Оригинальная статья

УДК 622.81:543.275 © А.А. Ступина✉[1,2,3], В.Ю. Конюхов[4], Т.А. Опарина[4], Ш.Ш. Мамиров[5], Н.Э. Сатторов[6], А.У. Кузиев[7], 2025

[1] ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия
[2] Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 662972, г. Железногорск, Россия
[3] Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, 660037, г. Красноярск, Россия
[4] ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, г. Иркутск, Россия
[5] Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, 110100, г. Алмалык, Узбекистан
[6] Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», 100000, г. Ташкент, Узбекистан
[7] Термезский государственный университет, 190100, г. Термез, Узбекистан
✉ e-mail: h677hm@gmail.com

Original Paper

UDC 622.81:543.275 © A.A. Stupina✉[1,2,3], V.Yu. Konyukhov[4], T.A. Oparina[4], Sh.Sh. Mamirov[5], N.E. Sattorov[6], A.U. Kuziev[7], 2025

[1] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2] Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
[3] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[4] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russian Federation
[5] Almalyk Branch of Islam Karimov Tashkent State Technical University, Almalyk, 110100, Uzbekistan
[6] "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University, Tashkent, 100000, Uzbekistan
7 Termez State University, Termez, 190100, Uzbekistan
e-mail: h677hm@gmail.com

Повышение точности определения концентрации угольной пыли для обеспечения безопасности в шахтах

Improving the accuracy of coal dust concentration determination for mine safety

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-6-89-93

В статье рассматриваются вопросы безопасности труда в горнодобывающей промышленности. Для достижения цели работы проведены анализ и совершенствование методов контроля шахтной атмосферы. Осуществлено математическое моделирование пылемера, использующего нефелометрический и турбидиметрический методы для измерения концентрации и дисперсных параметров пылевых аэрозолей. Исследованы основные факторы, влияющие на точность измерений, включая концентрацию и дисперсность пыли, длину волны излучения и геометрические параметры оптической системы. Выявлено, что турбидиметрический метод более чувствителен при измерении малых концентраций пыли, а нефелометрический эффективнее при определении высоких концентраций.

Ключевые слова: *угольная пыль, взрывоопасность, шахтная атмосфера, мониторинг, турбидиметрия, нефелометрия, концентрация аэрозолей, безопасность труда.*

Для цитирования: Повышение точности определения концентрации угольной пыли для обеспечения безопасности в шахтах / А.А. Ступина, В.Ю. Конюхов, Т.А. Опарина и др. // Уголь. 2025;(6):89-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-89-93.

СТУПИНА А.А.
Доктор техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 662972, г. Железногорск, Россия, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, 660037, г. Красноярск, Россия, e-mail: h677hm@gmail.com

КОНЮХОВ В.Ю.
Канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, Россия, e-mail: konyukhov_vyu@mail.ru

ОПАРИНА Т.А.
Старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
664074, г. Иркутск, Россия,
e-mail: tatianaop@ex.istu.edu

МАМИРОВ Ш.Ш.
PhD, заведующий кафедрой,
Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова,
110100, г. Алмалык, Узбекистан,
e-mail: wwer10240@gmail.com

САТТОРОВ Н.Э.
Канд. сельхоз. наук, доцент,
Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»,
100000, г. Ташкент, Узбекистан,
e-mail: n.sattarov1962@gmail.com

КУЗИЕВ А.У.
Доктор техн. наук, доцент,
Термезский государственный университет,
190100, г. Термез, Узбекистан,
e-mail: quziyev@tersu.uz

Abstract
The article deals with the issues of labour safety in the mining industry. In order to achieve the goal of the work, the methods of mine atmosphere control have been analysed and improved. Mathematical modelling of the dust meter using nephelometric and turbidimetric methods for measuring concentration and dispersion parameters of dust aerosols has been carried out. The main factors affecting the measurement accuracy, including dust concentration and dispersity, radiation wavelength and geometrical parameters of the optical system, are investigated. It is revealed that the turbidimetric method is more sensitive in measuring low dust concentrations, and the nephelometric method is more effective in determining high concentrations.

Keywords
Coal dust, explosion hazard, mine atmosphere, monitoring, turbidimetry, nephelometry, aerosol concentration, occupational safety.
For citation
Stupina A.A., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A., Mamirov Sh.Sh., Sattorov N.E., Kuziev A.U. Improving the accuracy of coal dust concentration determination for mine safety. *Ugol'*. 2025;(6):89-93. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-89-93.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы безопасности труда в горнодобывающей промышленности, особенно в угольной отрасли, всегда находятся в центре внимания, поскольку связаны с высоким риском возникновения аварий и несчастных случаев. Одной из наиболее серьезных угроз являются взрывы, вызванные скоплением горючих газов и угольной пыли в атмосфере шахт. Эта проблема носит глобальный характер и требует постоянного совершенствования методов контроля и предотвращения таких инцидентов [1, 2, 3]. Существуют различные подходы к решению проблемы взрывоопасности угольной пыли. Традиционные методы включают в себя регулярное проветривание шахт для снижения концентрации взрывоопасных веществ, применение водяных завес и инертной пыли для локализации и подавления взрывов, а также использование систем газового контроля. Однако эти методы имеют свои ограничения [4, 5, 6, 7]. Проветривание может быть энергозатратным и не всегда эффективно в труднодоступных участках шахты. Водяные завесы требуют значительного расхода воды, а применение инертной пыли может создавать дополнительные проблемы с видимостью и респираторными заболеваниями у шахтеров. Кроме того, традиционные методы контроля концентрации пыли часто требуют непосредственного участия человека, что повышает риск и замедляет процесс получения информации [8, 9, 10].

В этой связи разработка и внедрение современных, высокоточных и автоматизированных систем мониторинга концентрации пылевых аэрозолей приобретают особую актуальность. Такие системы позволяют оперативно отслеживать изменения в составе шахтной атмосферы, своевременно выявлять опасные концентрации пыли и газа и принимать меры по предотвращению взрывов [11, 12, 13]. Оптические методы измерения, такие как турбидиметрия и нефелометрия, представляются наиболее перспективными в этом направлении. Они позволяют проводить мониторинг в режиме реального времени, без участия человека, и обеспечивают высокую чувствительность к изменению концентрации пыли [14].

При этом важным является не только определение общей концентрации, но и анализ дисперсного состава пыли, поскольку именно мелкие частицы обладают наибольшей взрывоопасностью. Целью представленной работы является снижение опасности взрывов угольной пыли за счет повышения точности определения концентрации аэрозолей

при подземной добыче угля, что достигается путем анализа и совершенствования методов контроля шахтной атмосферы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования было выполнено математическое моделирование пылемера, работающего на основе нефелометрического и турбидиметрического методов измерения концентрации и дисперсных параметров пылевых аэрозолей. Были проанализированы основные факторы, влияющие на точность измерений, такие как концентрация и дисперсность пыли, длина волны излучения, а также геометрические параметры оптической системы. В процессе моделирования учитывались как дестабилизирующие факторы, так и особенности физических процессов, происходящих при взаимодействии светового излучения с пылевыми частицами. Для турбидиметрического метода применялся закон Бугера. Для нефелометрического метода использовался закон Релея [15].

Для математического моделирования и численных расчетов использовалось специализированное программное обеспечение – COMSOL Multiphysics и MathCAD. COMSOL Multiphysics применялся для моделирования распространения электромагнитного излучения в дисперсных средах и расчета интенсивности поглощенного и рассеянного света. MathCAD использовался для численных расчетов и обработки данных. В качестве источника излучения в модели рассматривался лазер, генерирующий свет в видимом диапазоне спектра с длиной волны 0,38 мкм (*рис. 1*).

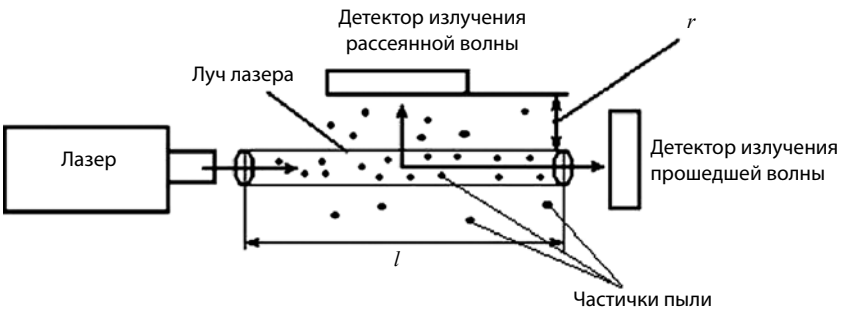

Рис. 1. Схема измерения

Fig. 1. Measurement design

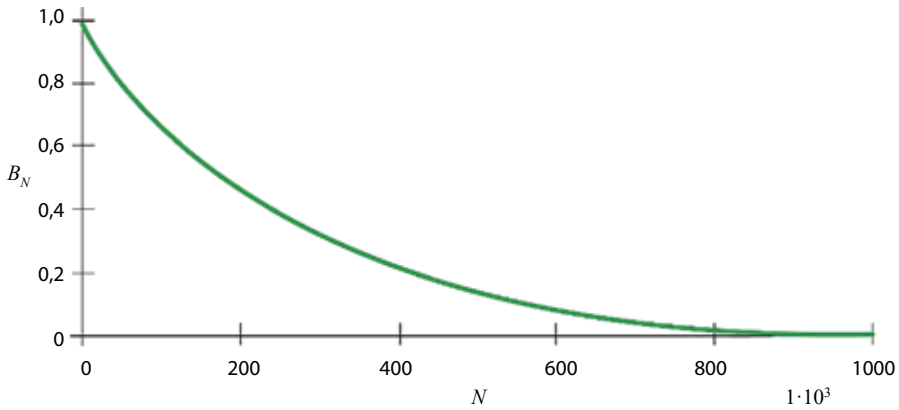

Рис. 2. Зависимость интенсивности поглощения луча лазера от концентрации частичек пыли в луче

Fig. 2. Dependence of the laser beam absorption intensity on the concentration of dust particles within the beam

При моделировании варьировались параметры пылевой среды, такие как концентрация пыли и средний размер частиц (от 0,05 до 30 мкм). Также изменялись длина базы оптического канала от 5 до 15 см, и расстояние от лазера до детектора для нефелометрического метода от 3 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе математического моделирования были выявлены закономерности изменения интенсивности поглощенного и рассеянного света в зависимости от различных факторов. Турбидиметрический метод проявляет более высокую чувствительность при измерении малых концентраций пыли. В частности, при концентрации пыли 5 г/м^3 интенсивность прошедшего света уменьшается на 15% по сравнению с чистой средой, в то время как интенсивность рассеянного света увеличивается всего на 3% (*рис. 2*).

Это обусловлено экспоненциальным характером поглощения света, что позволяет более точно определять концентрацию даже при небольшом количестве пылевых частиц. При увеличении концентрации до 20 г/м^3 разница становится еще более выраженной: поглощение возрастает до 45%, а рассеяние – до 12%. Вместе с тем, при достижении концентрации пыли свыше 30-50 г/м^3 интенсивность рассеянного света возрастает на 25% по сравнению с чистой средой, что позволяет более точно определять концентрацию.

Исследование влияния размера частиц на результаты измерений показало, что оба метода чувствительны к дисперсному составу пыли. Однако турбидиметрический метод проявляет большую чувствительность к мелким частицам (менее 5 мкм), поскольку они обладают большей удельной поверхностью и, соответственно, более эффективно поглощают свет. Нефелометрический метод, напротив, более эффективен при измерении крупных частиц (более 10 мкм), поскольку они лучше рассеивают свет (*рис. 3*).

В ходе моделирования были также исследованы оптимальные геометрические параметры оптической системы пылемера. Было установлено, что при длине базы оптического канала 10 см достигается оптимальное соотношение между чувствительностью и линейностью измерений. Увеличение длины базы приводит к повышению чувствительности, но снижает линейность, особенно при высоких концентрациях пыли. Уменьшение длины базы, напротив, снижает чувствительность, но повышает линейность. Для нефелометрического метода оптимальным является расстояние между лазером и детектором, равное 3 см. При

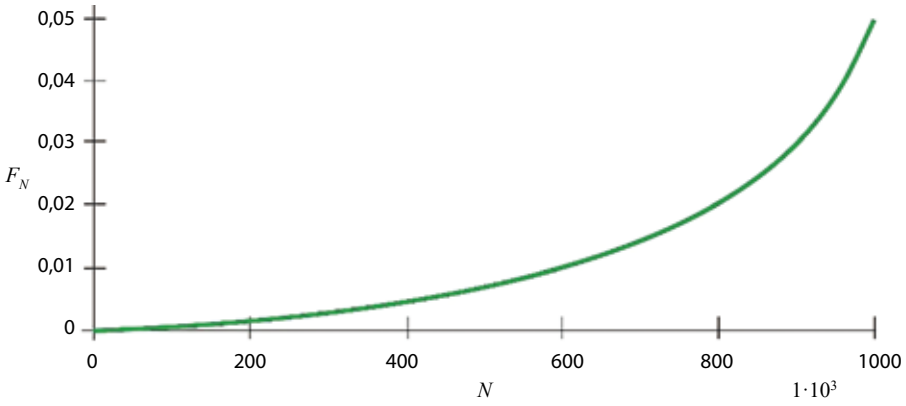

Рис. 3. Зависимость интенсивности рассеянного луча лазера от концентрации угольной пыли при расстоянии от луча до детектора 3 см

Fig. 3. Dependence of the scattered laser beam intensity on the concentration of coal dust at a distance of 3 cm from the beam to the detector

этом угле рассеяния около 90 градусов обеспечивается максимальная чувствительность к изменению концентрации пыли. На основе полученных данных был разработан алгоритм обработки результатов измерений, позволяющий компенсировать влияние дисперсного состава пыли на точность определения концентрации. Алгоритм основан на одновременном использовании турбидиметрического и нефелометрического методов и позволяет получать более точные результаты измерений в широком диапазоне концентраций и дисперсного состава пыли. Численные эксперименты показали, что разработанный алгоритм позволяет снизить погрешность измерений на 15-20% по сравнению с использованием только одного метода. В частности, при измерении концентрации пыли с неизвестным дисперсным составом погрешность составляет не более 5%, что является приемлемым для большинства практических приложений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование и полученные результаты позволяют глубже понять особенности применения турбидиметрического и нефелометрического методов для мониторинга концентрации угольной пыли в шахтной атмосфере. Анализ данных, полученных в ходе математического моделирования, выявил ряд важных закономерностей, касающихся чувствительности, точности и применимости этих методов в различных условиях. Одной из ключевых закономерностей является различная чувствительность турбидиметрического и нефелометрического методов к концентрации пыли. Как показали результаты моделирования, турбидиметрический метод более эффективен при измерении малых концентраций, что связано с экспоненциальным характером поглощения света. Даже незначительное количество пылевых частиц оказывает существенное влияние на интенсивность прошедшего света, что позволяет точно определять их концентрацию. При этом нефелометрический метод проявляет свои преимущества по сравнению с турбидиметрическим. В областях с высокой концентрацией частиц, где требуются повышенная линейность и устойчивость к помехам, нефелометрический метод является более предпочтительным. Еще одной важной закономерностью является влияние дисперсного состава пыли на результаты измерений. Мелкие частицы (менее 5 мкм) более эффективно поглощают свет, что делает турбидиметрический метод более чувствительным к ним. Крупные частицы (более 10 мкм), напротив, лучше рассеивают свет, что делает нефелометрический метод более эффективным при их измерении. Эта закономерность подчеркивает важность учета дисперсного состава пыли при интерпретации результатов измерений. В идеальном случае необходимо проводить одновременное измерение концентрации и дисперсного состава пыли, чтобы получать более точные и надежные данные. Разработанный в рамках исследования алгоритм является перспективным и конкурентоспособным. В ряде работ, посвященных мониторингу шахтной атмосферы, также отмечаются важность использования оптических методов измерения и необходимость учета дисперсного состава пыли [16]. Однако большинство существующих систем мониторинга основаны на использовании только одного метода измерения (либо турбидиметрии, либо нефелометрии), что ограничивает их точность и применимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа и математического моделирования турбидиметрического и нефелометрического методов измерения концентрации угольной пыли, были выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность и точность каждого из методов в условиях шахтной атмосферы. В частности, установлено, что турбидиметрический метод демонстрирует более высокую чувствительность при измерении низких концентраций пыли, в то время как нефелометрический метод эффективнее при определении высоких концентраций. Также выявлена зависимость чувствительности каждого метода от дисперсного состава пыли: турбидиметрия более чувствительна к мелким частицам, а нефелометрия – к крупным. По итогу данной работы был сделан алгоритм обработки результатов измерений, компенсирующий влияние дисперсного состава пыли на точность определения концентрации. Также было показано, что применение разработанного алгоритма позволяет снизить погрешность измерений на 15-20%. Это позволит оперативно выявлять опасные концентрации пыли и газа, своевременно принимать меры по предотвращению взрывов и, как следствие, повысить безопасность труда шахтеров. Практическая реализация предложенной системы мониторинга может включать в себя разработку прототипа пылемера, основанного на комбинировании турбидиметрического и нефелометрического методов, и его испытания в реальных условиях шахты. Полученные данные позволят оценить эффективность системы и внести необходимые корректировки в алгоритм обработки данных.

Список литературы • References

1. Tynchenko V.S., Tynchenko Y.A., Rogova D.V., Leonteva A.A., Seregin Y.N., Bocharov A.N. Energy distribution computation for induction soldered construction elements. *AIP Conference Proceedings*. 2023;(2700):070017. DOI: 10.1063/5.0125008.
2. Tananykhin D.S. Scientific and Methodological Support of Sand Management During Operation of Horizontal Wells. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2024;37(07):1395-407. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.17.
3. Podoprigora D.G., Byazrov R.R., Lagutina M.A., Arabov D.V., Galimov V.V., Ermolin D.S. A novel integrated methodology for screening, assessment and ranking of promising oilfields for polymer floods. *Advances in Geo-Energy Research*. 2024;12(1):8-21. DOI: 10.46690/ager.2024.04.02.
4. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Karlina A.I., Skiba V.Y. Study of Matrix and Rare Elements in Ash and Slag Waste of a Thermal Power Plant Concerning the Possibility of their Extraction. *Metallurgist.* 2022;65(11-12):1324-1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.
5. Volneikina E., Kukartseva O., Menshenin A., Tynchenko V., Degtyareva K. Simulation-Dynamic Modeling of Supply Chains Based on Big Data 2023. 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023. DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094168.
6. Moshynskyi V., Zhomyruk R., Vasylchuk O., Rysbekov K., Yelemessov K. Investigation of technogenic deposits of phosphogypsum dumps. *E3S Web of Conferences*. 2021;(280):08008. DOI: 10.1051/e3sconf/202128008008.
7. Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Bashmur K.A., Kondratiev V.V. To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):239-251. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_239.
8. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V., Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Technogenic Reservoirs Resources of Mine Methane When Implementing the Circular Waste Management Concept. *Resources*. 2024;13(2):33. DOI: 10.3390/resources13020033.
9. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2020;(7):629-648.
10. Podoprigora D., Korobov G., Bondarenko A. Acid stimulation technology for wells drilled the low-permeable high-temperature terrigenous reservoirs with high carbonate content. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. DOI: 10.2680-2696.
11. Myrzakulov M.K., Jumankulova S.K., Barmenshinova M.B., Martyushev N.V., Skeeba V.Y., Kondratiev V.V., Karlina A.I. Thermodynamic and Technological Studies of the Electric Smelting of Satpaevsk Ilmenite Concentrates. *Metals.* 2024;(14):1211. DOI: 10.3390/met14111211.
12. Podoprigora D.G., Sabukevich V.S., Korobov G.Y., Nguen V.T. Justification of Developed System Measures to Increase Productivity of Wells in Eastern Part of Pechora Sea Oil Field. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2303-2313. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.15.
13. Yelemessov K., Nauryzbayeva D., Bortebayev S., Baskanbayeva D., Chubenko V. Efficiency of application of fiber concrete as a material for manufacturing bodies of centrifugal pumps. *E3S Web of Conferences*. 2021;(280):07007. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007007.
14. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical, Field and Laboratory Data Analysis. *Resources*. 2021;(10):125. DOI: 10.3390/resources10120125.
15. Akzharkyn I., Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeeba V.Y., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Strengthening Polymer Concrete with Carbon and Basalt Fibres. *Appl. Sci.* 2024;(14):7567. DOI: 10.3390/app14177567.

Authors Information

Stupina A.A. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, e-mail: h677hm@gmail.com

Konyukhov V.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: konyukhov_vyu@mail.ru

Oparina T.A. – Senior Lecturer, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: tatianaop@ex.istu.edu

Mamirov Sh.Sh. – PhD, Head of the Department, Almalyk Branch of Islam Karimov Tashkent State Technical University, Almalyk, 110100, Uzbekistan, e-mail: wwer10240@gmail.com

Sattorov N.E. – PhD (Agricultural), Associate Professor, "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University, Tashkent, 100000, Uzbekistan, e-mail: n.sattarov1962@gmail.com

Kuziev A.U. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Termez State University, Termez, 190100, Uzbekistan, e-mail: quziyev@tersu.uz

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.04.2025
Поступила после рецензирования: 16.05.2025
Принята к публикации: 26.05.2025

Paper info

Received April 15, 2025
Reviewed May 16, 2025
Accepted May 26, 2025