

УДК 539.216.2:544.77

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-103-114>



Модифицированные наночастицами нитрида бора полиамидные ткани

И.В. Локтионова^{1✉}, П.В. Абакумов², А.П. Кузьменко¹, А.И. Колпаков¹
Е.А. Новиков¹, В.А. Мамонтов¹, Л.П. Петрова¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Курский государственный медицинский университет
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование характеристик полиамидной ткани, модифицированной наночастицами нитрида бора, и оценка её фильтрационных свойств.

Методы. Спектры комбинационного рассеяния света измерялись на сканирующем рамановском микроспектрометре OmegaScore AIST-NT в ZXXZ геометрии ($\lambda = 532$ нм, $W = 25$ мВт, спектральное разрешение 3 см⁻¹). Кристаллическая структура изучалась на рентгеновском дифрактометре GBC EMMА (Cu K α , схема Брегга – Брентано, шаг $0,02^\circ$). Изучение фильтрационных свойств полиамидной ткани проводилось на спектрофотометре СФ 2000 в спектральном диапазоне 450–750 нм. Моделирование взаимодействия модифицированной полиамидной ткани с молекулами неорганического раствора было произведено в программном пакете Materials Studio 2020 с модулем Forcite.

Результаты. На спектрах комбинационного рассеяния и рентгеновских дифрактограммах ткани, модифицированной наночастицами нитрида бора, были выявлены пики в области 1360 см⁻¹ и $2\theta = 27,32$. Размер областей когерентного рассеяния составил $0,65$ нм, что соответствует удвоенному межплоскостному расстоянию нитрида бора. Изменение оптической плотности фильтра через ткань составило $\Delta D = 0,04$, что соответствует увеличению прозрачности на $9,6\%$. Квантово-механическое моделирование показало, что между молекулами гидроксида железа и тканью действуют ван-дер-ваальсовы силы, а между гидроксидом железа и наночастицами нитрида бора – химические связи.

Заключение. Модификация полиамидной ткани методом Ленгмюра – Блоджетт приводит к более интенсивному спектральному профилю для упорядоченных покрытий, а метод погружения с ультразвуковым диспергированием подходит для объемных покрытий, позволяя наночастицам проникать внутрь структуры ткани. Эти результаты подтверждаются рентгеновской дифрактометрией. Также показана эффективность нитрида бора в улучшении сорбционных характеристик полиамидной ткани.

Ключевые слова: наночастицы; нитрид бора; полиамидная ткань; фильтры.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Модифицированные наночастицами нитрида бора полиамидные ткани / И.В. Локтионова, П.В. Абакумов, А.П. Кузьменко, А.И. Колпаков, Е.А. Новиков, В.А. Мамонтов, Л.П. Петрова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 103–114. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-103-114>

Поступила в редакцию 28.10.2024

Подписана в печать 25.11.2024

Опубликована 13.12.2024

Modified with Boron nitride nanoparticles on polyamide fabrics

Inna V. Loktionova^{1✉}, Pavel V. Abakumov², Alexandr P. Kuzmenko¹,
Artem I. Kolpakov¹, Evgeniy A. Novikov¹, Vladimir A. Mamontov¹,
Ludmila P. Petrova¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Kursk State Medical University
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Abstract

Purpose. Investigation of the characteristics of polyamide fabric modified with Boron nitride nanoparticles and evaluation of its filtration properties.

Methods. The Raman scattering spectra were measured using a scanning Raman microspectrometer OmegaScope AIST-NT in ZXXZ geometry ($\lambda = 532$ nm, $W = 25$ mW) with a spectral resolution of 3 cm⁻¹. The crystalline structure was studied using X-ray diffraction on a GBC EMMA diffractometer (Bragg-Brentano scheme, $\lambda = 0.154$ nm, step size 0.02°). The filtration properties of the polyamide fabric were investigated using an SF-2000 spectrophotometer in the spectral range of 450–750 nm. The modeling of the interaction between the modified polyamide fabric and inorganic solution molecules was carried out using the Materials Studio 2020 software package with the Forcite module.

Results. In the spectra of Raman scattering and X-ray diffraction patterns of fabric modified with Boron nitride nanoparticles, peaks were identified at 1360 cm⁻¹ and $2\theta = 27.32$. The size of the coherent scattering regions was 0.65 nm, which corresponds to the doubled interlayer spacing of Boron nitride. The change in optical density of the filtrate through the fabric was $\Delta D = 0.04$, corresponding to a 9.6% increase in transparency. Quantum-mechanical modeling showed that van der Waals forces act between the iron hydroxide molecules and the fabric, while chemical bonds exist between the Iron hydroxide and the Boron nitride nanoparticles.

Conclusion. Modification of polyamide fabric using the Langmuir-Blodgett method results in a more intense spectral profile for ordered coatings, while the immersion method with ultrasonic dispersion is suitable for bulk coatings, allowing nanoparticles to penetrate the fabric structure. These results are confirmed by X-ray diffractometry. The effectiveness of Boron nitride in improving the adsorption characteristics of polyamide fabric is also demonstrated.

Keywords: nanoparticles; Boron nitride; polyamide fabric; filters.

Funding: The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" Southwest State University.

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Loktionova I.V., Abakumov P.V., Kuzmenko A.P., Kolpakov A.I., Novikov E.A., Mamontov V.A., Petrova L.P. Modified with Boron nitride nanoparticles on polyamide fabrics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):103–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-103-114>

Received 28.10.2024

Accepted 25.11.2024

Published 13.12.2024

Введение

В контексте получения фильтров с высокими эксплуатационными характеристиками исследование двумерных материалов представляется наиболее перспективным. К таким материалам можно отнести графен [1], графитовый нитрид углерода [2], халькогениды переходных металлов [3], гексагональный нитрид бора

(*h*-BN) [4] и др. Несмотря на малую толщину названные материалы обладают достаточно высокой механической прочностью, что уже нашло своё применение в различных сепараторах. Так, в работе [5] сообщается о высокой степени опреснения воды с помощью гибридной мембраны из графена и углеродных нанотрубок. Исследование [6] показало, что для

тех же целей можно использовать и молекулярный разделитель на основе дисульфида молибдена. Наконец, работа [7] также продемонстрировала возможность изготовления молекулярного разделителя с высокой стабильностью, хорошей водопроницаемостью и эффективной сепарацией на основе оксида графена.

Вместе с тем использование двумерных материалов сопряжено с определёнными трудностями, например, загрязнением молекулярного разделителя длинноцепочечными органическими соединениями. Примечательно, что композитная мембрана с *h*-BN продемонстрировала хорошую устойчивость к такого рода загрязнениям [8]. Это объясняется тем, что гексагональный нитрид бора химически инертен к таким взаимодействиям, а его термическая стабильность позволяет проводить высокотемпературный отжиг мембраны для удаления горючих органических веществ без разрушения самой мембраны [9]. Более того, уже разработаны и апробированы методики формирования в монослоях *h*-BN нанопор [10] и нанощелей [11] атомарных размеров, однако механизм транспортировки вещества через отверстия подобного рода требует дальнейших исследований.

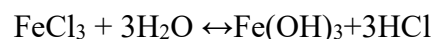
В производстве фильтров и мембран, используемых для очистки жидких и газообразных сред, особенно значима роль полиамидных материалов [12]. Однако традиционные полиамидные фильтрующие материалы могут демонстрировать ограниченные характеристики по селективности, устойчивости к загрязнению и долговечности, что снижает их эффективность при использовании в сложных условиях эксплуатации. В связи с этим исследование методов модификации поверхности полиамидной ткани становится актуальной задачей для повышения ее функциональных свойств и долговечности. В работе исследуется полиамидная ткань с интегрированными в нее наночастицами нитрида бора, полученная методами

Ленгмюра – Блоджетт и погружением в водный раствор нитрида бора с ультразвуковым диспергированием.

Материалы и методы

В работе исследуется полиамидная ткань PA 6 с осажденными на нее коммерческими наночастицами нитрида бора двумя способами: методом Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) на установке KSV Nima 2002 [13] из коллоидного раствора стабилизированных стеариновой кислотой наночастиц [14] – PA6/BN SA LB и водного раствора порошка BN с замасливателем под воздействием ультразвукового диспергирования [15] – PA6/BN+УЗД. Факт закрепления наночастиц нитрида бора на полиамидных волокнах исследовался на сканирующем рамановском микроспектрометре OmegaScope AIST-NT в ZXXZ геометрии ($\lambda = 532$ нм, $W = 25$ мВт) и методом рентгеновской дифракции на дифрактометре GBC EMMА (Cu K α , по схеме Брегга – Брентано, $\lambda = 0,154$ нм, шаг $0,02^\circ$).

Для анализа эффективности фильтрационных свойств полиамидной ткани с интегрированными наночастицами стабилизированного стеариновой кислотой BN применялся спектрофотометр СФ-2000 со стандартными кварцевыми кюветами в спектральном диапазоне 450–750 нм. Проводился двухэтапный процесс фильтрации коллоидного раствора гидроксида железа Fe(OH) $_3$. На первом этапе фиксировались параметры оптической плотности раствора после прохождения через чистую полиамидную ткань, а на втором этапе – через ткань с нанесенными наночастицами BN. Золь гидроксида железа синтезировался методом конденсации согласно реакции полного гидролиза:



Гидроксид железа – универсальное соединение для моделирования природных процессов и изучения особенностей

взаимодействия с частицами в фильтрующем материале. Моделирование таких процессов было произведено в программном пакете Materials Studio 2020 с модулем Forcite.

Результаты и их обсуждение

В спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) полиамидной ткани с наночастицами нитрида бора содержится линия 1360 см^{-1} , соответствующая B–N колебаниям и характерная для гексагональных наночастиц нитрида бора пластинчатой формы, возбуждение которой обусловлено межплоскостными сдвигами колебаниями между ними [16].

Интенсивность линии 1360 см^{-1} в спектре КРС от PA6/BN SA при осажде-

нии наночастиц BN на ткань методом ЛБ выше, чем от PA6/BN (рис. 1). Метод Ленгмюра – Блоджетт позволяет формировать более регулярные структуры BN на полиамидной ткани, что способствует усилению сигнала характерной линии гексагонального нитрида бора. При погружении полиамидной ткани в раствор BN с ультразвуковым диспергированием наночастицы могут проникать в структуру ткани и покрывать поверхность неоднородно. Помимо этого, ультразвук способствует лучшему диспергированию BN, что может приводить к образованию кластеров наночастиц на ткани. В спектре КРС это проявляется в виде уширения полосы линии 1360 см^{-1} , связанных с агрегатами BN.

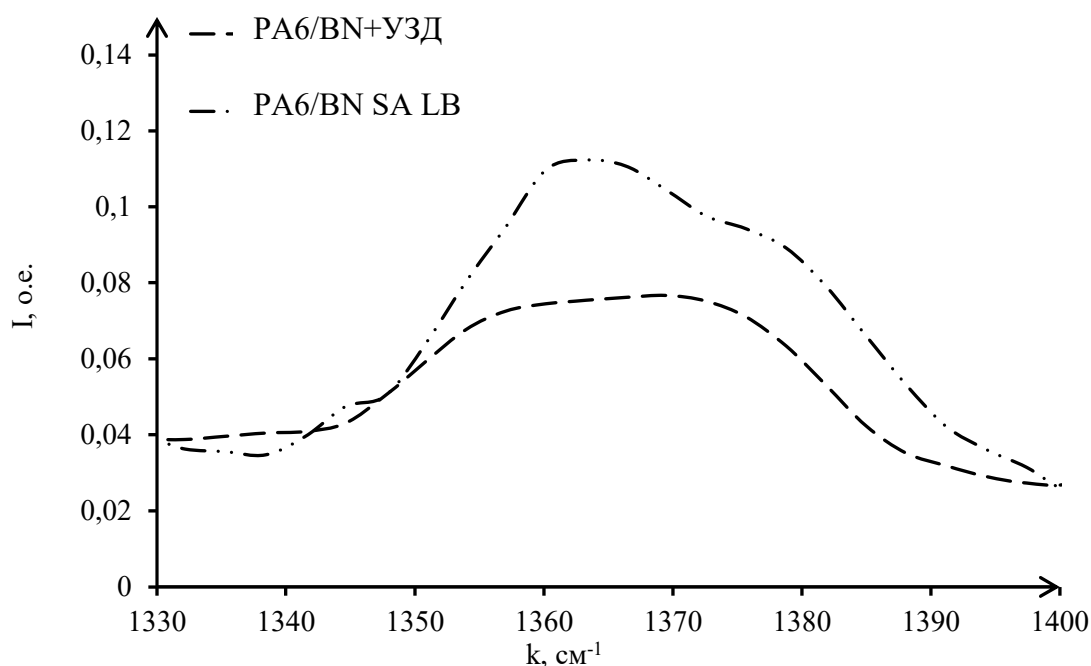


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света полиамидной ткани с нанесенными различными способами наночастицами нитрида бора в области характерной для него спектральной линии

Fig. 1. Raman spectra of polyamide fabric with Boron nitride nanoparticles applied in various ways in the region of its characteristic spectral line

Полиамиды имеют поликристаллическую структуру. В связи с этим на дифрактограмме проявляется аморфное гало, которое отражает аморфные области полимера, а также несколько низкоинтенсив-

ных пиков, соответствующих кристаллическим областям. При этом наиболее характерными являются пики на значениях углов $2\theta = 20^\circ$ и 24° [17].

На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы образцов PA6/BN SA LB и PA6/BN+УЗД. В области малых углов пик $2\theta = 27,32^\circ$ соответствовал наиболее характерной и самой интенсивной линии для гексагональной фазы BN в плоскости (002). Рассчитанный по этой линии по формуле Дебая – Шеррера $L = 0,9\lambda/(\beta\cos\theta)$ размер области когерентности для длины волны используемого рентгеновского излучения меди K_α $\lambda = 0,1541$ нм и с учетом ее ширины по

уровню $0,5$ $\beta = 0,24^\circ$ составлял $0,65$ нм независимо от способов нанесения. Рассчитанная величина L совпала с удвоенным межплоскостным расстоянием кристаллической структуры BN $0,33$ нм [18]. Это дополнительно подтверждает закрепление на полиамидной ткани наночастиц BN, в том числе с гексагональной кристаллической структурой. Из-за малого размера наночастиц возможно уширение их дифракционных пиков, что отражает эффект Шеррера, связанный с размером кристаллитов.

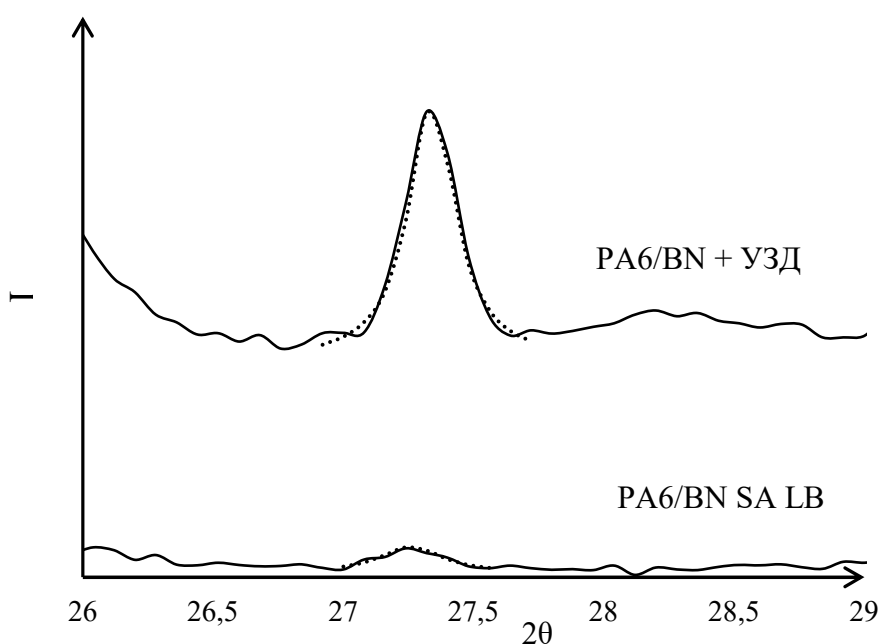


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов полиамидной ткани с закрепленными различными способами наночастицами нитрида бора

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of polyamide fabric samples with boron nitride nanoparticles fixed in various ways

Интенсивность дифракционной линии PA6/BN SA LB значительно ниже, чем у композита PA6/BN + УЗД. Из-за малой толщины ленгмюровской пленки (семь нанесенных слоев) объем нитрида бора, участвующего в дифракции, невелик, что снижает интенсивность рассеянного излучения. Помимо этого, при использовании УЗД наночастицы нитрида бора закрепляются и вглубь волокон, что способствует усилению сигнала.

В ходе исследования были детально изучены фильтрационные характеристики композита PA6/BN SA LB. В качестве фильтрата был выбран гидроксид железа, который часто присутствует в природных водах и может оказывать значительное влияние на пористые среды. $\text{Fe}(\text{OH})_3$ обладает способностью к адсорбции различных веществ, также он легко выпадает в осадок, образуя коллоидные частицы, позволяя отслеживать процесс фильтрации и

накопление осадков в порах фильтра. Представляя собой мелкодисперсный материал, он используется для изучения феномена коллоидного засорения – накопления частиц в порах, которое может снижать проницаемость фильтрующего материала и его способность к самоочищению [19]. Полученные экспериментальные данные фильтрации $\text{Fe}(\text{OH})_3$ через немодифицированную и модифицированную ткань продемонстрировали минимальные различия оптической плотности D в край-

них участках спектра (рис. 3). Однако в среднем диапазоне наблюдалось значительное изменение величины оптической плотности, достигавшее $\Delta D = 0,04$, что соответствовало увеличению прозрачности раствора на 9,6%. Эти результаты свидетельствуют о более высокой фильтрационной способности полиамидной ткани, модифицированной стабилизированными наночастицами нитрида бора, по сравнению с чистой тканью.

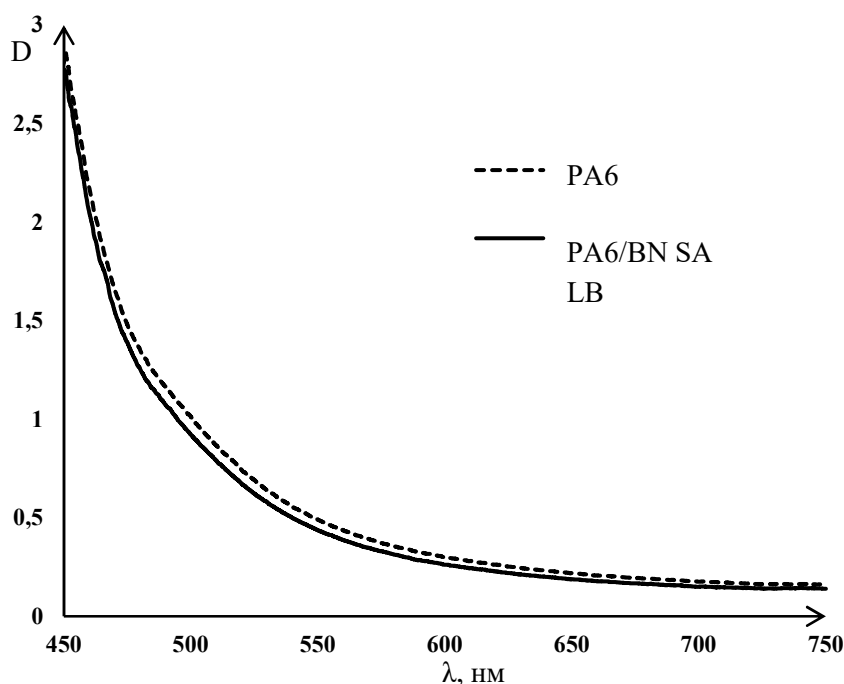


Рис. 3. Спектры оптической плотности коллоидного раствора $\text{Fe}(\text{OH})_3$ после его фильтрации

Fig. 3. Optical density spectra of a colloidal solution of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ after its filtration

Данные выводы подтверждаются квантово-механическим *ab-initio* моделированием. На представленных результатах (рис. 4) видно, что между молекулами $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и фрагментом чистой полиамидной ткани не формируются водородные связи, что указывает на наличие исключительно ван-дер-ваальсовых взаимодействий, значительно уступающих по энергии химическим связям [20].

В то же время моделирование взаимодействия молекул $\text{Fe}(\text{OH})_3$ со стабилизированными наночастицами гексагонального нитрида бора выявило формирование прочных химических связей в двух возможных конфигурациях. В первом случае наблюдалось одновременное взаимодействие $\text{Fe}(\text{OH})_3$ с молекулой стеариновой кислоты, использованной для стабилизации наночастиц, и с атомами бора и азота, что возможно только вблизи поверхности

наночастицы. Во втором случае связь устанавливалась между свободным хвостом молекулы стеариновой кислоты (рис. 5). Этот вариативный характер взаимодействия обеспечивал повышенную ад-

сорбцию молекул гидроксида железа на поверхности полиамидных волокон, модифицированных наночастицами нитрида бора.

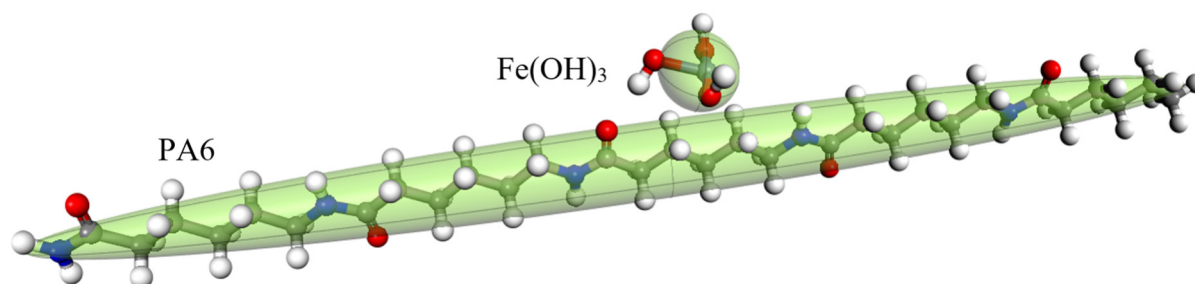


Рис. 4. Квантово-механическое моделирование взаимодействия молекул полиамида и гидроксида железа

Fig. 4. Quantum-mechanical modeling of the interaction of polyamide and iron hydroxide molecules

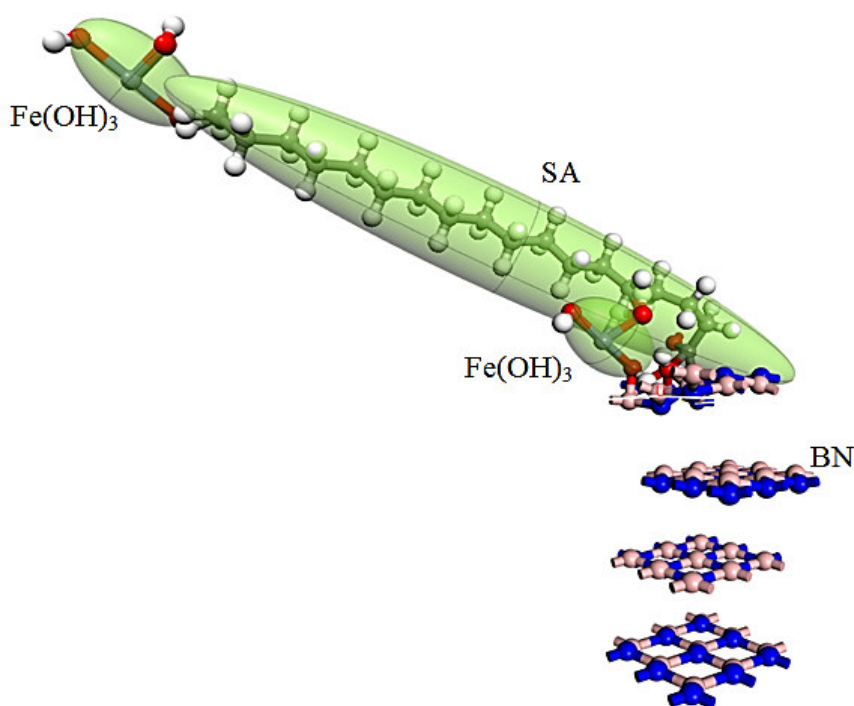


Рис. 5. Квантово-механическое моделирование взаимодействия молекул: стеариновой кислотой, нитрида бора и гидроксида железа

Fig. 5. Quantum-mechanical modeling of the interaction of molecules: stearic acid, boron nitride and iron hydroxide

Таким образом, результаты моделирования и экспериментальных данных указывают на заметное улучшение адсорбционных и фильтрационных свойств полиамидной ткани при использовании

наночастиц нитрида бора в качестве модификатора, что открывает перспективы для разработки высокоэффективных фильтрующих материалов.

Выводы

В результате проведенного исследования была проанализирована структура и свойства полиамидной ткани, модифицированной наночастицами нитрида бора, для применения в качестве фильтрующего материала. Спектры КРС полиамидной ткани с BN демонстрируют значительные различия в зависимости от метода осаждения. Метод ЛБ обеспечивает более интенсивный спектральный профиль линии 1360 см^{-1} , подходящий для случаев, когда требуется упорядоченное покрытие наночастицами. Метод погружения в раствор с ультразвуковым диспергированием удобен для более крупных покрытий с более низкими требованиями к регулярности получаемых покрытий, но с возможностью

проникновения BN внутрь тканевой структуры. Рентгеновский дифракционный анализ показал характерные для гексагонального BN пики $2\theta = 27,32^\circ$, подтверждая сохранение его кристаллической структуры после осаждения на полиамидную ткань всеми методами. Спектрофотометрия раствора гидроксида железа, прошедших через модифицированную ткань, показала увеличение прозрачности раствора на 9,6% по сравнению с фильтрацией через немодифицированную ткань. Это указывает на улучшенные фильтрационные свойства модифицированной ткани и подтверждает эффективность наночастиц нитрида бора в усилении сорбционных характеристик материала.

Список литературы

1. Ares P., Novoselov K.S. Recent advances in graphene and other 2D Materials // *Nano Materials Science*. 2022. Vol. 4, is. 1. P. 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.05.002>
2. Xie K., Fang J., Li L., Deng J., Chen F. Progress of graphite Carbon nitride with different dimensions in the photocatalytic degradation of dyes: A review // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 901. P. 163589. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163589>
3. Noh Y., Aluru N.R. Ion transport in two-dimensional flexible nanoporous membranes // *Nanoscale*. 2023. Vol. 15, is. 26. P. 11090–11098. <https://doi.org/10.1039/D3NR00875D>
4. High-performance and ultra-robust triboelectric nanogenerator based on hBN nanosheets/PVDF composite membranes for wind energy harvesting / K. Zhao, Z. Gao, J. Zhou [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 500. P. 156709. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156709>
5. Large-area graphene-nanomesh/carbon-nanotube hybrid membranes for ionic and molecular nanofiltration / Y.B. Yang, X.D. Yang, L. Liang, Y.Y. Gao, H.Y. Cheng, X.M. Li, [et al.] // *Science*. 2019. Vol. 364. P. 1057–1062. <https://doi.org/10.1126/science.aau5321>
6. Experimental realization of few layer two-dimensional MoS_2 membranes of near atomic thickness for high efficiency water desalination / H. Li, T.J. Ko, M. Lee, H.S. Chung, S.S. Han, K.H. Oh [et al.] // *Nano Letters*. 2019. Vol. 19. P. 5194–5204. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b01577>
7. Highly stable graphene-oxide-based membranes with superior permeability / K.H. Thebo, X.T. Qian, Q. Zhang, L. Chen, H.M. Cheng, W.C. Ren // *Nature Communications*. 2018. No. 9. P. 1486. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03919-0>
8. Evolution of nanopores in hexagonal Boron nitride / C. Dai, D. Popple, C. Su, J.H. Park, K. Watanabe, T. Taniguchi, [et al.] // *Communications chemistry*. 2023. Vol. 6, is. 1. P. 108. <https://doi.org/10.1038/s42004-023-00899-1>
9. Naclerio A.E., Kidambi P.R. A review of scalable hexagonal Boron nitride (hBN) synthesis for present and future applications // *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, is. 6. P. 2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>

10. Single layer hexagonal boron nitride nanopores as high performance ionic gradient power generators / T.R. Liu, M.Y. Fung, L.H. Yeh, C.H. Chiang, J.S. Yang, P.C. Kuo [et al.] // *Small*. 2024. Vol. 20, is. 16. P. 2306018. <https://doi.org/10.1002/sml.202306018>.
11. Extending plasmonic enhancement limit with blocked electron tunneling by monolayer hexagonal Boron nitride / S. Chen, P. Li, C. Zhang, W. Wu, G. Zhou, C. Zhang [et al.] // *Nano Letters*. 2023. Vol. 23, is. 12. P. 5445–5452. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c00404>
12. Rist M., Greiner A. Bio-based electrospun polyamide membrane-sustainable multipurpose filter membranes for microplastic filtration // *RSC Applied Polymers*. 2024. Vol. 2. P. 642–655. <https://doi.org/10.1039/D3LP00201B>
13. Controllable-assembled functional monolayers by the Langmuir–Blodgett technique for optoelectronic applications / L. Heng, Y. Zheng, C. Zhong, L. Lin, K. Yang, Y. Liu [et al.] // *Journal of Materials Chemistry*. 2024. Vol. 12. P. 1177–1210. <https://doi.org/10.1039/D3TC03591C>
14. Кинетика коллоидной системы стабилизированного нитрида бора на водной субфазе / И.В. Локтионова, А.П. Кузьменко, А.И. Жакин, В.М. Емельянов, П.В. Абакумов, Ю.А. Неручев [и др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 211–223. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>
15. Способ нанесения наночастиц гексагонального нитрида бора на поверхность филаментов синтетических волокон: пат. 2822287 Рос. Федерация, МПК D06M 11/80, B82Y 30/00 / Емельянов С.Г., Кузьменко А.П., Пугачевский М.А. [и др.]. № 2023128754; заявл. 07.11.2023; опубл. 03.07.2024, Бюл. № 19. 17 с.
16. Spectroscopic and microscopic evidence of 2D Boron nitride nanoflake interaction with doxorubicin / O. Gnatyuk, Г.И. Довбешко, A. Dementjev, K. Chernyakova, O. Yu. Posudievsky, I.M. Kupchak [et al.] // *Optical Materials: X*. 2024. Vol. 22. P. 100323 <https://doi.org/10.1016/j.omx.2024.100323>
17. Coated electrospun polyamide-6/chitosan scaffold with hydroxyapatite for bone tissue engineering / Xiaolian Niu, Miao Qin, Mengjie Xu, Liqin Zhao, Yan Wei, Yinchun Hu [et al.] // *Biomedical Materials*. 2021. Vol. 16. P. 025014. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/abd68a>
18. Lahkar S., Kolan M.R. Spectroscopic and microscopic characterization of hexagonal Boron nitride /ed. by K. Deshmukh, M. Pandey, C.M. Hussain // *Hexagonal Boron Nitride: Synthesis, Properties, and Applications*. Elsevier, 2024. P. 179–202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18843-5.00018-5>
19. Liu S., Shikhov I., Arns C. Mechanisms of pore-clogging using a high-resolution CFD-DEM colloid transport model // *Transport in Porous Media*. 2024. Vol. 151. P. 831–851. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02072-1>
20. Echeverría J., Alvarez S. The borderless world of chemical bonding across the van der Waals crust and the valence region // *Chemical Science*. 2023. Vol. 14(42). P. 11647–11688. <https://doi.org/10.1039/D3SC02238B>

References

1. Ares P., Novoselov K. S. Recent advances in graphene and other 2D Materials. *Nano Materials Science*. 2022;4(1):3-9. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.05.002>
2. Xie K., Fang J., Li L., Deng J., Chen F. Progress of graphite carbon nitride with different dimensions in the photocatalytic degradation of dyes: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022; 901:163589. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163589>
3. Noh Y., Aluru N. R. Ion transport in two-dimensional flexible nanoporous membranes. *Nanoscale*. 2023;15 (26):11090-11098. <https://doi.org/10.1039/D3NR00875D>
4. Zhao K., Gao Z., Zhou J., Ye Y., Zhang J., Zhang C., et al. High-performance and ultra-robust triboelectric nanogenerator based on hBN nanosheets/PVDF composite membranes for wind energy

harvesting. *Chemical Engineering Journal*. 2024;500:156709. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156709>

5. Yang Y. B., Yang X. D., Liang L., Gao Y. Y., Cheng H. Y., Li X. M., et al. Large-area graphene-nanomesh/carbon-nanotube hybrid membranes for ionic and molecular nanofiltration. *Science*. 2019; 364:1057–1062. <https://doi.org/10.1126/science.aau5321>

6. Li H., Ko T.J., Lee M., Chung H.S., Han S.S., Oh K.H., et al. Experimental realization of few layer two-dimensional MoS₂ membranes of near atomic thickness for high efficiency water desalination. *Nano Letters*. 2019;19:5194-5204. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b01577>

7. Thebo K.H., Qian X.T., Zhang Q., Chen L., Cheng H.M., Ren W.C. Highly stable graphene-oxide-based membranes with superior permeability. *Nature Communications*. 2018;(9):1486. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03919-0>

8. Dai C., Popple D., Su C., Park J.H., Watanabe K., Taniguchi T., et al. Evolution of nanopores in hexagonal boron nitride. *Communications chemistry*. 2023;6(1):108. <https://doi.org/10.1038/s42004-023-00899-1>

9. Naclerio A.E., Kidambi P.R. A review of scalable hexagonal boron nitride (h BN) synthesis for present and future applications. *Advanced Materials*. 2023;35(6):2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>

10. Liu T.R., Fung M.Y.T., Yeh L.H., Chiang C.H., Yang J.S., Kuo P. C., et al. Single layer hexagonal Boron nitride nanopores as high performance ionic gradient power generators. *Small*. 2024;20(16):2306018. <https://doi.org/10.1002/sml.202306018>

11. Chen S., Li P., Zhang C., Wu W., Zhou G., Zhang C., et al. Extending plasmonic enhancement limit with blocked electron tunneling by monolayer hexagonal Boron nitride. *Nano Letters*. 2023; 23(12): 5445-5452. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c00404>

12. Rist M., Greiner A. Bio-based electrospun polyamide membrane–sustainable multipurpose filter membranes for microplastic filtration. *RSC Applied Polymers*. 2024;2:642-655. <https://doi.org/10.1039/D3LP00201B>

13. Lin H., Zheng Y., Zhong C., Lin L., Yang K., Liu Y., et al. Controllable-assembled functional monolayers by the Langmuir–Blodgett technique for optoelectronic applications. *Journal of Materials Chemistry*. 2024;12:1177-1210. <https://doi.org/10.1039/D3TC03591C>

14. Loktionova I.V., Kuzmenko A.P., Zhakin A.I., Emelianov V.M., Abakumov P.V., Neruchev Yu.A. Kinetics of a colloidal system of stabilized Boron nitride on an aqueous subphase. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(3):211–223. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>

15. Method for applying hexagonal boron nitride nanoparticles to the surface of synthetic fiber filaments. Russian Federation patent 2822287. 3 June 2024. (In Russ.)

16. Gnatyuk O., Dovbeshko G.I., Dementjev A., Chernyakova A.K., Posudievsky O.Yu., Kupchaket I.M., et al. Spectroscopic and microscopic evidence of 2D Boron nitride nanoflake interaction with doxorubicin. *Optical Materials: X*. 2024;22:100323. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2024.100323>

17. Niu X., Qin M., Xu M., Zhao L., Wei Y., Y. Hu, et al. Coated electrospun polyamide-6/chitosan scaffold with hydroxyapatite for bone tissue engineering. *Biomedical Materials*. 2021;16:025014. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/abd68a>

18. Lahkar S., Kolan M.R. Spectroscopic and microscopic characterization of hexagonal Boron nitride. In: Deshmukh K., Pandey M., Hussain C. M. (eds.) *Hexagonal Boron Nitride: Synthesis, Properties, and Applications*. Elsevier; 2024. P. 179–202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18843-5.00018-5>

19. Liu S., Shikhov I., Arns C. Mechanisms of pore-clogging using a high-resolution CFD-DEM colloid transport model. *Transport in Porous Media*. 2024;151:831-851. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02072-1>

20. Echeverría J., Alvarez S. The borderless world of chemical bonding across the van der Waals crust and the valence region. *Chemical Science*. 2023;14(42):11647-11688. <https://doi.org/10.1039/D3SC02238B>

Информация об авторах / Information about the Authors

Локтионова Инна Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

Inna V. Loktionova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

Абакумов Павел Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, информатики и математики, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1055-4019

Pavel V. Abakumov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Physics, Informatics and Mathematics Department, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1055-4019

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Колпаков Артем Игоревич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru, ORCID: 0009-0004-8571-8544

Artem Ig. Kolpakov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru, ORCID: 0009-0004-8571-8544

Новиков Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: novikov.2403@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8824-1540

Evgeniy A. Novikov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Teacher of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: novikov.2403@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8824-1540

Мамонтов Владимир Александрович, преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0592-3851

Петрова Людмила Павловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: luci78@mail.ru, ORCID: 0009-0007-8883-5983

Vladimir A. Mamontov, Lecturer of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0592-3851

Ludmila P. Petrova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: luci78@mail.ru, ORCID: 0009-0007-8883-5983