

УДК 620.197.5+ 57.087.1+ 57.033
EDN: QBZHKY

PACS: 68.90.+g, 43.80.-n

Биоцидные свойства двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода© В. Я. Печеркин^{1*}, Л. М. Василяк¹, Е. А. Дешева², Н. Д. Новиков¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

* E-mail: vpcherkin@yandex.ru

² Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, 123007 РоссияСтатья поступила в редакцию 5.03.2026; после доработки 23.04.2026; принята к публикации 5.06.2026
Шифр научной специальности: 2.2.12; 2.6.6

*Проведены лабораторные испытания биоцидных свойств образцов из нержавеющей стали с защитным нанослоем из линейно-цепочечного углерода различных модификаций в условиях замкнутого объема воздуха при атмосферном давлении, влажности 100 % и комнатной температуре. Покрытия проявляли бактериостатическую активность к спорообразующим грамположительным бактериям вида *Bacillus pumilus*, не позволяющую данным микроорганизмам размножаться. В отношении вегетативных форм грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* все испытанные образцы проявляли бактерицидную активность, выражающуюся в практически полном подавлении их жизнеспособности на всех видах покрытий. В отношении грибов только один вид покрытия, допированный атомами лития, обладал антифунгальными свойствами, когда наблюдалось полное отсутствие роста грибов и отсутствие жизнеспособных единиц микромицетов.*

Ключевые слова: двумерно-упорядоченный линейно-цепочечный углерод, защитный нанослой, нержавеющая сталь, микромицеты, бактерии.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-91-97

Введение

В настоящее время углерод и новые композитные материалы на его основе представляют большой практический и научный интерес для всех отраслей деятельности человека. Долгое время активно исследовались только две аллотропные модификации углерода – графит и алмаз. В настоящее время хорошо изучены и описаны политипы алмаза и графита [1–3]. Если рассматривать алмаз – пространственный полимер углерода – как предельный случай парафинового ряда, а графит – плоскостной полимер – как предельный случай ароматического ряда, то далее логически предположить, что следующая форма будет представлять собою предельный случай ненасыщенного ряда, которую можно представить как линейный полимер, молекулы ко-

торого построены из полииновых либо из кулуеновых цепочек [4]. Возможность существования линейных полимеров углерода с *sp*-гибридизацией рассматривал еще в 1885 г. Байер. Он пытался осуществить синтез цепочечного углерода – полиина. Попытки получить одномерные нити полиина из тетраацетилена оказались неудачными из-за неустойчивости тетраацетилена [5]. В итоге продолжительных исследований Байер постулировал невозможность получения линейно-цепочечного углерода. Работы в этом направлении надолго прекратились. Однако, в 1960 г. в Институте элементоорганических соединений РАН (ИНЭОС) им. А. Н. Несмеянова была открыта третья кристаллическая аллотропная форма углерода, названная авторами карбин [6]. В дальнейшем были разработаны различные методы получения карбина [5, 7, 8, 9]. Следу-

ющим шагом стала модификация свойств поверхности при создании на ней тонких углеродных пленок либо слоистых пленочных структур, толщина которых может быть от микрон до долей микрона. Ориентацией цепочек молекул углерода можно управлять в процессе выращивания структур [10–12]. Такие пленочные структуры служат основой для построения элементной базы современной микро- и нано-электроники. Тонкие пленки могут выполнять и функциональные задачи упрочнения поверхности, изменения ее смачиваемости, коэффициента трения и др. При осаждении на поверхность твердого тела атомы углерода могут образовывать различные аллотропные модификации, отличающиеся типом гибридизации: sp^3 и sp^2 – этим типам соответствуют устойчивые модификации алмаз и графит; sp^1 и sp^0 – это метастабильные модификации линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) и гранецентрированного (ГЦК) углерода). При конденсации на поверхности цепочки сшиваются, образуя графитоподобный конденсат. При определенных условиях конденсации углеродных паров на поверхности могут образовываться пленки двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУ ЛЦУ), состоящие из линейных углеродных цепочек, ориентированных нормально к поверхности и образующих упорядоченные ансамбли [10–12]. ДУ ЛЦУ пленки – это упорядоченные ансамбли квантовых нитей, располагающиеся на расстоянии $0,4 \div 0,5$ нм и потому слабо взаимодействующие друг с другом и обладающие уникальными электрофизическими свойствами. Встраивание дополнительных атомов в углеродные цепочки или сшивание цепочки полимерных молекул линейного углерода позволяет изменять как их физические свойства, так и биологическую активность.

Биомедицинские исследования с имплантатами с покрытиями линейно-цепочечного углерода показали отсутствие денатурации белков на его поверхности и исключительно низкий потенциал свертывания крови. Нанесение покрытий из ДУ ЛЦУ на поверхность придает ей исключительную тромборезистентность и позволяет улучшить биосовместимость медицинских имплантантов и устройств, уменьшает риск образования тромбов, отторжения имплантанта, развития воспаления [13]. Исследования также показали,

что карбин в виде нанопорошков обладает биоцидным действием на микроорганизмы различных видов, в частности на представителей аутомикрофлоры человека и условно патогенные микроорганизмы [14].

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных по влиянию покрытий из различных модификаций ДУ ЛЦУ на жизнеспособность микроорганизмов в воздухе при атмосферном давлении, влажности 100 % и комнатной температуре.

Экспериментальная часть

Для исследований были изготовлены 16 образцов из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с размерами $50 \times 25 \times 1$ мм. На поверхности 12 образцов ионно-плазменным методом синтезировался слой двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУ ЛЦУ) толщиной примерно 200 нм [10]. На поверхность 4 образцов слой наносился в присутствии водорода в остаточной атмосфере (ДУ ЛЦУ + H), на 4 образца слой наносился в присутствии азота (ДУ ЛЦУ + N), на 4 образцах слой был допирован атомами лития в инертной атмосфере (ДУ ЛЦУ + Li) и 4 образца использовались в качестве контрольных без покрытия. Испытания биоцидных свойств изготовленных образцов проводили с использованием представителей бактериальной и грибной флоры. В качестве бактериальных тест-культур использовали представителей грамтрицательной флоры – бактерии вида *Pseudomonas aeruginosa* и спорообразующие грамположительные палочки вида *Bacillus pumilus*, а в качестве культур микромицетов следующие виды грибов Всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ): *Aspergillus niger van Tieghem* – ВКМ F – 1119; *Aspergillus terreus Thom* ВКМ F-1025; *Aspergillus oryzae (Ahlburg) Cohn* ВКМ F – 55; *Chaetomium globosum Kunze* ВКМ F – 109; *Paecilomyces varioti Bainier* ВКМ F – 378; *Penicillium funiculosum Thom* ВКМ F – 1115; *Penicillium chrysogenum Thom* ВКМ F – 245; *Penicillium cyclopium Westling* ВКМ F – 265; *Trichoderma viride Pers. ex Fr.* ВКМ F – 426. На два образца из каждой группы наносились микрокапли подготовленной бактериальной суспензии с количеством бактерий от 1×10^6 до 4×10^6 КОЕ. На два образца из каждой группы

наносились капли суспензии спор грибов. Суспензия приготавливалась путем смешивания суспензий каждого вида грибов в равных частях. Далее все образцы с нанесенной суспензией помещались в замкнутый герметичный объем с атмосферным давлением воздуха при комнатной температуре и влажности 100 %. Для создания герметичного объема использовалась камера из нержавеющей стали с внутренним радиусом 60 мм и высотой 140 мм (рис. 1). В камеру помещались исследуемые образцы, которые устанавливались на алюминиевый держатель в форме этажерки. Для создания требуемой влажности газовой среды в верхней части держателя было изготовлено углубление объемом 2 см³, которое наполнялось дистиллированной водой (рис. 1). Продолжительность испытаний для бактериальных культур составляла 14 суток, для культур грибов – 28 суток.

После завершения бактериальных испытаний образцы подвергались микробиологическому анализу для выявления различий в количественном уровне жизнеспособных микроорганизмов на опытных и контрольных образцах. Анализы проводились по стандартным методикам [15]. Результаты исследований ан-

тимикробных свойств образцов с различными типами покрытий представлены в таблице 1.

В таблице 1 видно, что на незащищенных образцах из нержавеющей стали находилось около 4×10² КОЕ/образец микроорганизмов вида *Pseudomonas aeruginosa*, а на защищенных обнаруживались лишь единичные клетки (от 0 до 9), что соответствовало 97,75 % до 100 % эффективности защиты. Сравнительные испытания защищенных и незащищенных образцов из стали показывают, что спорообразующие микроорганизмы вида *Bacillus pumilus* сохраняют свою жизнеспособность, но ни в одном случае не отмечено увеличение их количественного уровня выше, чем на контрольных образцах.

По окончании микологических испытаний образцы материалов осматривались в рассеянном свете при десятикратном увеличении с помощью стереомикроскопа Stemi 2000. Грибостойкость оценивали по интенсивности развития грибов на образцах по 6-балльной шкале по ГОСТ 9.048-75 [16], приведенной в таблице 2. В таблице 3 представлены результаты осмотра поверхности образцов в баллах согласно таблице 2.

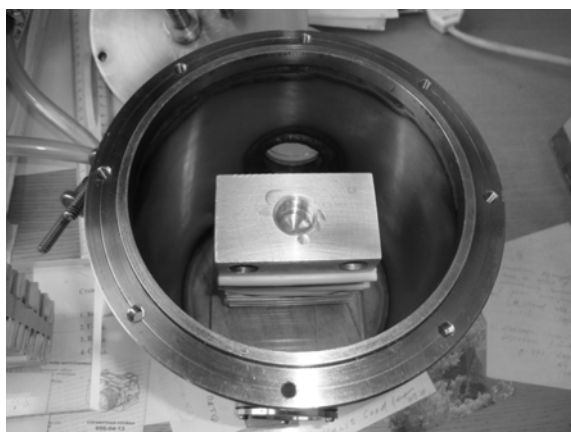


Рис. 1. Камера с установленным держателем. Вид сверху

Таблица 1

Результаты испытаний антимикробных свойств покрытий в отношении грамотрицательных микроорганизмов вида *Pseudomonas aeruginosa* и *Bacillus pumilus*

Образец и тип покрытия	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , КОЕ/образец	<i>Bacillus pumilus</i> , КОЕ/образец
Нержавеющая сталь (контроль)	4,0×10 ²	6,0×10 ⁴
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + Н	0–9	3,6×10 ⁴
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ +N	0–8	3,0×10 ⁴
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + Li	0	4,5×10 ⁴

Таблица 2

Оценка роста грибов

Балл	Характеристика балла
0	При осмотре под микроскопом рост плесневых грибов не виден
1	При осмотре под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий в виде неветвящихся гиф
2	При осмотре под микроскопом виден мицелий в виде ветвящихся гиф и спороношение
3	При осмотре невооруженным глазом рост грибов едва виден, но отчетливо виден под микроскопом
4	При осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих менее 25 % испытываемой поверхности
5	При осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих более 25 % испытываемой поверхности

Таблица 3

Оценка роста грибов на поверхности образцов после экспонирования

Материал	Степень развития плесневых грибов в баллах	Оценка образцов
Нержавеющая сталь (контроль)	2	В газовой среде есть химические соединения, используемые грибами для незначительного развития
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + N	2–3	В газовой среде и в покрытиях есть химические соединения, используемые грибами для большего роста, чем в контроле
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + N	2–3	В газовой среде и в покрытиях есть химические соединения, используемые грибами для большего роста, чем в контроле
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + Li	0	На поверхности материала нанесено покрытие, препятствующее росту грибов

Как видно из представленных данных, в состав воздушной среды входят соединения, которые микромицеты способны использовать для своего конструктивного обмена. Это подтверждается ростом микромицетов на контрольных образцах. На исследуемых покрытиях отмечался рост грибов в виде ветвящихся гиф и слабого спороношения (рис. 2). Исключением являлись образцы нержавеющей стали с покрытием ДУ ЛЦУ + Li, на которых рост грибов не обнаружен (рис. 3). После посева смыва с этих образцов жизнеспособных единиц микромицетов не было обнаружено. Таким образом, по результатам проведенных микробиологических испытаний только покрытие, нанесенное на подложку из нержавеющей стали и состоящее из ДУ ЛЦУ, допированного атомами лития, обладало антифунгальными свойствами.

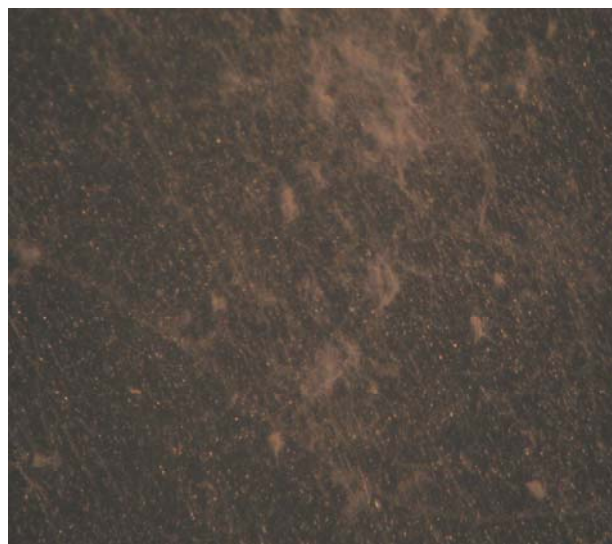


Рис. 2. Поверхность образца с нанесенным слоем ДУ ЛЦУ + N после испытаний. Наблюдается рост грибов. Увеличение – $\times 10$



Рис. 3. Поверхность образца с нанесенным слоем ДУ ЛЦУ + Li после испытаний. Не наблюдается рост грибов. Увеличение – $\times 10$

Заключение

В отношении вегетативных форм грамотрицательных микроорганизмов *Pseudomonas aeruginosa* испытанные все образцы нанопокрывтий ДУ ЛЦУ проявляли бактерицидную активность, выражающуюся в практически полном подавлении их жизнеспособности. В отношении спорообразующих грамположительных бактерий вида *Bacillus pumilus* покрытия проявляли бактериостатическую активность, не позволяющую данным микроорганизмам размножаться и увеличивать численность на защищенных образцах. По результатам проведенных микробиологических испытаний в отношении грибов один вид покрытия ДУ ЛЦУ + Li обладал антифунгальными свойствами, когда наблюдалось полное отсутствие роста грибов и отсутствие жизнеспособных единиц микромицетов. Для остальных образцов наблюдался незначительный рост грибов по сравнению с контрольными образцами.

Покрывтия ДУ ЛЦУ нанометровой толщины являются перспективными для предотвращения роста грибов и подавления бактерий. Различие в биологических свойствах защитных нанопокрывтий двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода требует дальнейшего исследования свойств поверхности и механизма подавления жизнедеятельности микроорганизмов.

Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (Государственное задание
№ 075-00270-26-00; Соглашение 075-03-2025-045,
тема FMFR -2024-0035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумилова Т. Г. Алмаз, графит, карбин, фуллерен и другие модификации углерода. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002.
2. Романенко А. В., Симонов П. А. Углеродные материалы и их физико-химические свойства / под общей ред. д.т.н., проф. А. С. Носкова. – М.: Калвис, 2007.
3. Сладкова Т. А. Исследование углерода – успехи и проблемы (отв. ред. Ю. Н. Бубнов. Ин-т элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН). – М.: Наука, 2007.
4. Сладков А. М. Карбин – третья аллотропная форма углерода (отв. ред. Ю. М. Бубнов). – М.: Наука, 2003.
5. Кулакова И. И. / Химия. 2007. № 13. С. 731.
6. Сладков А. М., Касаточкин В. И., Коршак В. В., Кудрявцев Ю. П. / Бюлл. изобрет. 1972. № 6.
7. Btao Pan, Jun Xiao, Jiling Li, Pu Liu, Chengxin Wang, Guowei Yang / Sci. Adv. 2015. Vol. 1 (9). P. 1:e1500857.
8. Бабаев В. Г., Гусева М. Б., Новиков Н. Д., Савченко Н. Ф., Хвостов В. В. / Нанотехнологии: Разработка, применение. 2010. Т. 2. № 1. С. 88–95.
9. Гарнов С. В., Абрамов Д. В., Бухаров Д. Н., Худайберганов Т. А., Хорьков К. С., Осипов А. В., Журнова С. В., Кучерик А. О., Аракелян С. М. / УФН. 2024. Т. 194. № 2. С. 138–168.
10. Коцаков В. Д., Новиков Н. Д., Яблоков М. Ю., Ерёмкин А. В., Васильев А. И. / Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 12. С. 11–15.
11. Бабаев В. Г., Новиков Н. Д., Гусева М. Б., Хвостов В. В., Савченко Н. Ф., Коробова Ю. Г., Александров А. Ф. / Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2010. Т. 2. № 1. С. 53.
12. Новиков Н. Д., Василяк С. Л., Баркова М. И., Яненко Ю. Б. / Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 167–175.
13. Бабаев В. Г., Гусева М. Б., Савченко Н. Ф., Новиков Н. Д., Хвостов В. В., Флад П. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 3. С. 16.
14. Поликарпов Н. А., Новикова Н. Д., Вальяно Г. Е., Василяк Л. М., Климовский И. И., Печеркин В. Я., Добринский Э. К., Малашин С. И. / Авиакосмическая и экологическая медицина. 2010. № 6. С. 53.
15. Руководство по медицинской микробиологии. Кн. 1: Общая санитарная микробиология / под ред. А. С. Лабинской, Е. Г. Волиной. – М.: БИНОМ, 2008.
16. ГОСТ 9.048-75. Материалы и изделия. Методы испытаний на микробиологическую устойчивость. – М.: Издательство стандартов, 1978.

Bactericidal properties of two-dimensional ordered linear-chain carbon

V. Ya. Pecherkin^{1*}, L. M. Vasilyak¹, E. A. Deshevaya², and N. D. Novikov

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

* E-mail: vpecherkin@yandex.ru

² Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, 123007 Russia

Received 5.03.2026; revised 23.04.2026; accepted 5.06.2026

Laboratory tests of the bactericidal properties of stainless steel samples with a protective nanolayer of linear-chain carbon of various modifications were carried out in a closed volume of air at atmospheric pressure, 100 % humidity and room temperature. After testing, it was shown that with respect to spore-forming gram-positive bacteria of the *Bacillus pumilus* species, the coatings showed bacteriostatic activity, which did not allow these microorganisms to multiply, and with respect to vegetative forms of Gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, all tested samples showed bactericidal activity, expressed in almost complete suppression of their viability on all types of coatings. For fungi, only one type of coating doped with lithium atoms had antifungal properties when there was a complete absence of fungal growth and the absence of viable micromycete units. For the remaining samples, there was a slight growth of fungi compared to the control samples.

Keywords: stainless steel, two-dimensionally ordered linear-chain carbon, protective nanolayer, micromycetes, bacteria.

REFERENCES

1. Shumilova T. G. Diamond, graphite, carbine, fullerene and other carbon modifications. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002.
2. Romanenko A. V. and Simonov P. A. Carbon materials and their physico-chemical properties, Under the general editorship of Dr. of Technical Sciences, professor A. S. Noskova. Moscow: Kalvis, 2007.
3. Sladkova T. A. Carbon research – successes and problems / Ed. by Yu. N. Bubnov. In-t elementorgan. A. N. Nesmeyanov Compounds of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka Publ., 2007.
4. Sladkov A. M. Carbine is the third allotropic form of carbon / Ed. by Yu. M. Bubnov. Moscow: Nauka, 2003.
5. Kulakova I. I., Chemistry, № 13, 731 (2007) [in Russian].
6. Sladkov A. M., Kasatochkin V. I., Korshak V. V., and Kudryavtsev Yu. P., Byull. invent., № 6, (1972) [in Russian].
7. Bitao Pan, Jun Xiao, Jiling Li, Pu Liu, Chengxin Wang, and Guowei Yang, Sci. Adv. **1** (9), 1:e1500857 (2015).
8. Babaev V. G., Guseva M. B., Novikov N. D., Savchenko N. F., and Khvostov V. V., Nanotechnology: Development, application **2** (1), 88–95 (2010) [in Russian].
9. Garnov S. V., Abramov D. V., Bukharov D. N., Khudaiberganov T. A., Khor'kov K. S., Osipov A. V., Zhirnova S. V., Kucherik A. O., and Arakelyan S. M., Physics Uspekhi, **67** (2), 109 (2024).
10. Kochakov V. D., Novikov N. D., Yablokov M. Yu., Eremkin A. V., and Vasiliev A. I., Actual problems of humanities and natural sciences, № 12, 11 (2009) [in Russian].
11. Babaev V. G., Novikov N. D., Guseva M. B., Khvostov V. V., Savchenko N. F., Korobova Yu. G., and Alexandrov A. F., Nanotechnology: development, application – XXI century **2** (1), 53 (2010) [in Russian].
12. Novikov N. D., Vasilyak S. L., Barkova M. I., and Yanenko Yu. B., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **8** (3), 167–175 (2020) [in Russian].
13. Babaev V. G., Guseva M. B., Savchenko N. F., Novikov N. D., Khvostov V. V., and Flood P., Surface. X-ray, synchrotron, and neutron studies, № 3, 16 (2004) [in Russian].
14. Polikarpov N. A., Novikova N. D., Vallano G. E., Vasilyak L. M., Klimovsky I. I., Pecherkin V. Ya., Dobrinsky E. K., and Malashin S. I., Aerospace and environmental medicine, № 6, 53 (2010) [in Russian].

15. A guide to medical microbiology. Book 1: General sanitary microbiology / ed. by A. S. Labinskaya, E. G. Volina. Moscow: BINOM, 2008.
16. GOST 9.048-75. Materials and products. Methods of testing for microbiological resistance. Moscow: Publishing House of Standards, 1978.

Об авторах

Печеркин Владимир Яковлевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vpcherkin@yandex.ru SPIN-код: 4910-0417, AuthorID: 1089774

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599

Дешевая Елена Андреевна, к.б.н., ведущий научный сотрудник, Институт медико-биологических проблем РАН (123007, Россия, Москва, Хорошевское шоссе, 76 а). E-mail: deshevaya@imbp.ru SPIN-код: 3206-9869, AuthorID: 126892

Новиков Николай Дмитриевич, к.ф.-м.н. E-mail: nick.d.nov@mail.ru AuthorID: 138271