

УДК 622.411,322.004:831.325 © С.М. Никитенко¹, А.Ю. Игнатова², В.С. Овсянникова³, В.И. Клишин¹, 2024

UDC 622.411,322.004:831.325 © S.M. Nikitenko¹, A.Yu. Ignatova², V.S. Ovsyannikova³, V.I. Klishin¹, 2024

¹ ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН), 650065, г. Кемерово, Россия

¹ Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation

² ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation

³ ФГБНУ «Институт химии нефти СО РАН», 634055, г. Томск, Россия
✉ e-mail: nsm.nis@mail.ru

³ Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055, Russian Federation
✉ e-mail: nsm.nis@mail.ru

Микробиологические аспекты дегазации угольных шахт*

Microbiological aspects of coal mine degassing

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11S-91-95>

В работе актуализируется проблема дегазации шахт с помощью биотехнологических методов. Один из способов, снижающих концентрацию метана, – это применение живых организмов, потребляющих метан, – метанооксиляющих бактерий. Приводятся сведения о видовом составе метанотрофных бактерий, встречающихся в природе, особенностях метаболических путей окисления метана микроорганизмами. Выявлены области применения метанооксиляющих бактерий в промышленности и сельском хозяйстве, для производства микробного белка для кормовой добавки домашнему скоту, в синтезе целевых соединений и дегазации угольных месторождений. Описаны опыт дегазации угольных шахт с использованием метанооксиляющих бактерий на шахтах Донбасса в 1980-х гг., технические и технологические особенности промышленной реализации такого подхода на действующих шахтах, состав и способы приготовления питательных сред, возможности транспортировки микробной биомассы к местам использования, перечислены примеры его успешного применения, эффективность таких мероприятий. Показаны преимущества микробиологической дегазации по сравнению с общепринятыми методами. Даны рекомендации к дальнейшим путям исследований и разработки. Необходима доработка технологии микробиологического окисления метана в шахтах в направлении увеличения скорости окисления метана, регуляции контроля за питанием метанотрофов, увеличения площади контакта микробиологической суспензии с метаном.

Ключевые слова: угольные пласты, метан, дегазация, метанотрофные бактерии, биотехнология.

Для цитирования: Микробиологические аспекты дегазации угольных шахт / С.М. Никитенко, А.Ю. Игнатова, В.С. Овсянникова и др. // Уголь. 2024;(11S): 91-95. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-91-95.

НИКИТЕНКО С.М.

Доктор экон. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории угольного машиноведения, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: nsm.nis@mail.ru

ИГНАТОВА А.Ю.

Канд. биол. наук, доцент кафедры аэрологии, охраны труда и природы, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: allaignatova@rambler.ru



НОЦ
КУЗБАСС –
ДОНБАСС

Научно-образовательный
центр «Кузбасс-Донбасс»

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191) и государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР № 121031500048-1).

ОВСЯННИКОВА В.С.

Канд. хим. наук,
старший научный сотрудник
лаборатории коллоидной
химии нефти ФГБУН «Институт
химии нефти СО РАН»,
634055, г. Томск, Россия,
e-mail: varja@ipc.tsc.ru

КЛИШИН В.И.

Доктор техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник
ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр
угля и углехимии
Сибирского отделения
Российской академии наук»,
650065, г. Кемерово, Россия

Abstract

The paper focuses on the issue of methane control in mine using biotechnological methods. One of the ways to reduce methane concentration is application of living organisms that consume methane, i.e. methane-oxidizing bacteria. Information is provided on the species composition of methanotrophic bacteria that occur in natural environment, as well as on the specific features of metabolic ways of methane oxidation by microorganisms. Areas of application of methane-oxidizing bacteria are identified in industry and agriculture, for production of microbial protein as a feed additive for livestock, in synthesis of the target compounds and methane control in coal mines. Experience of methane control using methane-oxidizing bacteria in the coal mines of Donbass in the 1980s is described as well as technical and technological features of industrial implementation of such approach at the operating mines together with the composition and methods of the nutrient media preparation, possibilities of the microbial biomass transportation to the places of utilization, examples of its successful application and the efficiency of such measures. Advantages of microbiological methane control are shown in comparison with the conventional methods of methane drainage. Recommendations for further ways of research and development are given. The technology of microbiological oxidation of methane in mines needs to be improved towards increasing the rate of methane oxidation, regulation of methanotrophs feeding control, increasing the area of contact of the microbial suspension with methane.

Keywords

Coal seams, methane, degassing, methanotrophic bacteria, biotechnology.

Acknowledgements

The research carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the integrated scientific and technical program of the full innovation cycle, approved by the Order of the Government of the Russian Federation as of 11.05.2022 № 1144-r (Agreement № 075-15-2022-1191).

For citation

Nikitenko S.M., Ignatova A.Yu., Ovsyannikova V.S., Klishin V.I. Microbiological aspects of coal mine degassing. *Ugol*. 2024;(115):91-95. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-91-95.

ВВЕДЕНИЕ

Метан (CH₄) – один из самых опасных «парниковых» газов, который является основной причиной глобального потепления. Он в 25 раз сильнее углекислого газа, способен удерживать тепло в атмосфере. Источники метана разнообразны и могут быть как естественного, так и антропогенного происхождения. Естественные источники метана включают в себя вулканическую деятельность, болота, океаны, живые организмы, выделяющие метан. Однако основной источник метана связан с человеческой деятельностью [1, 2].

На сегодняшний день проблема утилизации метана обострилась, поскольку в мире введены ограничения на выбросы CO₂.

Известно, что метан угольных пластов при концентрации в воздухе от 4,4 до 17% представляет опасность для жизни и здоровья шахтеров, поэтому для снижения его концентрации в шахтах используют различные способы дегазации [3, 4, 5]. Но, несмотря на принимаемые меры, проблема эффективной дегазации в шахтах остается нерешенной.

В процессе исследования авторами была изучена возможность применения метаноокисляющих бактерий для уменьшения содержания метана в условиях подземной добычи угля. Было отмечено мнение специалистов, что метан может выступать перспективным сырьем для современных биотехнологий [6, 7].

**МИКРООРГАНИЗМЫ-МЕТАНОТРОФЫ
И ИХ МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ**

Метанотрофные бактерии в качестве источника углерода могут утилизировать разные вещества – не только метан, но и другие C₁-соединения – мета-

нол, формальдегид и др. [8]. Метанотрофы известны уже более 100 лет. В настоящее время насчитывается порядка 18 родов культивируемых аэробных метанотрофных гаммапротеобактерий и 5 родов альфапротеобактерий, представленных приблизительно 60 различными видами [9]. Метилотрофы используют замещенные или окисленные производные метана, а метилотрофные дрожжи – метанол (рис. 1) [10].

Способность использовать метан метанотрофами в качестве субстрата для роста обусловлена выработкой ими ферментов – метанмонооксигеназ. Именно эта метаболическая особенность метанотрофов позволяет применять их в биотехнологических способах производства микробного белка и ряда целевых продуктов с добавленной стоимостью [11].

К метанотрофам, эффективно окисляющим метан, относятся *Methanomonas carbonatophila*, *Methanomonas methanooxidans*, *Methylococcus capsulatus*, *Pseudomonas propaneica*, *Pseudomonas methanica* и другие. При этом более эффективно выращивание смешанных культур указанных микроорганизмов по сравнению с чистыми.

Окисление метана происходит в несколько стадий, каждая из которых катализируется определенным ферментом (рис. 2). Углерод фиксируется на стадии углекислого газа или формальдегида. Метан окисляется до конечных продуктов – углекислого газа и воды, при этом образуются промежуточные метаболиты – формальдегид, формиат, метиловый спирт. Наличие фермента – метанмонооксигеназы, катализирующей начальный этап окисления метана в метанол, является ключевой особенностью метанотрофов. Окисление метана бактериями проходит в несколько стадий: метан – метанол – формальдегид – формиат – углекислый газ. Формальдегид может быть использован двумя способами: либо окислен для получения энергии через указанные промежуточные продукты, либо восстановлен и направлен на синтез биомассы.

Усвоение углерода из C_1 -соединений у метанотрофов может протекать по трем путям, в зависимости от организма: в сериновом цикле, через рибулозомонофосфат или в цикле Кальвина. Кроме того, метанотрофы могут также усваивать CO_2 в восстановительном пентозофосфатном цикле (цикле Кальвина) [11].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАНОТРОФОВ

Аэробные метано- и метилотрофы используются в технологических процессах для получения ферментов, аминокислот, биополимеров, пигментов, полисахаридов [10]. В СССР в середине 1980-х гг. производили кормовой белок «Гаприн», в Норвегии в 1998 г. начали получать кормовой белок «Biorprotein» с помощью культуры *Methylococcus capsulatus*. В качестве сопутствующих бактерий применили *Alcaligenes acidovorans*, *Bacillus firmus* и *Bacillus brevis* [10]. В состав биомассы аэробных метанотрофов входят незаменимые аминокислоты, что позволило организовать промышленное производство белковой добавки, которая по своему составу сопоставима с рыбной и соевой мукой.

В настоящее время исследуются особенности синтеза метанотрофами целевых продуктов – каротиноидов, полисахаридов и др., а также способности к деструкции



Рис. 1. Планетарная роль аэробных метанотрофов и метилотрофов в глобальных биосферных циклах метана и метанола

Fig. 1. The planetary role of aerobic methanotrophs and methylotrophs in the global biospheric methane and methanol cycles

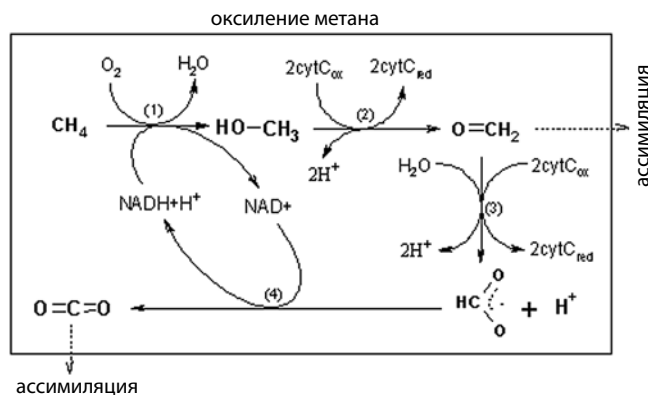


Рис. 2. Окисление метана

Fig. 2. Methane oxidation

хлорсодержащих углеводородов, что является ценным качеством при восстановлении загрязненных водоемов и почв [8, 12]. Исследование метаболического потенциала метанотрофов разных экосистем продолжают и в данное время [2]. Также ведутся исследования возможности биоконверсии метана как из природных, так и антропогенных источников (метантенков очистных сооружений) вместе с углекислым газом в жидкое топливо для повышения его теплотворной способности, облегчения хранения и транспортировки по сравнению с газами и снижения выбросов парниковых газов. В результате оценки стехиометрических, термодинамических и кинетических ограничений сделаны выводы о необходимости генно-инженерного подхода для реализации такого проекта. Из анализа установлено, что максимальные выходы углерода в продукте характерны для анаэробных путей окисления метана. Кроме того, перспективным будет сочетание анаэробного окисления метана с метаболическим путем Вуда-Льюнгаля – циклом биохимических реакций, характерным для некоторых анаэробных хемолитоавтотрофных бактерий и архей-метаногенов, который служил им для фиксации CO_2 и получения энергии [13].

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАНОТРОФОВ ДЛЯ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Метанооксиляющие бактерии могут усваивать метан в угольных пластах и выработанных пространствах [14].

Микробиологический способ окисления метана в угольном массиве был предложен в 1939 г. А.З. Юровским, а технологические регламенты его применения были разработаны в 1966 г. в Московском горном институте (МГИ). Микроорганизмы в виде суспензии с питательной средой нагнетали насосами через скважины, добываясь их проникновения в трещинное и поровое пространство. За счет утилизации метана внесенной микрофлорой была снижена газоносность пласта, за счет чего выход метана как из угольных пластов, так и из выработанных пространств в среднем уменьшился в два раза. Первое опытно-промышленное испытание метода было проведено в Донецком бассейне на шахте «Суходольская» № 2 в ходе подготовительной выработки по пласту [15]. В 1981-1988 гг. в шахтах Донбаса началось масштабирование и промышленное внедрение микробиологического метода дегазации выработанных пространств [15, 16].

Для приготовления суспензии используют минеральные компоненты, среда должна быть нейтральной, температура – 28-32°C [14, 17], концентрация кислорода в воздушной среде – от 15 до 45%.

Для наращивания биомассы метанотрофов в лабораторных условиях целесообразно использовать природный газ. Для приготовления питательной среды сначала готовят индивидуальные растворы минеральных солей определенной концентрации, затем дозируют растворы в отдельную емкость для смешивания, засевают ферментер культурами микроорганизмов, процесс – проточный, осуществляют непрерывную подачу раствора минеральных солей и фосфорной кислоты, раствора аммиака и газовую смесь, затем суспензию сепарируют, отделяя биомассу и отработанную культуральную жидкость.

Для транспортировки микроорганизмов температуру среды понижают до 2-4°C, при этом жизнедеятельность бактерий приостанавливается, и биомасса бактерий может сохраняться длительное время. Активность микроорганизмов-метанотрофов, исходя из объема поглощенного метана в единицу времени, составляет 0,11-0,99 м³/кг·ч [14].

В условиях горного предприятия для приготовления биологической массы микроорганизмов, используемой для подачи на пласт или породу, может быть применена шахтная вода. Подача подготовленной суспензии на обрушаемые породы привела к снижению газообильности участка с 8,75 до 6,61 м³/т, а концентрация метана в исходящей струе воздуха – с 0,9...1,0 до 0,66% [18].

В 1985 г. Московским горным институтом была предложена технология микробиологического окисления метана непосредственно из шахтного воздуха [15]. В данной технологии использованы стационарные и передвижные бионосители. Микробиологам известно, что иммобилизация микроорганизмов на носителях приводит к повышению их эффективности при поглощении загрязняющих веществ из сточных вод или отходящих газов. Эффективность биоокисления метана составила 85-95%.

Вопросы безопасности угольных шахт и поисков методов дегазации так или иначе вынуждают коллективы исследователей возвращаться к теме метанотрофной микрофлоры [14, 19, 20].

Так, с использованием лабораторного газозащитного био-реактора был исследован потенциал использования метанотрофной бактерии *Methylomonas methanica* для дегазации угольных шахт [21].

В Китае провели эксперименты в промышленных масштабах, позволившие снизить концентрацию метана за счет использования метанотрофных бактерий, что делает перспективным крупномасштабное использование микробных технологий контроля газа [22].

Многие научные коллективы кроме метанотрофов исследуют биотехнологический потенциал и других микроорганизмов – обитателей угольных пластов [23, 24, 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность потребления метана бактериями зависит от горно-геологических условий залегания угольного пласта, от численности микроорганизмов в нагнетаемой суспензии, активности и времени их жизнедеятельности.

По сравнению с традиционными методами дегазация угольных шахт с использованием бактерий имеет ряд преимуществ:

- снижаются затраты электроэнергии на микробиологическое окисление;
- способствует ресурсосбережению (нет необходимости использовать металл на прокладку дегазационных газопроводов);
- снижается концентрация метана, выделяемого в атмосферу.

Направлением для дальнейших исследований является поиск способов повышения скорости и полноты окисления метана, возможно, за счет контроля питания метанотрофных микроорганизмов – добавления биогенных элементов, а также путем увеличения площади контакта бактерий с окисляемым субстратом. Кроме того, есть перспективы при комбинировании биологических и традиционных способов дегазации шахт.

Список литературы • References

1. Akberdin I.R., Thompson M., Hamilton R. et al. Methane utilization in *Methylomicrobium alcaliphilum* 20ZR: a systems approach. *Sci. Rep.* 2018;8(1):2512.
2. Havelsrud O.E., Haverkamp T.H.A., Kristensen T. et al. A metagenomic study of methanotrophic microorganisms in Coal Oil Point seep sediments. *BMC microbiology.* 2011;(11):221.
3. Wang Gang, Qin Xiangjie, Han Dongyang, Liu Zhiyuan. Study on seepage and deformation characteristics of coal microstructure by 3D reconstruction of CT images at high temperatures. *International Journal of Mining Science and Technology.* (Shandong University of Science and Technology). 2021. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.11.003.
4. Wang Gang, Li Yanqing, Wang Enmao, Huang Qiming, Wang Shibin, Li Huaixing. Experimental study on preparation of nanoparticle-surfactant nanofluids and their effects on coal surface wettability. *International Journal of Mining Science and Technology* (Shandong University of Science and Technology). 2021. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.12.007.

5. Wang Gang, Huang Tengyao, Yan Song, Liu Xuelin. Experimental study of the fracturing-wetting effect of VES fracturing fluid for the coal seam water injection. *Journal of Molecular Liquids* (Shandong University of Science and Technology). 2019. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111715.
6. Guo X., Guangzong Fang, Gang Li, Hao Ma, Hongjun Fan, Liang Yu, Chao Ma, Xing Wu, Dehui Deng, Mingming Wei, Dali Tan, Rui Si, Shuo Zhang, Jianqi Li, Litao Sun, Zichao Tang, Xiulian Pan, Xinhe Bao. Direct, Nonoxidative Conversion of Methane to Ethylene, Aromatics, and Hydrogen. *Science*. 2014;344(6184):616-619.
7. Li K., Ronghou Liu, Chen Sun. A review of methane production from agricultural residues in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;(54):857-865.
8. Bowman J. The methanotrophs – the families Methylococcaceae and Methylocystaceae. *Prokaryotes*. New York: Springer. 2006;(5):266-289.
9. Orata F.D., Meier-Kolthoff J.P., Sauvageau D., Stein L.Y. Phylogenomic Analysis of the Gammaproteobacterial Methanotrophs (Order Methylococcales) Calls for the Reclassification of Members at the Genus and Species Levels". *Frontiers in Microbiology*. 2018;(9):3162.
10. Троценко Ю.А., Торгонская М.Л. Аэробные метилотрофы – перспективные объекты современной биотехнологии // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2012. Т. 3. № 5. С. 243-279.
Trotsenko Yu.A., Torgonskaya M.L. Aerobic methylotrophs – promising objects of modern biotechnology. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya*. 2012;3(5):243-279. (In Russ.).
11. Редактирование геномов метанотрофных бактерий: возможные мишени и доступный инструментарий / В.Н. Хмеленина, С.Ю. Бут, О.Н. Розова и др. // Микробиология. 2022. Т. 91. № 6. С. 647-665.
Khmelenina V.N., But S.Yu., Rozova O.N., Oshkin I.Yu., Pimenov N.V., Dedysh S.N. Genome editing in methanotrophic bacteria: potential targets and available tools. *Mikrobiologiya*. 2022;91(6):647-665. (In Russ.).
12. Bodrossy L., Kovacs K.L. Methane utilizing bacteria and their biotechnological applications. *Indian J. Experim. Biol.* 1994:443-449.
13. Aversch N.J.H., Kracke F. Metabolic Network Analysis of Microbial Methane Utilization for Biomass Formation and Upgrading to Bio-Fuels. *Frontiers in Energy Research*. 2018;(6):106.
14. Васючков Ю.Ф. Биотехнология управления метановыделением в шахтах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 4. С. 168-179.
Vasyuchkov Yu.F. Biotechnology of managing methane emission in mines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(4):168-179. (In Russ.).
15. Васючков Ю.Ф. Совершенствование управления метановыделением в очистных забоях микробиологическими способами. М.: ЦНЭИуголь, 1989. 37 с.
16. Мякенький В.И. Обоснование микробиологического способа снижения метанообильности выработанного пространства // Уголь Украины. 1983. № 12.
Myakenykiy V.I. Justification of microbiological method to reduce methane content of mined-out spaces. *Ugol' Ukrainy*. 1983;(12). (In Russ.).
17. Малашенко Ю.Р., Романовская В.А., Троценко Ю.А. Метанооксиляющие микроорганизмы. М.: Наука. 1987. 197 с.
18. Высоцкий С.П., Гулько С.Е. Экологические риски при эксплуатации и закрытии угольных шахт // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. Вып. 5. С. 18-25.
Vysotsky S.P., Gulko S.E. Environmental risks in the operation and closure of coal mines. *Vestnik Donbasskoj natsional'noj akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2017;(5):18-25. (In Russ.).
19. Комплексная технология применения бактерий для снижения выбросов шахтного метана в атмосферу / Е.А. Воробьев, В.Б. Демченко, А.П. Петух и др. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. 2006. № 2(3). С.133-141.
Vorobyev E.A., Demchenko V.B., Petukh A.P., Sofyiskiy K.K. Complex technology of bacteria application to reduce mine methane emissions into the atmosphere. *Visti Avtomobil'no-dorozhn'ogo institutu*. 2006;(2):133-141. (In Russ.).
20. Куприянов С.А. К вопросу разработки биотехнологической дегазации угольных месторождений / Материалы IX междунауч. конф. «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». 15.04.2020. С. 1-5.
21. William A. Apel, Patrick R. Dugan, Michelle R. Wiebe. Use of methanotrophic bacteria in gas phase bioreactors to abate methane in coal mine atmospheres. *Fuel*. 1991;70(8):1001-1003.
22. Jian Xin Tang, Fei Mao, Ze Jing Guo, Jiao Jiao Peng. Study on Gas Control in Coal Mine by Methanotrophic Bacteria M02. *Advanced Materials Research Vols*. 2012;(December):602-604.
23. Wolinska A., Pytlak A., Stepniewska Z., Kuzniar A., Piasecki C. Identification of Methanotrophic Bacteria Community in the Jastrzebie-Moszczonca Coal Mine by Fluorescence in situ Hybridization and PCR Techniques. *Pol. J. Environ. Stud*. 2013;22(1):275-282.
24. Ma S, Zong Q. Exploration and application of microbial method to enhance the effect of hydraulic fracturing on coal seam permeability enhancement and gas extraction. *Energy Exploration & Exploitation*. 2024;42(3):837-855.
25. Saryglar Ch.A., Chysyma R.B. Biotechnological method of coal processing: directions and prospects. *Journal Advances in current natural sciences*. 2019;12(1):186-191.

Authors Information

Nikitenko S.M. – Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Coal Engineering, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: nsm.nis@mail.ru

Ignatova A.Yu. – PhD (Biological), Associate Professor, Department of Aerology, Labor Protection and Nature, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: allaignatova@rambler.ru

Ovsyannikova V.S. – PhD (Chemical), Senior Researcher, Laboratory of Petroleum Colloidal Chemistry, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055, Russian Federation, e-mail: varja@ipc.tsc.ru

Klishin V.I. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024