентрации аммонийных соединений азота и изменению pH электролита с кислотной до щелочной реакции. После 9-минутной обработки электролита с концентрацией NH_4^+ 60 и 90 мг/л в растворе не были обнаружены аммонийные соединения. Обработка раствора с концентрацией NH_4^+ 300 мг/л в течение 1 мин привела к снижению концентрации аммония до 75 мг/л, что говорит о перспективности данного способа очистки и разработки промышленного образца технического средства для обработки стоков животноводства. Снижение концентрации аммонийного азота позволит уменьшить экологическую нагрузку на почву, грунтовые и поверхностные воды и повысить качество растениеводческой продукции, выращиваемой на сельскохозяйственных угодьях, на которых утилизируются сточные воды животноводческих комплексов. Изменение pH электролита с кислотной до щелочной реакции положительно повлияет на кислые почвы Центральной Нечерноземной зоны РФ.

Ключевые слова: сточные воды животноводческих комплексов, аммоний, электролит, сточные воды, изменение концентрации аммонийных соединений, содержание аммония в животноводческих стоках

Для цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Пуляев Н.Н., Филимонов Д.А. Результаты экспериментальных исследований влияния электрических полей на содержание аммония в животноводческих стоках // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-4-9>

ORIGINAL ARTICLE

Results of experimental studies of the effect of electric fields on the ammonium content in livestock wastewater*O.N. Didmanidze¹, A.V. Evgrafov², N.N. Pulyaev³, D.A. Filimonov⁴*^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>² labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>³ pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>⁴ dfilimonov3@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>

Abstract. When applying livestock wastewater to agricultural fields, it is necessary to reduce its ammonium content. In order to develop more effective methods of wastewater treatment, the authors studied the effect of electric field on the change in the concentration of ammonium nitrogen compounds in aqueous solutions (the electrolyte). Experimental studies were

carried out on the developed installation using the principle of electrolysis. Distilled water with added ammonium nitrate was used to simulate the ammonium content in the electrolyte. The 500 ml electrolyte was placed between the electrodes and treated with direct current for 1, 3, 4, and 9 min. The studies were carried out at the NH_4^+ concentration in the electrolyte of 60, 90 and 300 mg/liter. When the experiment was completed, the authors determined the concentration of nitrogen compounds and the hydrogen pH of the electrolyte. It was found that the exposure of NH_4^+ aqueous solution to the electric field leads to a decrease in the concentration of ammonium nitrogen compounds and a change in the pH of the electrolyte from the acidic to alkaline reaction. No ammonium compounds were detected in the solution after a 9-minute treatment of the electrolyte with the NH_4^+ concentration of 60 and 90 mg/liter. Treatment of the solution with the NH_4^+ concentration of 300 mg/l for 1 min led to a decrease in the ammonium concentration to 75 mg/l. This fact indicates the viability of this method of treatment and the development of an industrial sample of technical means to treat livestock wastewater. Reducing the ammonium nitrogen concentration will decrease the ecological load on soil, ground and surface waters, and improve the quality of crops grown on the farmland, supplied with wastewater from livestock facilities. Changing the pH of electrolyte from the acid to alkaline reaction will have a positive effect on the acidic soils of the Central Non-Chernozem (Black Soil) Zone of the Russian Federation.

Keywords: livestock wastewater, ammonium, electrolyte, wastewater, change in the concentration of ammonium compounds, ammonium content in livestock wastewater

For citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Pulyaev N.N., Filimonov D.A. Results of experimental studies of the effect of electric fields on the ammonium content in livestock wastewater. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-4-9>

Введение

Перевод на бесподстилочное содержание животных с применением систем гидросмыва приводит к увеличению объема животноводческих стоков и обострению проблемы охраны окружающей среды [1, 2]. В России при наличии большого количества животноводческих комплексов данная проблема стоит очень остро. Для крупных хозяйств объем жидких стоков, подлежащих утилизации, составляет от 100 до 1500 м³ в сутки [3].

Сточные воды животноводческих комплексов объемом 1 м³ содержат 0,8...1,4 кг азота; 0,3...0,7 кг фосфора; 0,4...1,2 кг калия. Минеральная часть азота в основном представлена в виде аммония, содержание которого в стоках превышает концентрацию фосфорных и калийных минеральных соединений. Сточные воды животноводческих комплексов могут являться источником поступления соединений азота в почву, поскольку общий азот в них составляет 3,2% от общего объема, причем более 50% азота – в легкорастворимой

аммиачной форме. Состав сточных вод животноводческих комплексов¹ представлен в таблице 1.

В растениях азот находится в составе белков, нуклеиновых кислот (РНК, ДНК), играющих важную роль в обмене веществ, хлорофилле, ферментах, а также в форме азотных соединений (нитратов, нитритов, аммиака). Избыточный азот способен накапливаться в растениях без вреда для них, но его избыток представляет угрозу для здоровья людей и животных. При внесении высоких доз азота качество растениеводческой продукции ухудшается, нарушается сахаро-протеиновое и кальцево-фосфорное соотношение, значительно увеличивается содержание нитратов. Минеральный азот представлен в почве в основном аммонием, нитратами и нитритами. Последние присутствуют в малых дозах и не сорбируются почвенно-поглощающим комплексом [4-6]. В почве аммоний с помощью микроорганизмов частично подвергается нитрификационному процессу, который носит окислительный характер.

Таблица 1

Состав сточных вод животноводческих комплексов

Table 1

Composition of wastewater from livestock facilities

Сточные воды Wastewater	pH	K ⁺ , мг/л	NH ₄ ⁺ , мг/л	P ₂ O ₅ , мг/л	Взвешенный осадок, мг/л Suspended sludge, mg/l
Сточные воды свиноккомплексов / Wastewater of pig farms	7,5	274	573	152	1347
Сточные воды КРС / Wastewater of cattle farms	7,4	860	420	158	1347

¹ Шевцов Н.М. Внутрипочвенная очистка и утилизации сточных вод. М.: Агропромиздат, 1988. С. 2-24; Методические рекомендации по технологическому проектированию оросительных систем использования животноводческих стоков. РД-АПК 1.30.03.02-20. 2020. URL: <https://biokompleks.ru/normativnye-dokumenty/rd-apk-1.30.03.01-20.php>.

Очистка сточных вод может осуществляться путем извлечения из стоков минеральных веществ и их повторного использования (например, фенолы и уксус, содержащиеся в сточных водах газогенераторных станций, могут быть извлечены и использованы вторично) или путем разрушения загрязняющих веществ с помощью восстановления или окисления и дальнейшего удаления продуктов разрушения (предварительная очистка и сброс в водоемы или подача на сельскохозяйственные поля для выращивания продукции, подача на поля фильтрации для доочистки, очистка стоков в биологических-оксидициальных прудах).

Наиболее экологически безопасным и экономически выгодным методом утилизации сточных вод животноводческих комплексов является использование их на полях при выращивании сельскохозяйственной продукции. В этом случае значительная часть веществ, содержащихся в стоках, выносятся с поля вместе с урожаем. При этом необходимо следить за качеством растениеводческой продукции, а именно за содержанием азота в получаемой продукции [7-10].

Для снижения содержания аммония в животноводческих стоках с целью внесения их на сельскохозяйственные поля требуется разработка более эффективных способов утилизации сточных вод.

Цель исследований: изучение воздействия электрического поля на изменение концентрации аммонийных соединений азота в водных растворах (электролите) для дальнейшей разработки технических средств по снижению их концентрации и повышению экологической безопасности.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовалась установка (рис. 1), включающая в себя колонну, в которой электроды-колонны выполнены из алюминиевых труб (сплав АД31Т1) с внешним диаметром 16 и 46 мм (табл. 2), внешняя токоизоляция состоит из двух слоев термоусадочных рукавов марки Ф70 с максимальной нагрузкой каждого слоя 10 кВ. К колонне подключен источник питания постоянного тока

RGK PS-1326, обеспечивающий максимальное значение тока 6 А при напряжении на электродах 32 В. Значение тока контролировали тестером для постоянного и переменного тока до 600 В. Значение показателей электролита определяли рН-метром с точностью измерений 0,01 и профессиональными тестами для воды производства компаний НИЛПА и UHE. Для обнаружения газообразных форм азота применялся газоанализатор HAVOTEST. Уровень электролита в экспериментальной установке определяли цифровым штангельциркулем с точностью измерения 0,1 мм (рис. 1).

При проведении экспериментальных исследований использовалась схема подключения, при которой катодом являлся внешний электрод колонны, а анодом – внутренний, при значениях постоянного тока 5 А и напряжением 12 В (рис. 2).

Для имитации содержания аммония в электролите использовалась дистиллированная вода с добавлением аммиачной селитры.

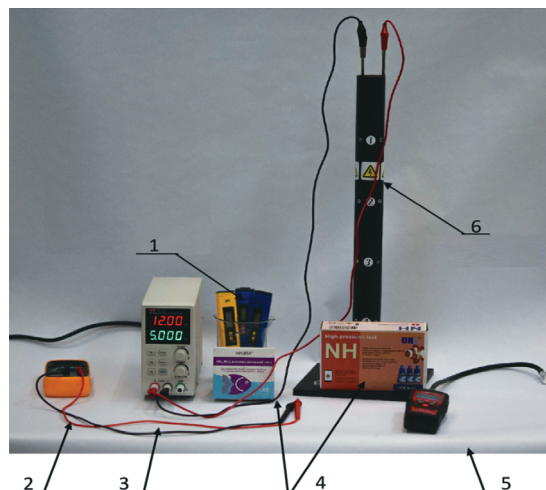


Рис. 1. Экспериментальная установка:

- 1 – рН-метр, солемер; 2 – тестер;
- 3 – лабораторный источник постоянного тока;
- 4 – профессиональные тесты NH₃/NH₄;
- 5 – газоанализатор; 6 – колонна

Fig. 1. Experimental installation:

- 1 – pH-meter, salt meter; 2 – tester;
- 3 – laboratory DC source;
- 4 – professional NH₃/NH₄ tests; 5 – gas analyzer; 6 – column

Параметры электродов колонны

Таблица 2

Column electrode parameters

Table 2

Параметры электрода / Electrode parameters	Анод «+»	Катод «-»
Диаметр контактной поверхности, м / Diameter of contact surface, m	0,016	0,046
Длина круга, м / Circle length, m	0,05	0,144
Площадь контактной поверхности при уровне электролита в экспериментальной установке 0,295 м, м ² / Area of contact surface at the electrolyte level in the experimental installation of 0.295 m, m ²	0,015	0,042
Площадь поперечного сечения, м ² / Cross-sectional area, m ²	0,0001	0,0003

Электролит объемом 500 мл помещался в колонну между электродами (рис. 2) и обрабатывался постоянным током в течение 1, 3, 4 и 9 мин.

Исследования проводились при концентрации аммония в электролите 60, 90 и 300 мг/л.

Выход газообразных азотных соединений фиксировался при помощи газоанализатора. После завершения

эксперимента определялись параметры электролита: концентрация азотных соединений, мг/л и водородный показатель pH.

Результаты и их обсуждение

Воздействие электрического поля на водный раствор NH_4^+ концентрацией 60 мг/л привело к снижению концентрации аммонийных соединений азота: после обработки в течение 1 мин концентрация составила 4 мг/л, через 3 мин – 2 мг/л, через 6 мин – 1 мг/л, через 9 мин – 0 мг/л (рис. 3). Результаты исследований позволяют говорить об уменьшении токсичности электролита. При концентрации аммонийного азота в электролите 60 мг/л начальное значение pH соответствовало 6, после 9 мин обработки pH = 8,4.

Тенденция уменьшения концентрации наблюдалась и в опыте с начальной концентрацией азотных соединений в электролите 90 мг/л: после обработки в течение 1 мин концентрация составила 6 мг/л, через 3 мин – 4 мг/л, через 6 мин – 2 мг/л, через 9 мин – 0 мг/л (рис. 4). После эксперимента изменилось значение показателя pH с 5,58 до 7,81.

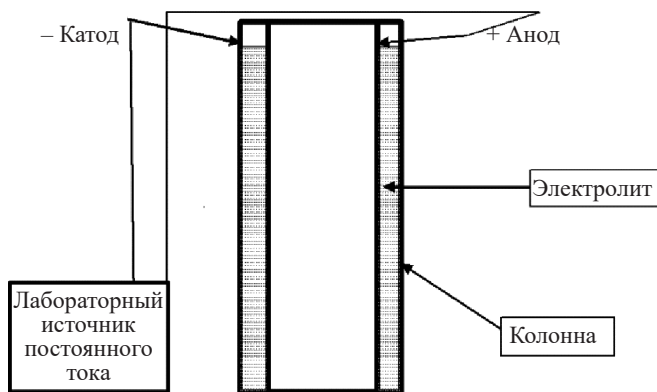


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

Fig. 2. Principle scheme of the experimental installation

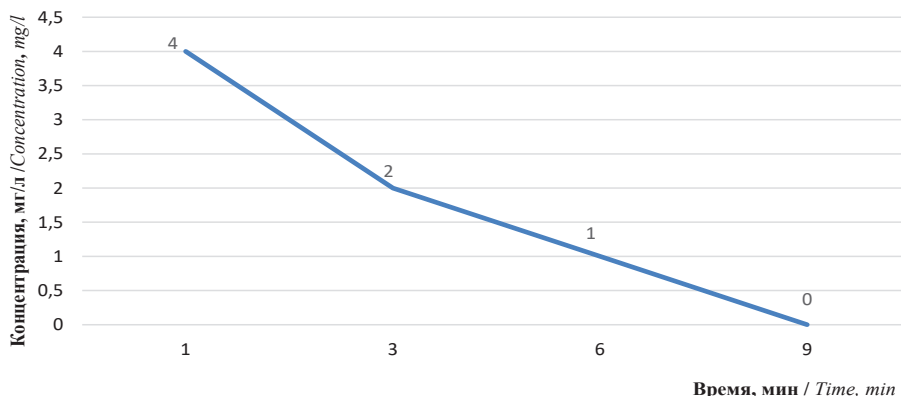


Рис. 3. Изменение концентрации NH_4^+ в электролите при воздействии электрического поля (начальная концентрация аммония – 60 мг/л)

Fig. 3. Change of the NH_4^+ concentration in electrolyte under the influence of the electric field (initial ammonium concentration of 60 mg/l)

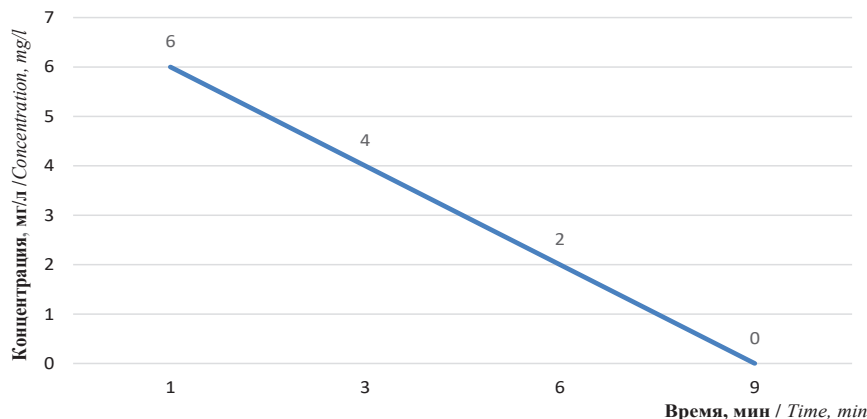


Рис. 4. Изменение концентрации электролита при воздействии электрического поля (начальная концентрация NH_4^+ – 90 мг/л)

Fig. 4. Change of the electrolyte concentration under the influence of the electric field (initial NH_4^+ concentration of 90 mg/l)

При следующей серии опытов начальная концентрация электролита составила 300 мг/л, через те же интервалы времени проведения эксперимента конечные значения составили 75, 65, 45 и 15 мг/л (рис. 5).

Отметим, что концентрация 300 мг/л соответствует реальной концентрации аммония в сточных водах животноводческих комплексов. Значение показателя

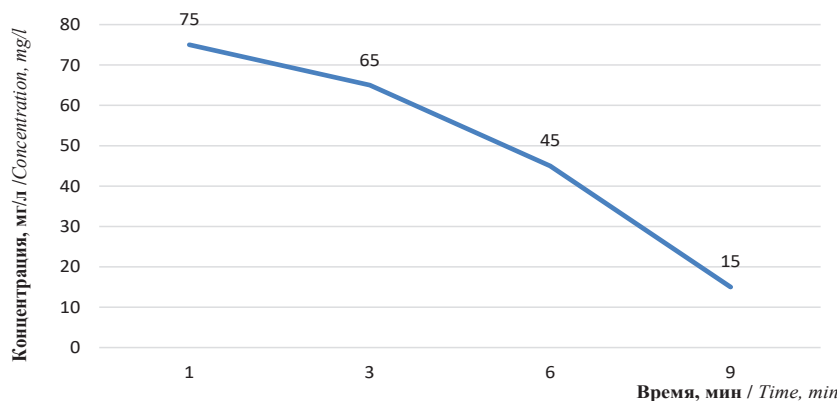


Рис. 5. Изменение концентрации электролита при воздействии электрического поля (начальная концентрация NH_4^+ – 300 мг/л)

Fig. 5. Change of the electrolyte concentration under the influence of the electric field (initial NH_4^+ concentration of 300 mg/l)

Выводы

1. Сточные воды животноводческих комплексов являются водными растворами аммонийных соединений. Снизить их концентрацию позволяет электролиз. Обработка раствора аммония концентрацией 300 мг/л в течение 1 мин снижает его концентрацию до 75 мг/л, что говорит о перспективности данного способа очистки и разработки промышленного образца технического средства для обработки стоков животноводства.

2. Снижение концентрации аммонийного азота уменьшает экологическую нагрузку на почву,

pH изменилось с 5,53 до максимального конечного pH = 8,88.

Снижение концентрации аммония в растворе электролита при электролизе достигается за счет получения N_2 , выход которого фиксировался газоанализатором. В процессе проведения эксперимента не зафиксировано присутствие NH_3 , NO_2 и NO_2 . Отсутствие аммиака подтверждается изменением pH электролита с 5,58 до 8,88.

грунтовые и поверхностные воды и позволит повысить качество растениеводческой продукции, выращиваемой на сельскохозяйственных угодьях, на которых утилизируются стоки животноводческих комплексов.

3. Изменение pH электролита с кислотной до щелочной реакции положительно повлияет на почвы Центральной Нечерноземной зоны РФ, так как почвы в своем большинстве имеют водородный показатель значительно ниже 7 и нуждаются в дополнительных мероприятиях по его повышению.

Список источников

1. Тиво П.Ф., Анженков А.С., Саскевич Л.А., Бут Е.А. Анализ современных технологий использования животноводческих стоков // Мелиорация. 2017. № 3 (81). С. 54-63. EDN: YLONHR
2. Kadlec R., Knight R., Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. 2000. 171 p. <http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978>
3. Водяников В.И., Николаев С.И., Шкаленко В.В. Экологические проблемы животноводческих комплексов // Стратегическое эколого-экономическое развитие регионов и муниципальных образований в условиях глобализации: Материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 30 марта 2017 г. М.: Российская академия естественных наук, 2017. С. 212-218. EDN: YQMRKZ
4. Васюков А.Е., Самсонова Е.С. Исследование сорбции-десорбции нитрат-ионов почвами потенциометрическим методом // Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского: Материалы докладов, г. Калуга,

References

1. Tivo P.F., Anzhenkov A.S., Saskevich L.A., But E.A. Analysis of modern technologies to use livestock waste. *Melioratsiya*. 2017;3:54-63. (In Russ.)
2. Kadlec R., Knight R., Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. 2000. 171 p. <http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978>
3. Vodyannikov V.I., Nikolaev S.I., Shkalenko V.V. Ecological problems of livestock facilities. *Strategicheskoe ekologo-ekonomicheskoe razvitiye regionov i munitsipalnykh obrazovaniy v usloviyakh globalizatsii* [Strategic ecological and economic development of regions and municipalities in the context of globalization]: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, March 30, 2017. Moscow: Russian Academy of Natural Sciences, 2017. Pp. 212-218.
4. Vasyukov A.E., Samsonova E.S. Study of sorption-desorption of nitrate ions by soils by the potentiometric method. *Nauchnye Trudy Kaluzhskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni K.E. Tsiolkovskogo* [Scientific Proceedings of K.E. Tsiolkovsky Kaluga

13-14 апреля 2022 г. Калуга: Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2022. С. 205-211. EDN: NVEGQW

5. Кавердова И.С. Нитраты в почве и их влияние на качество овощей и здоровье людей // Исследования молодежи – экономике, производству, образованию: Материалы XIV Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Сыктывкар, 17-21 апреля 2023 г. Сыктывкар: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2023. С. 102-107. EDN: DYGNNGJ

6. Пироговская Г. Вымывание питательных элементов из почв: экономический аспект // Наука и инновации. 2024. № 3 (253). С. 73-80. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-3-73-80>

7. Gogmachadze L.G., Khusnetdinova K.A., Stepanov A.L., Kravchenko I.K. Microcosm study of ammonium and drying impact on methane oxidation in agricultural soil. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023;8(36). <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.36.7>

8. Mervin St.L., Joann K.W., Noura Z., Bernie J.Z. Chapter two – nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in agronomy*. 2011;112:55-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00002-0>

9. Keeney D.R., Nelson D.W. Nitrogen-Inorganic forms. *Agronomy Monographs*, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>

10. Cathcart J., Mason H., Sey B., Heinz J., Cannon K. Assessment of Environmental Sustainability in Alberta's Agricultural Watersheds Project. Alberta Agriculture and Rural Development, Edmonton, AB. 2008.

State University]: Conference proceedings, Kaluga, April 13-14, 2022 Kaluga: Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, 2022. Pp. 205-211. (In Russ.)

5. Kaverdova I.S. Nitrates in the soil and their impact on the quality of vegetables and human health. *Issledovaniya molodezhi – ekonomike, proizvodstvu, obrazovaniyu* [Contribution of the Youth Research to Economy, Production, and Education]: Proceedings of the XIV All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, Syktyvkar, April 17-21, 2023 Syktyvkar: St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, 2023. Pp. 102-107. (In Russ.)

6. Pirauhovskaya H. Leasing of nutrients from soils: economic aspect. *Science and Innovations*. 2024;(3):73-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-3-73-80>

7. Gogmachadze L.G., Khusnetdinova K.A., Stepanov A.L., Kravchenko I.K. Microcosm study of ammonium and drying impact on methane oxidation in agricultural soil. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023;8(36). <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.36.7>

8. Mervin St.L., Joann K.W., Noura Z., Bernie J.Z. Chapter two – nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in agronomy*. 2011;112:55-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00002-0>

9. Keeney D.R., Nelson D.W. Nitrogen-Inorganic forms. *Agronomy Monographs*, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>

10. Cathcart J., Mason H., Sey B., Heinz J., Cannon K. Assessment of Environmental Sustainability in Alberta's Agricultural Watersheds Project. Alberta Agriculture and Rural Development, Edmonton, AB. 2008.

Информация об авторах

Отари Назирович Дидманидзе¹, академик РАН,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей; didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>, AuthorID: 311972

Алексей Владимирович Евграфов², д-р техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>; AuthorID: 828739

Николай Николаевич Пуляев³, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>, AuthorID: 416620

Дмитрий Александрович Филимонов⁴, ассистент кафедры тракторов и автомобилей; dfilimonov3@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>, AuthorID: 1251247

^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

О.Н. Дидманидзе – формулирование концепции экспериментальных исследований;

А.В. Евграфов – разработка методики проведения исследований; Н.Н. Пуляев – представление результатов, обработка полученных результатов;

Д.А. Филимонов – проведение экспериментальных исследований, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 09.07.2024; поступила после рецензирования и доработки 09.09.2024; принята к публикации 11.09.2024

Author Information

Otari N. Didmanidze¹, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Tractors and Automobiles; didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>, AuthorID: 311972

Aleksei V. Evgrafov², DSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>; AuthorID: 828739

Nikolay N. Pulyaev³, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>, AuthorID: 416620

Dmitry A. Filimonov⁴, Assistant Professor, the Department of Tractors and Automobiles; dfilimonov3@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>, AuthorID: 1251247

^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; the Institute of Mechanical and Power Engineering named after V.P. Goryachkin; 127434, Moscow, 49, Timiryazevskaya Str.

Author Contribution

O.N. Didmanidze – conceptualization of experimental studies;

A.V. Evgrafov – research methodology; N.N. Pulyaev – writing – original draft preparation, revising and editing; data curation;

D.A. Filimonov – investigation, visualization.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 09.07.2024; Revised 09.09.2024; Accepted 11.09.2024.