

## Оригинальная статья / Original article

УДК 548.75:539.216.2:544.77

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-65-75>

## Процесс испарения коллоидного раствора стабилизированных наночастиц нитрида бора

И. В. Локтионова<sup>1</sup>✉, П. В. Абакумов<sup>2</sup>, А. П. Кузьменко<sup>1</sup>, А. И. Колпаков<sup>1</sup>

<sup>3</sup> Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Курский государственный медицинский университет

ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

### Резюме

**Цель.** Характеризация химической структуры наночастиц нитрида бора по ИК-спектроскопии в процессе испарения их коллоидной системы и их размеров методом малоуглового рентгеновского рассеяния.

**Методы.** Процесс испарения растворителей из коллоидной системы изучался на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet iS 50 в среднем ИК-диапазоне ( $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ ) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазным кристаллом (угол падения  $45^\circ$ ) и жидкостной ячейкой (200 мкл).

Размеры коллоидных частиц определялись на дифрактометре малоуглового рентгеновского рассеяния в режиме линейной коллимации (разрешение  $0,03\text{ нм}^{-1}$ , рентгеновская трубка с медным антикатодом 2,2 кВт,  $\lambda = 0,154\text{ нм}$ , время экспозиции 30 с).

**Результаты.** Измерен ИК-спектр порошка наночастиц нитрида бора, который содержит линии, характерные для кубической ( $952\text{ см}^{-1}$ ) c-BN и гексагональных кристаллических ( $758$ ,  $1301$  и  $1372\text{ см}^{-1}$ ) h-BN фаз. Средние размеры наночастиц нитрида бора в коллоидной системе после ультразвуковой обработки составили по данным малоуглового рентгеновского рассеяния 46 и 84 нм при размерах стеариновой кислоты, выступающей в качестве стабилизирующей оболочки 0,8, 1,3 и 2,5 нм. Анализ ИК-спектров подтвердил полное испарение растворителей (гексана и хлороформа) из капли коллоидной системы толщиной 1,2 мм в течение 30 минут.

**Заключение.** В работе определены средние размеры стабилизированных стеариновой кислотой наночастиц нитрида бора в коллоидной системе и изучен процесс ее испарения.

**Ключевые слова:** нитрид бора; стеариновая кислота; испарение; ИК-спектроскопия; малоугловое рентгеновское рассеяние.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (г/з № 0851-2020-0035) и в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

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

**Для цитирования:** Процесс испарения коллоидного раствора стабилизированных наночастиц нитрида бора / И. В. Локтионова, П. В. Абакумов, А. П. Кузьменко, А. И. Колпаков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 65–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-65-75>

Поступила в редакцию 02.08.2023

Подписана в печать 30.08.2024

Опубликована 24.09.2024

## The process of evaporation of a colloidal solution of stabilized Boron nitride nanoparticles

Inna V. Loktionova<sup>1✉</sup>, Pavel V. Abakumov<sup>2</sup>, Alexandr P. Kuzmenko<sup>1</sup>,  
Artem I. Kolpakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Kursk State Medical University  
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

### Abstract

**Purpose.** Characterization of the chemical structure of boron nitride nanoparticles by IR spectroscopy during the evaporation of their colloidal system and their sizes by small-angle X-ray scattering.

**Methods.** The solvent evaporation process from the colloidal system was studied using a Nicolet iS 50 FT-IR spectrometer in the mid-IR range ( $400 - 4000\text{ cm}^{-1}$ ), with an attenuated total reflectance accessory with a diamond crystal (incident angle of  $45^\circ$ ) and a liquid cell ( $200\text{ }\mu\text{L}$ ). The sizes of the colloidal particles were determined using an small-angle X-ray scattering diffractometer in linear collimation mode (resolution  $0.03\text{ nm}^{-1}$ , copper anode X-ray tube  $2.2\text{ kW}$ ,  $\lambda = 0.154\text{ nm}$ , exposure time  $30\text{ s}$ ).

**Results.** The IR spectrum of boron nitride nanoparticles powder was measured, containing lines characteristic of cubic ( $952\text{ cm}^{-1}$ ) – c-BN and hexagonal crystalline phases ( $758$ ,  $1301$ , and  $1372\text{ cm}^{-1}$ ) – h-BN. The average size of boron nitride nanoparticles in the colloidal system, according to small-angle X-ray scattering data, was  $46$  and  $84\text{ nm}$ . The size of stearic acid, which acts as a stabilizing shell, was  $0.8$ ,  $1.3$ , and  $2.5\text{ nm}$ . Analysis of the IR spectra showed complete evaporation of the solvents (hexane and chloroform) from a drop of colloidal solution  $1.2\text{ mm}$  thick within  $30$  minutes.

**Conclusion.** In this work, the average sizes of boron nitride nanoparticles stabilized with stearic acid in a colloidal system were determined and the process of its evaporation was studied.

**Keywords:** boron nitride; stearic acid; evaporation; IR spectroscopy; small-angle X-ray scattering.

**Funding:** This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0851-2020-0035) and within the framework of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075-15-2021-1213).

**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. The process of evaporation of a colloidal solution of stabilized Boron nitride nanoparticles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2024;14(3):65–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-65-75>

Received 02.08.2024

Accepted 30.08.2024

Published 24.09.2024

\*\*\*

### Введение

В последние годы интерес к двумерным материалам, которые обладают уникальными физическими и химическими свойствами, значительно возрос [1]. Одним из наиболее перспективных среди них является нитрид бора BN, получивший название «белый графен» из-за своего внешнего сходства с графеном – материа-

лом, который уже давно привлекает внимание ученых своими выдающимися характеристиками [2]. Нитрид бора является неорганическим материалом, который обладает высокой термической и химической стойкостью, твердостью, низким коэффициентом трения и высокой теплопроводностью [3]. Однако для практических применений нитрида бора необходимо модифицировать его поверхность.

Присоединение различных функциональных групп посредством ковалентных или нековалентных связей способны значительным образом влиять на структуру и эксплуатационные свойства нитрида бора. Ковалентная модификация обычно сопровождается появлением дефектов и пустот в слоях BN, в то время как нековалентная способна сохранить сопряженную структуру, присущую BN [4]. Самая распространенная модификация гидроксильными группами –ОН, к которой в дальнейшем могут присоединяться другие функционалы, получая более сложные соединения нитрида бора. Гидроксирование сильно влияет на ширину запрещенной зоны, уменьшая ее с 3,0 эВ при полном гидрировании BN до 2,24 эВ при полугидрировании [5]. В работе [6] авторы предлагают экономичную одноэтапную методологию функционализации BN с помощью ультразвукового воздействия в водной среде глицином  $\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$ , аминогруппа которого связывается с нитридом бора, карбоксильная группа глицина обеспечивает межслоевое взаимодействие с матрицей. Добавление поверхностно-активных веществ улучшает диспергирование, термическое сопротивление [7], стабильность [8] и многие другие параметры нитрида бора [9]. В данной работе поверхность наночастиц BN стабилизировалась карбоксильными группами –COOH стеариновой кислоты.

## Материалы и методы

Коммерческий порошок наночастиц нитрида бора, предварительно растворенный в хлороформе, стабилизировался путем модификации его поверхности гидрофильными группами стеариновой кислоты, растворенной в гексане и последующей обработкой коллоидной системы в ультразвуковой ванне в течение 5 минут при мощности 30 Вт.

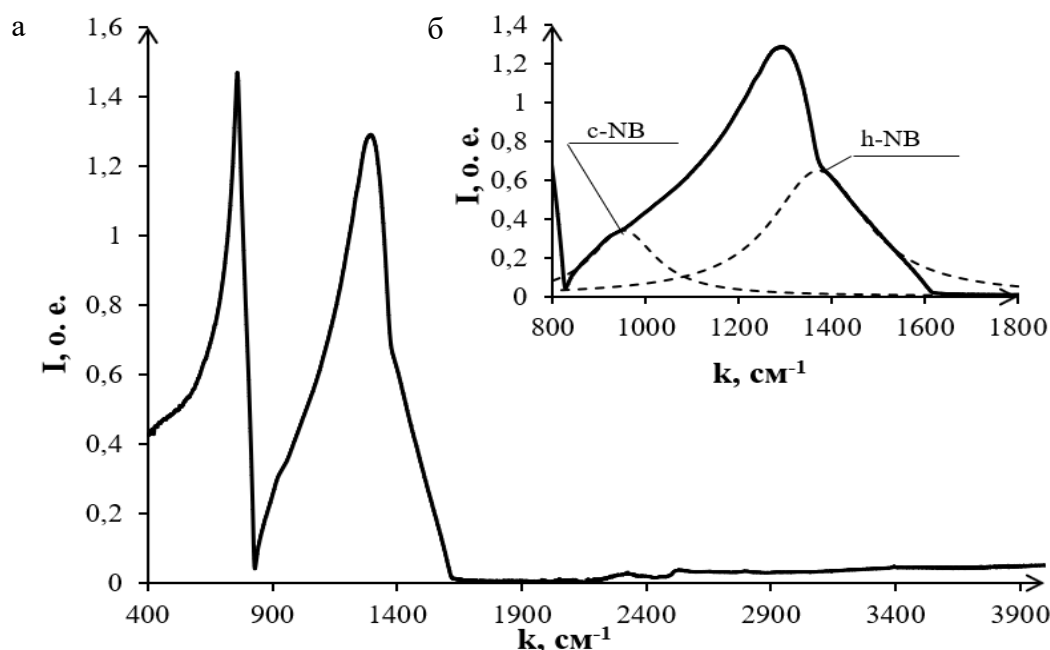
Объемное распределение наночастиц по размерам рассчитывалось из данных,

полученных на дифрактометре малоуглового рентгеновского рассеяния в режиме линейной коллимации с разрешением  $0,03 \text{ нм}^{-1}$ . Для последовательного вычитания спектров проводились поэтапные измерения дифрактограмм раствора (капилляр  $0,1 \times 20 \text{ мм}$ ) в процессе его приготовления: раствор наночастиц нитрида бора в хлороформе, раствор стеариновой кислоты в гексане, коллоидная система стабилизированных наночастиц нитрида бора молекулами стеариновой кислоты.

Процесс испарения растворителей из коллоидной системы изучался на приставке нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) ИК-Фурье-спектрометра Nicolet iS 50 при комнатной температуре. Жидкостная ячейка переменного сечения оставалась открытой в течение всего эксперимента вплоть до полного испарения гексана и хлороформа. Измерение спектров производилось через равные интервалы времени со спектром сравнения, полученным в начале эксперимента.

## Результаты и их обсуждение

ИК-спектр коммерческого порошка наночастиц нитрида бора содержит две явно выраженные линии  $758$  и  $1301 \text{ см}^{-1}$  (рис. 1), отвечающие межплоскостным колебаниям атомов в решетке гексагонального нитрида бора с характерным пиком  $817 \text{ см}^{-1}$  и внутривибрационным колебаниям атомов бора и азота ( $1370 \text{ см}^{-1}$ ) данной фазы [10]. При более детальном рассмотрении области  $800\text{--}1600 \text{ см}^{-1}$  обнаруживаются полосы поглощения:  $952 \text{ см}^{-1}$ , которая соответствует кубическому нитриду бора *c-BN* [11], имеющий одну собственную частоту колебания в ИК-спектре  $1100 \text{ см}^{-1}$  [12], и линии для гексагональной фазы  $1372 \text{ см}^{-1}$  *h-BN* [13]. Таким образом, колебательные частоты для гексагональной и кубической фазы нитрида бора наблюдаются в виде смещений характерных линии, что указывает на графитоподобную дефектную структуру исходного порошка [14].

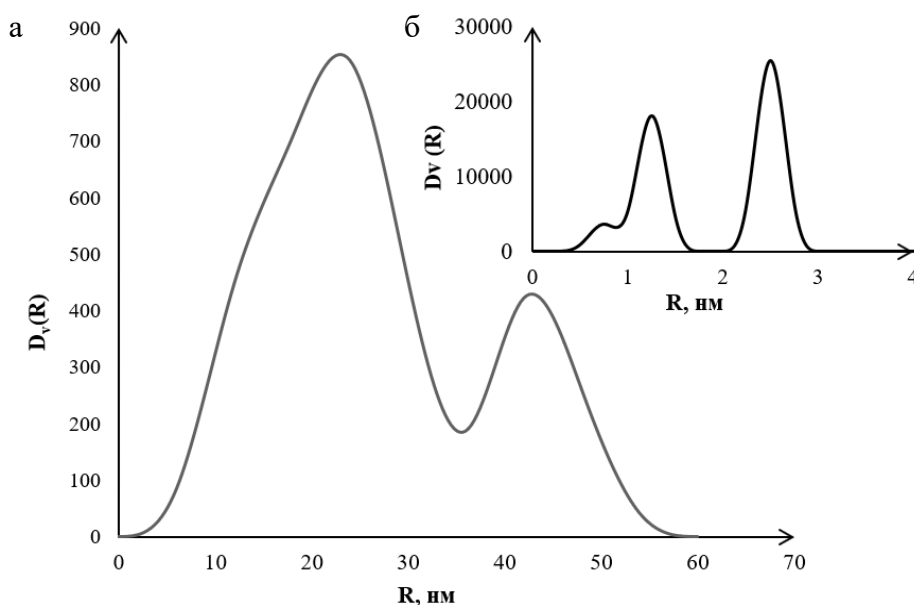


**Рис. 1.** ИК-спектр порошка нитрида бора (а) и деконволюция спектральной области 800–1600  $\text{cm}^{-1}$  (б)

**Fig. 1.** IR spectrum of boron nitride powder (a) and the deconvolution of the spectral region is 800-1600  $\text{cm}^{-1}$  (b)

Средние радиусы стабилизированных частиц нитрида бора в коллоидной системе по данным МУРР составили 23 и 42 нм (рис. 2), что согласуется с радиусами частиц в ленгмюровской пленке по

данным атомно-силовой микроскопии [15]. На вставке представлены радиусы наночастиц стеариновой кислоты 0,8, 1,3 и 2,5 нм.

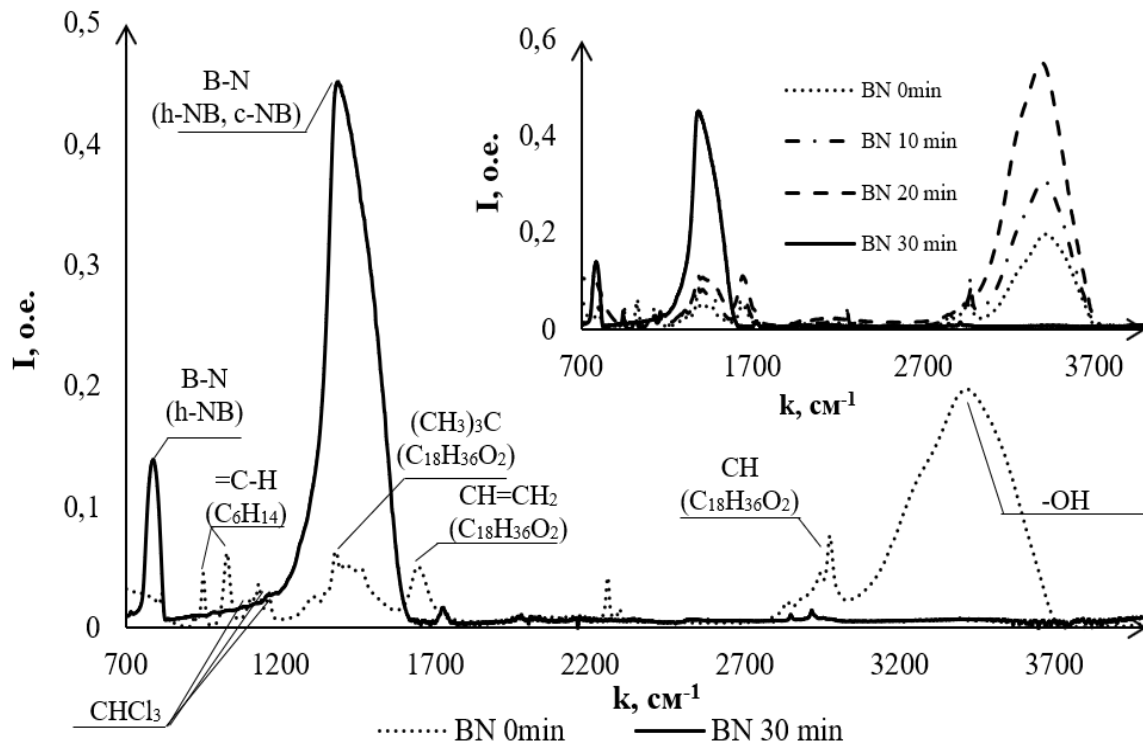


**Рис. 2.** Объемное распределение частиц нитрида бора по размерам по данным МУРР (а) и распределение частиц по размерам стеариновой кислоты (б)

**Fig. 2.** Volumetric particle size distribution of boron nitride according to the SAXS data (a) and the particle size distribution of stearic acid (b)

На рисунке 3 представлены семейства ИК-спектров поглощения капли коллоидной системы стабилизированного стеариновой кислотой наночастиц нитрида бора. Для исследования процессов испарения

гексана и хлороформа спектры измерялись через каждые 2 минуты до полного испарения растворителей, которое произошло за 30 минут.



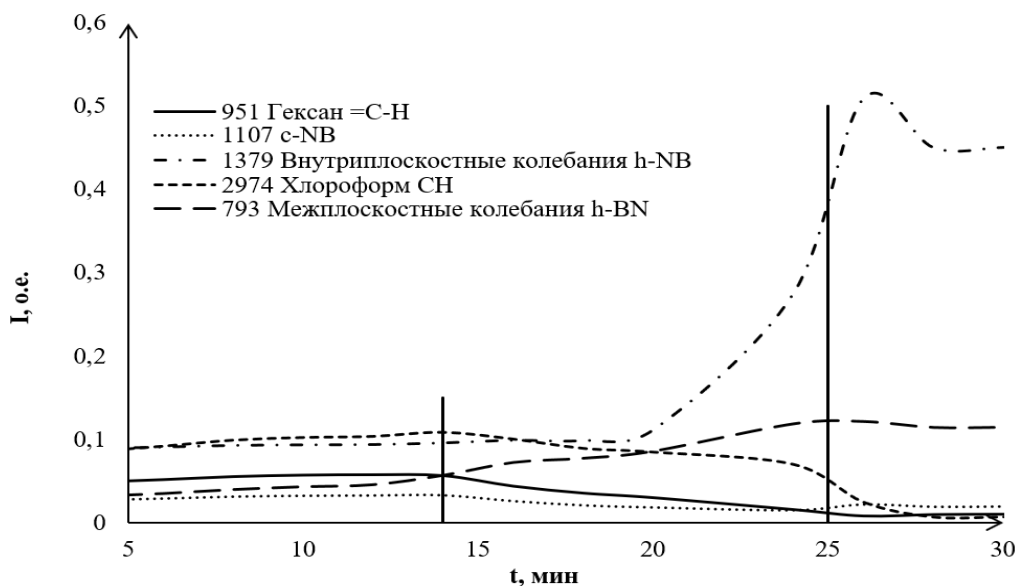
**Рис. 3.** Семейство ИК-спектров капли коллоидной системы нитрида бора

**Fig. 3.** The family of IR spectra of a drop of a colloidal boron nitride system

В начале процесса испарения капли ИК-спектр содержит все компоненты коллоидной системы: нитрид бора, стеариновую кислоту и их растворители (хлороформ и гексан соответственно). Хлороформ представлен пиками 3034 и 771  $\text{cm}^{-1}$  [16], полосы поглощения гексана 951, 1025  $\text{cm}^{-1}$ , соответствующие межзатомным  $=\text{C}-\text{H}$  колебаниям и 1462  $\text{cm}^{-1}$  – деформационным колебаниям  $\text{C}-\text{H}$  связей [17].

Анализ зависимости интенсивностей линий поглощения от времени (рис. 4) показал, что на начальных этапах скорость испарения гексана и хлороформа практически одинаковы, их графические зависимости имеют равные углы наклона. Однако после 25 минут концентрация гек-

сана уменьшилась практически до нуля, что привело к увеличению скорости испарения хлороформа, концентрация которого также снизилась до нуля за последующие 3 минуты. С уменьшением концентрации хлороформа резко возрастает интенсивность линии поглощения для внутриплоскостных колебаний гексагонального нитрида бора. Наибольший рост интенсивности (~500%) наблюдается для линии поглощения 1397  $\text{cm}^{-1}$ . Интенсивность линии 793  $\text{cm}^{-1}$  начинает возрастать после 14 минут, что совпадает с началом испарения гексана, которое приводит к структурному изменению межмолекулярных взаимодействий.

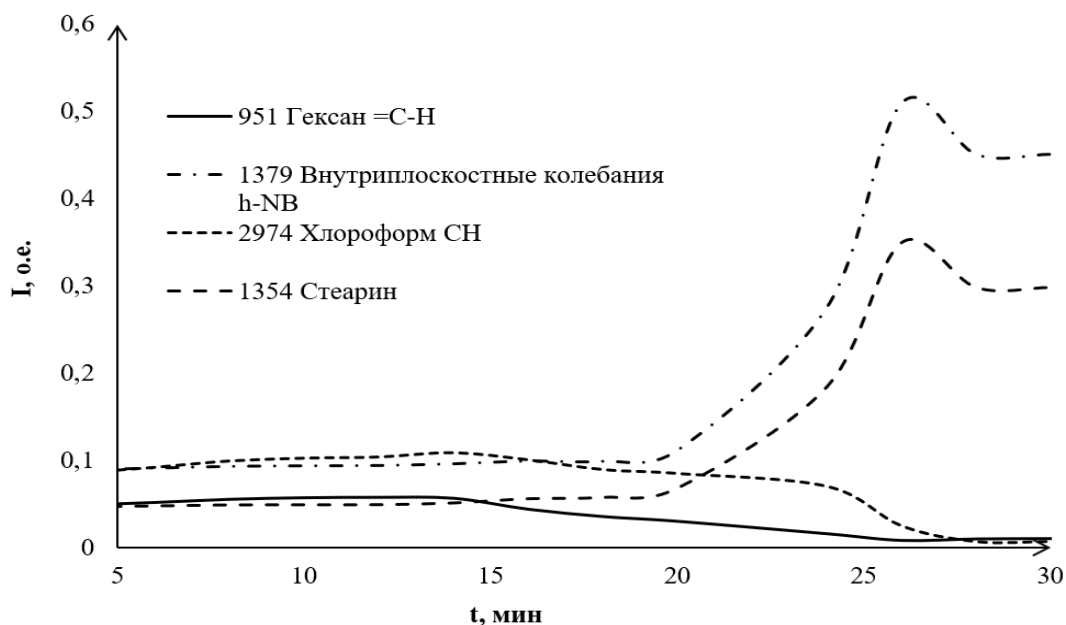


**Рис. 4.** Зависимость интенсивностей линий поглощения гексана, хлороформа и нитрида бора от времени

**Fig. 4.** Dependence of the intensities of absorption lines of hexane, chloroform and boron nitride on time

Характер изменения интенсивности линии поглощения, соответствующей стеариновой кислоте ( $1354\text{ см}^{-1}$ ) [18], повторяет форму линии нитрида бора  $1379\text{ см}^{-1}$ , что указывает на привитие молекул стеариновой кислоты к поверхности наночастиц BN (рис. 5) [19]. По мере испарения

капли интенсивность пиков, соответствующих летучим растворителям, постепенно уменьшается и в итоге становится равной нулю, конечный спектр содержит только характерные пики нитрида бора и стеариновой кислоты [20].



**Рис. 5.** Зависимость интенсивностей линий поглощения гексана, хлороформа, нитрида бора и стеариновой кислоты от времени

**Fig. 5.** Dependence of the intensities of absorption lines of hexane, chloroform, boron nitride and stearic acid on time

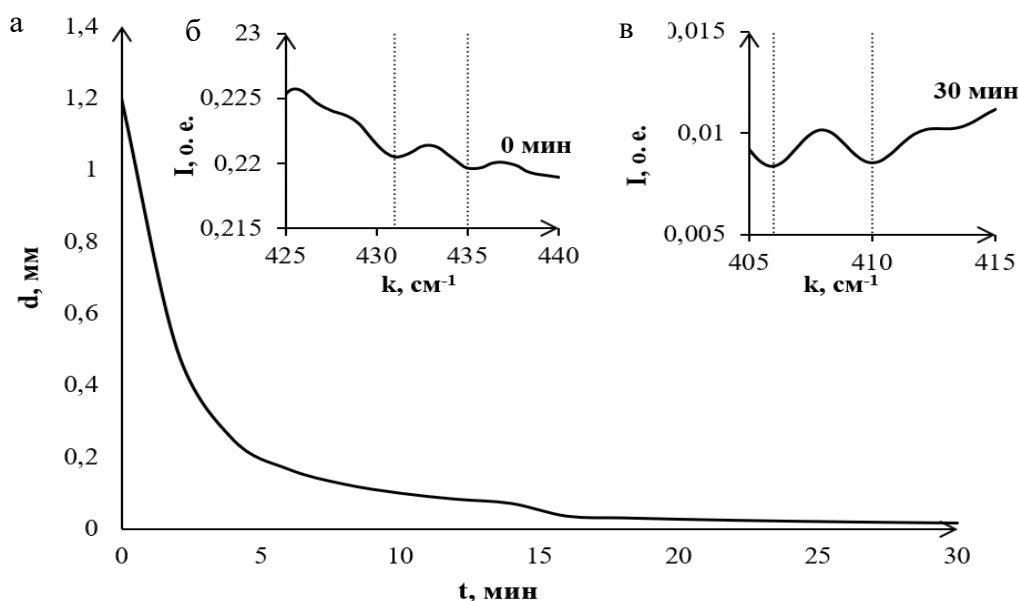
При использовании приставки НПВО на ИК-Фурье-спектрометре могут наблюдаться отражения от поверхности образца, приводящие к появлению разности хода лучей  $\Delta$ . Если при этом разность хода меньше длины когерентности  $l_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda}$ , где  $\lambda$  – длина волны ИК-излучения;  $\delta\lambda$  – спектральный предел разрешения спектрометра, то наблюдается интерференционный спектр (рис. 6, б, в). При этом справедливо соотношение

$$d = \frac{1}{2n\Delta\nu}, \quad (1)$$

где  $d$  – расстояние между поверхностями;  $n$  – показатель преломления коллоидной системы;  $\Delta\nu$  – разность между волновыми

числами, соответствующими соседним минимумам или максимумам.

В ИК-спектрах испаряющейся коллоидной системы на низких частотах наблюдалась интерференционная картина, по которой была рассчитана скорость испарения капли. Для расчета по (1) учитывались изменения разности хода в капле и расчетный показатель преломления  $n = 1,6$ , полученный с помощью моделирования коллоидной системы стабилизированных наночастиц нитрида бора [15]. Полученная зависимость толщины капли коллоидной системы стабилизированных наночастиц нитрида бора согласуется с изменениями расстояний между интерференционными линиями в наблюдаемом спектре в начале и в конце процесса испарения.



**Рис. 6.** Зависимость толщины капли коллоидной системы стабилизированных наночастиц нитрида бора (а), расстояний между интерференционными линиями, наблюдаемые в ИК-Фурье спектрах в начале (б) и в конце (в) процесса испарения

**Fig. 6.** Dependence of the droplet thickness of the colloidal system of stabilized boron nitride nanoparticles (а) the changes in the distances between the interference lines observed in the IR-Fourier spectra at the beginning (б) and at the end (в) of the evaporation process

Можно видеть, что скорость испарения коллоидной системы не постоянная и постепенно уменьшается с течением времени (см. рис. 6), что связано с увеличением концентрации молекул хлороформа

и гексана в приповерхностном слое воздуха, а также с переменной площадью сечения жидкостной ячейки в приставке НПВО. Расчеты показали, что толщина

капли коллоидной системы в процессе испарения уменьшилась в течение 30 минут с 1,2 мм до ~10 мкм.

## Выводы

ИК-Фурье спектр коммерческого порошка из наночастиц нитрида бора представлен линиями поглощения характерными для кубической *c*-BN и гексагональной *h*-BN фаз, что указывало на его гете-

рофазность. Средний диаметр наночастиц обеих фаз по данным МУРР составил 46 и 84 нм.

В процессе испарения капли коллоидной системы стабилизированного стеариновой кислотой нитрида бора установлено, что после полного испарения хлороформа и гексана в ИК-Фурье спектре содержатся только линии нитрида бора и стеариновой кислоты.

## Список литературы

1. Naclerio A. E., Kidambi P. R. A review of scalable hexagonal boron nitride (h-BN) synthesis for present and future applications // *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, no. 6. P. 2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>
2. Hexagonal boron nitride for next-generation photonics and electronics / S. Moon, J. Kim, J. Park, S. Im, J. Kim, I. Hwang [et al.] // *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, no. 4. P. 2204161. <https://doi.org/10.1002/adma.202204161>
3. Advanced nano boron nitride architectures: Synthesis, properties and emerging applications / R. Y. Tay, H. Li, H. Wang, J. Lin, Z. K. Ng, R. Shivakumar [et al.] // *Nano Today*. 2023. Vol. 53. P. 102011. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.102011>
4. Improved thermal conductivity of polymer composites by noncovalent modification of boron nitride via tannic acid chemistry / L. Yu, S. Gao, D. Yang, Q. Wei, L. Zhang // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60, no. 34. P. 12570–12578. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02217>
5. Challenges and solutions in surface engineering and assembly of boron nitride nanosheets / Z. Liu, A. D. Foroushani, D. Li, S. Mateti, J. Liu, F. Yan [et al.] // *Materials Today*. 2021. Vol. 44. P. 194–210. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.11.020>
6. Glycine functionalized boron nitride nanosheets with improved dispersibility and enhanced interaction with matrix for thermal composites / X. Tian, N. Wu, B. Zhang, Y. Wang, Z. Geng, Y. Li // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 408. P. 127360. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127360>
7. Highly-dispersed carboxymethyl cellulose and polyvinylpyrrolidone functionalized boron nitride for enhanced thermal conductivity and hydrophilicity / H. Li, W. Yang, N. Wu, L. Sun, P. Shen, X. Wang [et al.] // *Applied Surface Science*. 2023. Vol. 617. P. 156485. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156485>
8. Functionalized boron–nitride nanotubes: First-principles calculations / C. Aguiar, M. Camps, N. Dattani, I. Camps // *Applied Surface Science*. 2023. Vol. 611. P. 155358. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155358>
9. Functionalized hexagonal boron nitride nanoplatelets for advanced cementitious nanocomposites / P. A. Danoglidis, C. M. Thomas, M. E. Maglogianni, M. C. Hersam, M. S. Konsta-Gdoutos // *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 141. P. 105127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105127>
10. Boron nitride colloidal solutions, ultralight aerogels and freestanding membranes through one-step exfoliation and functionalization / W. Lei, V. N Mochalin, D. Liu, S. Qin, Y. Gogotsi, Y. I. Chen // *Nature communications*. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 8849-1-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9849>
11. Eco-friendly and scalable strategy to design electrically insulating boron nitride/polymer composites with high through-plane thermal conductivity / W. Jang, S. Lee, N. R. Kim, H. Koo, J. Yu,



C.-M. Yang // *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 248. P. 110355. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110355>

12. Mazhar H., Adamson D. H., Al-Harthi M. A. Differently oxidized portions of functionalized hexagonal boron nitride // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 308. P. 128243. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128243>

13. Cubic and hexagonal boron nitride phases and phase boundaries / A. Biswas, G. A. Alvarez, M. Tripathi, J. Lee, T. S. Pieshkov, C. Li [et al.] // *Journal of Materials Chemistry C*. 2024. Vol. 12, no. 9. P. 3053–3062. <https://doi.org/10.1039/D4TC00039K>

14. Review on various techniques for the development of thin film boron nitride coating on metal surfaces / M. Singh, H. Singh, Y. Sharma, M. Singh // *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 2986, no. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0192656>

15. Оптические свойства и зонная структура ленточных пленок нитрида бора / И. В. Локтионова, А. П. Кузьменко, А. И. Жакин, В. М. Емельянов, А. С. Сизов, А. П. Абакумов [и др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 105–116. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-105-116>

16. Lasalle B. S. I., Pandian M. S., Ramasamy P. Molecular interactions studies on chloroform in the environment of o-cresol: FTIR spectroscopy and quantum chemical calculations // *Brazilian Journal of Physics*. 2023 Vol. 53, no. 4. P. 97. <https://doi.org/10.1007/s13538-023-01309-6>

17. Hydroisomerization of n-Hexane using acidified metal–organic framework and platinum nanoparticles / K. Sabyrov, J. Jiang, O. M. Yaghi, G. A. Somorjai // *Journal of the American Chemical Society*. 2017. Vol. 139, no. 36. P. 12382–12385. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b06629>

18. Reaction mechanism of stearic acid pyrolysis via reactive molecular dynamics simulation and TG-IR technology / Y. Zhang, C. Zhang, W. Li, Q. Xiao, F. Jiao, S. Xu [et al.] // *Renewable Energy*. 2023. Vol. 217. P. 119115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119115>

19. Effects of surface modification with stearic acid on the dispersion of some inorganic fillers in PE matrix / T. T. Nguyen, V. K. Nguyen, H. Pham, T. T. Pham, N. T. Duc // *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5, no. 10. P. 270. <https://doi.org/10.3390/jcs5100270>

20. Effect of the stearic acid-modified TiO<sub>2</sub> on PLA nanocomposites: Morphological and thermal properties at the microscopic scale / A. Deghiche, N. Haddaoui, A. Zerriouh, F. S. Eddine, D. Cavallo, A. Erto [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 6. P. 106541. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106541>

## References

1. 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>

2. Moon S., Kim J., Park J., Im S., Kim J., Hwang I., et al. Hexagonal boron nitride for next-generation photonics and electronics. *Advanced Materials*. 2023;35(4):2204161. <https://doi.org/10.1002/adma.202204161>

3. Tay R.Y., Hongling Li, Hong Wang, Jinjun Lin, Zhi Kai Ng, Ranjana Shivakumar, et al. Advanced nano boron nitride architectures: Synthesis, properties and emerging applications. *Nano Today*. 2023;53:102011. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.102011>

4. Yu L., Gao S., Yang D., Wei Q., Zhang L. Improved thermal conductivity of polymer composites by noncovalent modification of boron nitride via tannic acid chemistry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021;60(34):12570–12578. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02217>

5. Liu Z., Foroushani A.D., Li D., Mateti S., Liu J., Yan F., et al. Challenges and solutions in surface engineering and assembly of boron nitride nanosheets. *Materials Today*. 2021;44:194–210. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.11.020>

6. Tian X., Wu N., Zhang B., Wang Y., Geng Z., Li Y. Glycine functionalized boron nitride nanosheets with improved dispersibility and enhanced interaction with matrix for thermal composites. *Chemical Engineering Journal*. 2021;408:127360. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127360>
7. Li H., Yang W., Wu N., Sun L., Shen P., Wang X., et al. Highly-dispersed carboxymethyl cellulose and polyvinylpyrrolidone functionalized boron nitride for enhanced thermal conductivity and hydrophilicity. *Applied Surface Science*. 2023;617:156485. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156485>
8. Aguiar C., Camps M., Dattani N., Camps I. Functionalized boron–nitride nanotubes: First-principles calculations. *Applied Surface Science*. 2023;611:155358. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155358>
9. Danoglidis P.A., Thomas C.M., Maglogianni M.E., Hersam M.C., Konsta-Gdoutos M.S. Functionalized hexagonal boron nitride nanoplatelets for advanced cementitious nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*. 2023;141:105127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105127>
10. Lei W., Mochalin V.N., Liu D., Qin S., Gogotsi Y., Chen Y.I. Boron nitride colloidal solutions, ultralight aerogels and freestanding membranes through one-step exfoliation and functionalization. *Nature communications*. 2015;6(1):8849-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9849>
11. Eco-friendly and scalable strategy to design electrically insulating boron nitride/polymer composites with high through-plane thermal conductivity / W. Jang, S. Lee, N.R. Kim, H. Koo, J. Yu, C.-M. Yang. *Composites Part B: Engineering*. 2023;248:110355. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110355>
12. Mazhar H., Adamson D.H., Al-Harthi M.A. Differently oxidized portions of functionalized hexagonal boron nitride. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;308:128243. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128243>
13. Biswas A., Alvarez G. A., Tripathi M., Lee J., Pieshkov T. S., Li C., et al. Cubic and hexagonal boron nitride phases and phase boundaries. *Journal of Materials Chemistry C*. 2024;12(9):3053–3062. <https://doi.org/10.1039/D4TC00039K>
14. Singh M., Singh H., Sharma Y., Singh M. Review on various techniques for the development of thin film boron nitride coating on metal surfaces. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2024;2986(1). <https://doi.org/10.1063/5.0192656>
15. Loktionova I.V., Kuzmenko A.P., Zhakin A.I., Emelyanov V.M., Sizov A.S., Abakumov A.P. Optical properties and band structure Lengmuir films of boron nitride. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(3):105–116. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-105-116>
16. Lasalle B.S.I., Pandian M.S., Ramasamy P. Molecular interactions studies on chloroform in the environment of o-cresol: FTIR spectroscopy and quantum chemical calculations. *Brazilian Journal of Physics*. 2023;53(4):97. <https://doi.org/10.1007/s13538-023-01309-6>
17. Sabyrov K., Jiang J., Yaghi O.M., Somorjai G.A. Hydroisomerization of n-Hexane using acidified metal–organic framework and platinum nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*. 2017;139(36):12382–12385. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b06629>
18. Zhang Y., Zhang C., Li W., Xiao Q., Jiao F., Xu S., et al. Reaction mechanism of stearic acid pyrolysis via reactive molecular dynamics simulation and TG-IR technology. *Renewable Energy*. 2023;217:119115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119115>
19. Nguyen T.T., Nguyen V.K., Pham H., Pham T.T., Duc N.T. Effects of surface modification with stearic acid on the dispersion of some inorganic fillers in PE matrix. *Journal of Composites Science*. 2021;5(10):270. <https://doi.org/10.3390/jcs5100270>
20. Deghiche A., Haddaoui N., Zerriouh A., Eddine F.S., Cavallo D., Erto A., et al. Effect of the stearic acid-modified TiO<sub>2</sub> on PLA nanocomposites: Morphological and thermal properties at the microscopic scale. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(6):106541. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106541>

---

**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, старший преподаватель 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), Senior Teacher 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