

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-266-274

УДК 536.2

Теплопроводность многослойных наносвитков из гексагонального нитрида бора

Мария Витальевна Савватеева¹✉, Николай Васильевич Пилипенко²,
Игорь Владимирович Баранов³, Абутраб Александрович Аливердиев⁴,
Павел Андреевич Колодийчук⁵

^{1,2,3,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁴ Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал ОИВТ РАН, Махачкала, 367000, Российская Федерация

⁴ Дагестанский государственный университет, Махачкала, 367000, Российская Федерация

¹ mashanyasav@mail.ru✉, <https://orcid.org/0009-0009-2562-1173>

² pilipenko38@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>

³ ivbaranov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0595-368X>

⁴ aliverdi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1650-3633>

⁵ pkolodiychuk@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>

Аннотация

Введение. Традиционные теплопроводящие композитные материалы, обладающие высокой теплопроводностью, склонны к агломерации в матрице, их химическая инертность затрудняет прочную связь с полимером, а высокая электропроводность существенно ограничивает применение в электронике. В работе представлен теоретический анализ анизотропной теплопроводности многослойных наносвитков из гексагонального нитрида бора (h-BN) как перспективных наполнителей для тепловых интерфейсов электронных изделий. Материал сочетает высокую теплопроводность, хорошие электроизоляционные свойства и высокую технологичность при интеграции в электронные компоненты. Предложена аналитическая модель, позволяющая прогнозировать значения теплопроводности многослойных наносвитков из h-BN в продольном и поперечном направлениях. **Метод.** Аналитическая модель анизотропной теплопроводности многослойных наносвитков (свернутых 2D-нанопластин) реализована на основе теории обобщенной проводимости. Ключевыми научными дополнениями к существующим моделям являются возможность увеличения количества рассчитываемых слоев и размеров наносвитков. Для более точного описания размерных эффектов впервые на подобной многослойной структуре введен параметр межслойного рассеяния для коррекции эффективной длины свободного пробега фононов в материале. **Основные результаты.** Получены математические зависимости теплопроводности многослойных наносвитков из h-BN в продольном и поперечном направлениях относительно оси наносвитка в зависимости от количества слоев. Показано, что с увеличением числа слоев продольная теплопроводность (вдоль оси наносвитка) уменьшается. Поперечная теплопроводность (поперек оси наносвитка) существенно выше, чем у углеродных аналогов. **Обсуждение.** Ввиду отсутствия в открытых научных работах количественных данных (как экспериментальных, так и полученных численным методом) для многослойных наносвитков из h-BN валидация результатов моделирования выполнена на схожей системе, представленной в работе, посвященной трехслойному углеродному наносвитку. Полученные прогнозные результаты позволяют оценить влияние количества слоев на теплопроводность наносвитков из h-BN и синтезировать структуры многослойных наносвитков с заранее заданным значением теплопроводности. Показано, что многослойные наносвитки из h-BN являются перспективной альтернативой углеродным нанотрубкам в электронике в случаях, когда критически важно исключить «тепловые пробки», а также обеспечить высокую межэлементную электроизоляцию.

Ключевые слова

многослойные наносвитки, нитрид бора, углерод, графен, теплопроводность, анизотропия, наноматериалы, наноструктуры, подложки, микроэлектроника

Ссылка для цитирования: Савватеева М.В., Пилипенко Н.В., Баранов И.В., Аливердиев А.А., Колодийчук П.А. Теплопроводность многослойных наносвитков из гексагонального нитрида бора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 2. С. 266–274. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-266-274

© Савватеева М.В., Пилипенко Н.В., Баранов И.В., Аливердиев А.А., Колодийчук П.А., 2026

Thermal conductivity of multilayer hexagonal boron nitride nanoscrolls

Mariya V. Savvateeva¹, Nikolay V. Pilipenko², Igor V. Baranov³,
Abutrab A. Aliverdiev⁴, Pavel A. Kolodychuk⁵

^{1,2,3,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁴ Institute for Problems of Geothermics and Renewable Energy Research — Makhachkala subsidiary of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367030, Russian Federation

⁴ Dagestan State University, Makhachkala, 367000, Russian Federation

¹ mashanyasav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2562-1173>

² pilipenko38@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>

³ ivbaranov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0595-368X>

⁴ aliverdi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1650-3633>

⁵ pkolodychuk@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>

Abstract

The article presents a theoretical analysis of the anisotropic thermal conductivity of multilayer hexagonal boron nitride (h-BN) nanoscrolls as promising fillers for thermal interfaces in electronic devices. Traditional thermally conductive composite materials, while possessing high thermal conductivity, are prone to agglomeration within the polymer matrix; their chemical inertness hinders the formation of strong bonds with the polymer, and their high electrical conductivity significantly limits their application in electronics. The h-BN-based material combines high thermal conductivity, excellent electrical insulation properties, and high processability for integration into electronic components. An analytical model is proposed to predict the thermal conductivity values of multilayer h-BN nanoscrolls in both the longitudinal and transverse directions. The analytical model for the anisotropic thermal conductivity of multilayer nanoscrolls (scrolled 2D nanoplates) is developed based on the generalized conductivity theory. Key scientific enhancements to existing models include the capability to increase the number of calculable layers and the dimensions of the nanoscrolls. To more accurately describe size effects, an interlayer scattering parameter is introduced for the first time in such a multilayer structure to correct the effective phonon mean free path within the material. Mathematical dependences of the thermal conductivity of multilayer h-BN nanoscrolls on the number of layers were obtained for the directions longitudinal and transverse to the nanoscroll axis. It is shown that as the number of layers increases, the longitudinal thermal conductivity (along the nanoscroll axis) decreases. The transverse thermal conductivity (perpendicular to the nanoscroll axis) is significantly higher than that of their carbon-based counterparts. Due to the absence of quantitative data (both experimental and numerical) for multilayer boron nitride nanoscrolls in available scientific literature, validation of the simulation results was performed on a similar system reported in open sources — a three-layer carbon nanoscroll. The obtained predictive results allow for assessing the influence of the layer count on the thermal conductivity of h-BN nanoscrolls and for synthesizing multilayer nanoscroll structures with a predetermined thermal conductivity value. It is demonstrated that multilayer h-BN nanoscrolls represent a promising alternative to carbon nanotubes in electronics for applications where it is critically important to eliminate “thermal bottlenecks” and ensure high inter-component electrical insulation.

Keywords

multilayer nanoscrolls, boron nitride, carbon, thermal conductivity, anisotropy, nanomaterials, nanostructures, substrates, microelectronics

For citation: Savvateeva M.V., Pilipenko N.V., Baranov I.V., Aliverdiev A.A., Kolodychuk P.A. Thermal conductivity of multilayer hexagonal boron nitride nanoscrolls. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 266–274 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-266-274

Введение

Исследование теплопроводности многослойных наносвитков из гексагонального нитрида бора (h-BN) обусловлено растущими потребностями электроники в эффективных теплоотводящих материалах [1]. С увеличением степени интеграции и быстродействия микроэлектронных устройств проблема теплоотвода становится критической. Традиционные тепловые интерфейсные материалы на основе полимеров с металлическими или керамическими наполнителями имеют ограниченное значение теплопроводности 1–10 Вт/(м·К), что создает «тепловые пробки» в электронных устройствах.

В качестве перспективных теплоотводов активно исследуются композиты с углеродными нанотрубками на основе графена, обладающими высокой теплопроводностью [2, 3]. Однако их широкому применению препятствуют серьезные недостатки: склонность к агломерации в матрице, высокая химическая инертность,

осложняющая создание прочной связи с полимером, и, что критически важно, электропроводность.

Многослойные наносвитки из h-BN обладают значительным комплексным преимуществом перед углеродными нанотрубками. h-BN является диэлектриком с широкой запрещенной зоной 5,971 эВ, что позволяет использовать его для эффективного отвода теплоты от активных областей микросхем, исключая риски короткого замыкания [4]. Благодаря высокой теплопроводности в сочетании с хорошими диэлектрическими свойствами h-BN эффективно работает в качестве подложки для графена и дихалькогенидов переходных металлов, существенно улучшая функцию теплоотвода по сравнению с традиционной подложкой из диоксида кремния [5–9]. Уникальная морфология наносвитков обеспечивает им высокую упругость и лучшую совместимость с полимерными матрицами по сравнению с жесткими углеродными нанотрубками, снижая межфазное тепловое сопротивление. Таким образом, наносвитки из h-BN представляют собой следующее поколение

наполнителей для тепловых интерфейсов, сочетающих высокую теплопроводность, электрическую изоляцию и превосходную технологичность при интеграции в композиты [10, 11].

Целью настоящей работы является комплексное изучение эффективной теплопроводности многослойных наносвитков из h-BN с учетом их геометрических параметров и анизотропии свойств. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: разработка геометрической и тепловой моделей в многослойных структурах типа «свиток»; расчет продольной и поперечной теплопроводностей в зависимости от количества слоев; оценка перспектив применения наносвитков из h-BN в системах теплового управления.

Результаты работы важны для развития методов прогнозирования тепловых свойств наноматериалов и открывают новые возможности для создания высокоэффективных теплопроводящих материалов на основе h-BN.

Модель и метод

Многослойный наносвиток представляет собой нанопластину, свернутую в трубку и похожую на «свиток», скрученный из атомарно тонкого слоя 2D-материала (например, из графена или h-BN) с толщиной монослоя Δ (рис. 1).

Исследование теплопроводности многослойного наносвитка в настоящей работе основывается на методе теории обобщенной проводимости, разработанном профессорами Г.Н. Дульневым и Ю.П. Заричняком, которые заложили фундаментальные основы анализа теплопроводности неоднородных смесей и композиционных материалов. Этот метод является мощным инструментом для анализа теплопереноса в сложных анизотропных и гетерогенных наноструктурах. Его основное преимущество заключается в возможности учитывать неоднородность материалов, анизотропию тепловых свойств и сложную геометрию объекта, при этом обеспечивая точное описание теплового сопротивления на наномасштабах. Теория обобщенной проводимости использует понятия эквивалентных тепловых

сопротивлений, что позволяет строить модели с разным уровнем детализации [13–18].

В целях моделирования структуры многослойного наносвитка выделяется элементарная ячейка, представляющая свернутый в «свиток» фрагмент с диаметром D и количеством слоев N . Для геометрического моделирования используется упрощенная элементарная ячейка квадратного сечения (рис. 2), эквивалентная цилиндрической геометрии по площади. Это упрощает аналитический расчет теплопроводности многослойного наносвитка при направлениях теплового потока Q_{\parallel} вдоль и Q_{\perp} поперек оси наносвитка, который учитывает длины свободного пробега фононов, что улучшает точность расчетов в сравнении с более упрощенными подходами [16, 18].

В общем случае структура характеризуется тем, что слой 1 (внутренний) отличается по форме от последующих. Все последующие слои 2, ..., N имеют идентичную геометрию и отличаются только линейными размерами.

Теплопроводность в поперечном направлении

Для исследования теплопроводности многослойного наносвитка в поперечном направлении λ_{\perp} модель разбивается вспомогательными плоскостями на участки модели k : адиабатическими a – a , которые параллельны тепловому потоку Q , и изотермическими i – i , перпендикулярными тепловому потоку Q (рис. 3).

В первом случае модель разбивается адиабатическими плоскостями a – a , параллельными направлению теплового потока Q (рис. 3, a). Предполагается отсутствие теплообмена между параллельными цепочками элементов. Тепловой поток распараллеливается, что соответствует последовательному соединению тепловых сопротивлений внутри каждой цепочки и параллельному соединению самих цепочек. Для параллельного соединения аддитивны тепловые проводимости, поэтому результирующая эффективная теплопроводность при разбиении модели адиабатическими плоскостями λ_a рассчитывается через суммирование проводимостей параллельных цепочек σ_k .

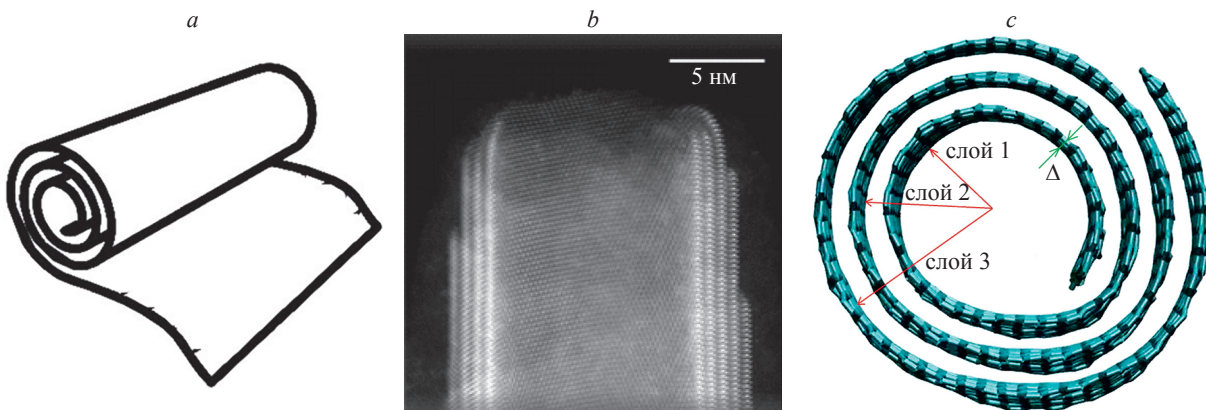


Рис. 1. Спиральная структура многослойного наносвитка с видимой слоистой структурой: общий вид (а); боковая проекция [11] (b); торцевая проекция [12] (c)

Fig. 1. Spiral structure of a multilayer nanoscroll with a visible layered structure: general view (a); lateral projection [11] (b); end projection [12] (c)

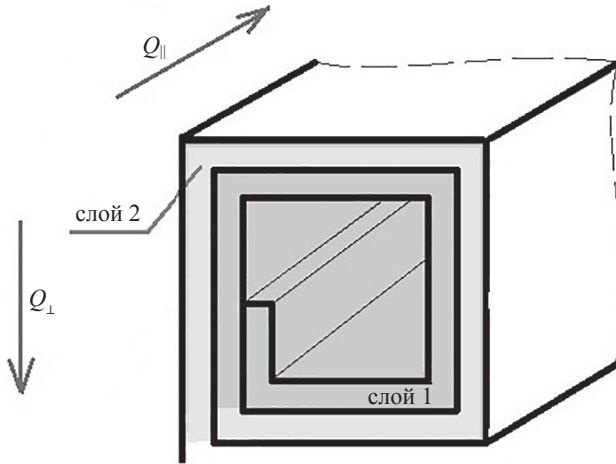


Рис. 2. Упрощенная геометрическая модель структуры многослойного наносвитка

Fig. 2. Simplified geometric model of the multilayer nanoscroll structure

Для двухслойного наносвитка ($N = 2$) участок 1 модели (его внутренняя область) является моделью однослойного наносвитка ($N - 1$) при разбиении адиабатическими плоскостями [19]. Следовательно, значением сопротивления R_1 и теплопроводности λ_1 участка 1 будет результирующее сопротивление и теплопроводность однослойного наносвитка. Для трехслойного наносвитка ($N = 3$) участком 1 модели является модель двухслойного наносвитка. И так далее по нарастанию слоев N .

Для остальных участков модели $k = 2, \dots, 5$ формулы для нахождения тепловых сопротивлений R_k и теплопроводностей λ_k выводятся из общих формул:

$$R_k = \frac{L_k}{S_k \lambda_k}, \lambda_k = \lambda_{\text{монослоя}} \frac{L_k}{\Lambda_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где L_k — длина стороны участка модели; S_k — площадь сечения участка модели; $\lambda_{\text{монослоя}}$ — справочные данные о теплопроводности монослоя 2D-материала;

$\Lambda_{\text{эфф}}$ — эффективная длина свободного пробега фононов в материале, учитывающая межслойное рассеяние фононов.

Ключевым дополнением к классической теории обобщенной проводимости является учет снижения теплопроводности слоев в многослойной структуре за счет дополнительного рассеяния фононов на межслойных границах. Для этого вводится зависимость $\Lambda_{\text{эфф}}$ от числа слоев N :

$$\Lambda_{\text{эфф}} = \frac{\Lambda_{\text{св.пр.ф.}}}{1 + \gamma(N - 1)}, \quad (2)$$

где $\Lambda_{\text{св.пр.ф.}}$ — длина свободного пробега фононов в материале; γ — безразмерный параметр, характеризующий силу межслойного рассеяния, $\gamma = 0,25$ принят на основе экспериментальных данных [20, 21].

Для расчета длины свободного пробега фононов в материале $\Lambda_{\text{св.пр.ф.}}$ используется классическое выражение [22] по известным справочным данным о теплопроводности листов h-BN, их удельной объемной теплоемкости C_v и скорости звука в материале $U_{\text{зв}}$

$$\lambda_{\text{монослоя}} = \frac{1}{3} C_v U_{\text{зв}} \Lambda_{\text{св.пр.ф.}}, \Lambda_{\text{св.пр.ф.}} = \frac{3 \lambda_{\text{монослоя}}}{C_v U_{\text{зв}}}. \quad (3)$$

Во втором случае модель разбивается изотермическими плоскостями $i-i$, перпендикулярными направлению теплового потока Q (рис. 3, б). Тепловой поток последовательно проходит через все слои структуры, что соответствует последовательному соединению слоев, внутри которых элементы соединены параллельно. Для последовательного соединения аддитивны тепловые сопротивления, поэтому результирующая теплопроводность при разбиении модели изотермическими плоскостями λ_i рассчитывается через суммирование сопротивлений слоев.

Для двухслойного наносвитка ($N = 2$) участок 6 модели (его внутренняя область) является моделью однослойного наносвитка ($N - 1$) при разбиении изотермическими плоскостями [19]. Следовательно, значени-

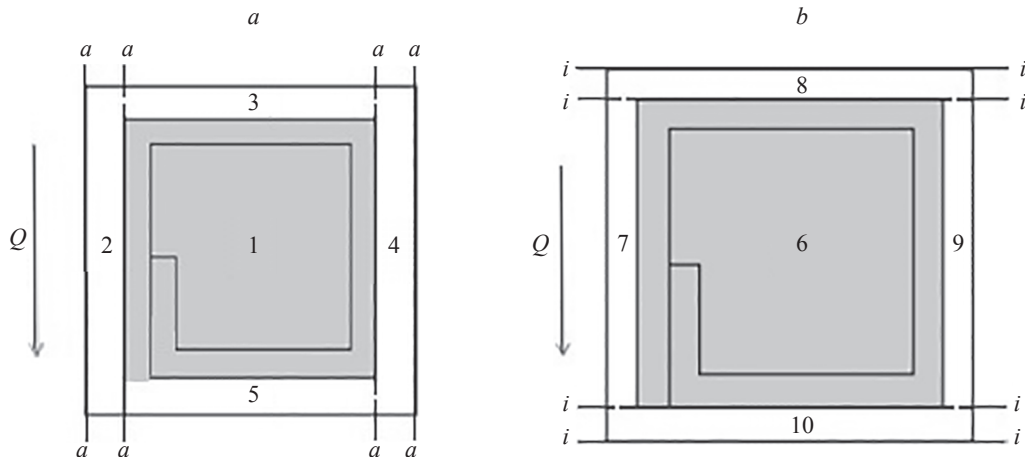


Рис. 3. Разбиение модели двухслойного наносвитка вспомогательными плоскостями: адиабатическими $a-a$ на участки $k = 1, \dots, 5$ (а) и изотермическими $i-i$ на участки $k = 6, \dots, 10$ (б)

Fig. 3. Division of the two-layer nanoscroll model by auxiliary planes: adiabatic $a-a$ into sections $k = 1, \dots, 5$ (a) and isothermal $i-i$ into sections $k = 6, \dots, 10$ (b)

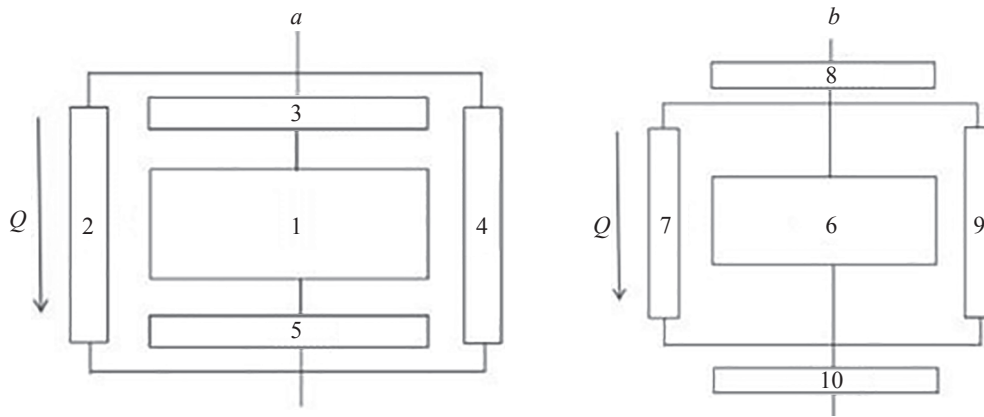


Рис. 4. Схема соединения тепловых сопротивлений отдельных участков модели при разбиении вспомогательными плоскостями: адиабатическими $a-a$ на участки $k = 1, \dots, 5$ (a) и изотермическими $i-i$ на участки $k = 6, \dots, 10$ (b)

Fig. 4. Connection diagram of the thermal resistances of individual sections of the model when divided by auxiliary planes: adiabatic $a-a$ into sections $k = 1, \dots, 5$ (a) and isothermal $i-i$ into sections $k = 6, \dots, 10$ (b)

ем сопротивления R_6 и теплопроводности λ_6 участка 6 будет результирующее сопротивление и теплопроводность однослойного наносвитка. Для трехслойного наносвитка ($N = 3$) участком 6 модели является модель двухслойного наносвитка. И так далее по нарастанию слоев N .

Для остальных участков модели $k = 7, \dots, 10$ формулы для нахождения тепловых сопротивлений R_k и теплопроводностей λ_k выводятся по формуле (1).

Схемы соединения тепловых сопротивлений отдельных участков модели двухслойного наносвитка при разбиении вспомогательными плоскостями показаны на рис. 4.

Результирующая проводимость параллельных цепочек σ_a (рис. 4, a) при разбиении модели адиабатическими плоскостями $a-a$, параллельными направлению теплового потока Q , выражается уравнениями:

$$\sigma_a = 2\sigma_2 + \sigma_{3-1-3}; \sigma_2 = \frac{1}{R_2}; \sigma_{3-1-3} = \frac{1}{2R_3 + R_1}. \quad (4)$$

Результирующее сопротивление параллельных цепочек последовательных слоев R_i и проводимость σ_i при разбиении модели изотермическими плоскостями $i-i$, перпендикулярными направлению теплового потока Q , имеют вид:

$$R_i = 2R_8 + \frac{R_6 R_7}{R_7 + 2R_6}, \sigma_i = \frac{1}{R_i}. \quad (5)$$

Результирующая поперечная теплопроводность λ_{\perp} принимается как среднее арифметическое значений теплопроводности при разбиении адиабатическими и изотермическими плоскостями [15–17]:

$$\lambda_a = \frac{\sigma_a L_{\text{МНС}}}{S_{\text{МНС}}}, \lambda_i = \frac{\sigma_i L_{\text{МНС}}}{S_{\text{МНС}}}, \lambda_{\perp} = \frac{\lambda_a + \lambda_i}{2}, \quad (6)$$

где $L_{\text{МНС}}$ — длина многослойного наносвитка; $S_{\text{МНС}}$ — площадь поперечного сечения многослойного наносвитка.

Теплопроводность в продольном направлении

Определение теплопроводности многослойного наносвитка в продольном направлении λ_{\parallel} выполняется в рамках той же методологической схемы, что и для однослойных наносвитков, разработанной совместно с профессором Ю.П. Заричняком и представленной в работе [19]. Ключевым дополнением методики является учет изменения геометрических параметров многослойной структуры наносвитка при увеличении числа слоев N .

В соответствии с методом теории обобщенной проводимости [13–18] для случая параллельного соединения однородных областей λ_{\parallel} может быть получена строго из принципа аддитивности тепловых сопротивлений. Таким образом, теплопроводность многослойного наносвитка в λ_{\parallel} рассчитывается как сумма произведений относительных долей площади стенки $\beta_{\text{стенки}}$ и внутренней области $\beta_{\text{внутр}}$ наносвитка в поперечном сечении на коэффициенты теплопроводностей $\lambda_{\text{стенки}}$ и $\lambda_{\text{внутр}}$:

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{\text{стенки}} \beta_{\text{стенки}} + \lambda_{\text{внутр}} \beta_{\text{внутр}}, \quad (7)$$

где $\beta_{\text{внутр}} + \beta_{\text{стенки}} = 1$.

Расчет относительных долей площади $\beta_{\text{внутр}}$ учитывает увеличение N в формуле площади внутренней области $S_{\text{внутр}}$:

$$S_{\text{внутр}} = \frac{(L_k - 2\Delta)^2 - \Delta \left(\frac{L_k}{2} - \Delta \right)}{(L_k + 2(N - 1)\Delta)^2}, \quad (8)$$

где знаменатель отражает увеличение общего размера сечения модели с ростом N .

Таким образом, зависимость λ_{\parallel} от N определяется исключительно геометрическим перераспределением относительных долей сечений проводящих компонентов, что корректно отражает физику продольного теплопереноса в многослойных наноструктурах типа «свиток».

Таблица. Теплофизические свойства исследуемых веществ
Table. Thermophysical properties of the investigated substances

Материал	Продольная теплопроводность $\lambda_{ \text{материала}}$, Вт/(м·К)	Поперечная теплопроводность $\lambda_{\perp\text{материала}}$, Вт/(м·К)	$\Lambda_{ \text{св.пр.ф.}}$, нм	$\Lambda_{\perp\text{св.пр.ф.}}$, нм	Толщина монослоя Δ , нм
Графен	5000	475	645		0,34
h-BN	751		100	7,5	0,33
Воздух	$2,6 \times 10^{-2}$		—	—	—

Результаты и обсуждение

Ввиду отсутствия в открытых научных работах экспериментальных или расчетных значений теплопроводности для наносвитков h-BN, для первичной проверки адекватности модели была выбрана структурно-аналогичная система — трехслойный углеродный наносвиток. Его теплопроводность была рассчитана по формулам (1)–(8) и сопоставлена с результатами численного эксперимента, представленными в работе [12]. Анализ полученных количественных результатов в настоящей работе с данными в работах [12] стало основанием для применения разработанного метода к системе с многослойными наносвитками из h-BN. Такой двухэтапный подход позволяет минимизировать неопределенность, связанную с параметризацией межатомных потенциалов и граничными условиями, и обеспечивает достоверность итоговых прогнозов для нового, ранее не изученного материала.

В таблице приведены известные справочные данные об исследуемых материалах для графена [19, 23–25], h-BN [26, 27] и воздуха [28], а также расчетные значения длины свободного пробега фононов в материале $\Lambda_{\text{св.пр.ф.}}$ по формуле (3) при температуре $T = 300$ К.

Результаты расчетов теплопроводности многослойных углеродных наносвитков, включая результаты численного эксперимента, отмеченные точками [12], и ее зависимость от количества слоев N представлены на рис. 5.

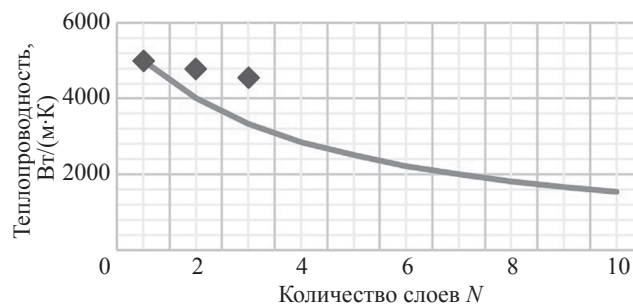


Рис. 5. Зависимость теплопроводности многослойного углеродного наносвитка от количества слоев (результаты аналитического расчета и численного эксперимента [12])

Fig. 5. Dependence of thermal conductivity of a multilayer carbon nanoscroll on the number of layers (results of analytical calculation and numerical experiment [12])

Результаты расчета теплопроводности многослойных углеродных наносвитков прошли валидацию путем сравнения с результатами молекулярно-динамического моделирования [12] (рис. 5). Результаты сравнения подтверждают корректность и надежность разработанной методики.

На основании полученных удовлетворительных результатов расчетов теплопроводности углеродных наносвитков и адекватности модели рассмотрим расчеты по формулам (1)–(8) для перспективной аналогичной структуры многослойных наносвитков из h-BN.

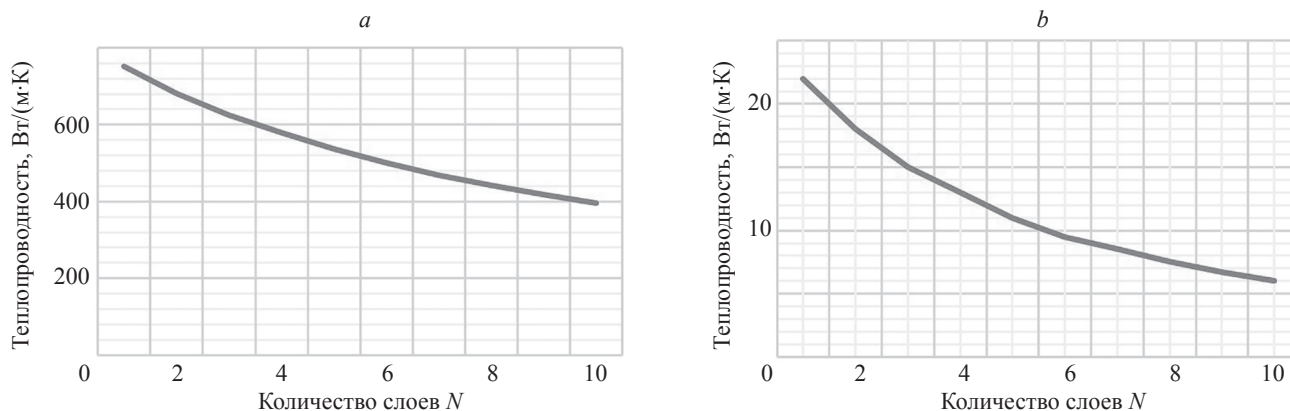


Рис. 6. Зависимость теплопроводности многослойного наносвитка из h-BN от количества слоев: в продольном (a) и поперечном (b) направлениях

Fig. 6. Dependence of thermal conductivity of a multilayer nanoscroll made of h-BN depends on the number of layers: in the longitudinal (a) and transverse (b) directions

На рис. 6 приведены зависимости теплопроводности в продольном и поперечном направлениях многослойных наносвитков h-BN от количества слоев N .

Продольная теплопроводность λ_{\parallel} наносвитка из h-BN снижается с увеличением N вследствие накопления эффекта межслойного рассеяния. При переходе от однослойной ($N = 1$) к десятислойной ($N = 10$) структуре λ_{\parallel} материала снижается с 751 до 395 Вт/(м·К), что составляет уменьшение на 47%. Добавление новых слоев к уже многослойной структуре оказывает меньшее влияние на λ_{\parallel} , чем формирование первых нескольких слоев. Сравнение с углеродными наносвитками показывает, что h-BN демонстрирует меньшую чувствительность к увеличению N . Для графена снижение теплопроводности при переходе от $N = 1$ к $N = 10$ составляет 69%. Это различие объясняется меньшим значением параметра γ для h-BN, что может быть связано с более совершенным межслойным контактом в структуре h-BN.

Поперечная теплопроводность λ_{\perp} наносвитков из h-BN также уменьшается с увеличением N от 22 Вт/(м·К) при $N = 1$ до 6 Вт/(м·К) при $N = 10$ (снижение на 73%). Интенсивное снижение λ_{\perp} наносвитка h-BN связано с дополнительным влиянием граничного рассеяния в наномасштабных элементах модели. Абсолютные значения λ_{\perp} наносвитков для h-BN существенно превышают аналогичные показатели для углеродных наносвитков (3,14 Вт/(м·К) при $N = 10$), что объясняется как более высокой исходной теплопроводностью материала, так и меньшим параметром межслойного рассеяния.

Анизотропия теплопроводности h-BN, определяемая как отношение продольной теплопроводности к поперечной, демонстрирует монотонный рост с увеличением числа слоев — от 34 при $N = 1$ до 66 при $N = 10$ (рис. 7).

Такое поведение качественно отличается от зависимости, наблюдаемой для углеродных наносвитков, где анизотропия слабо изменяется с ростом N . Основной причиной роста анизотропии в случае h-BN является быстрое снижение поперечной теплопроводности по сравнению с продольной. За десятикратное увеличение N значение поперечной теплопроводности уменьшается в 3,7 раза, в то время как продольная теплопроводность остается вблизи своего максимального значения благодаря компенсирующему влиянию роста объемной доли материала.

Примечательно, что в сравнении с обычными нанотрубками многослойные наносвитки выигрывают за счет специфической архитектуры «свитка», которая обеспечивает независимое управление числом слоев, что позволяет оптимизировать теплопроводность и минимизировать влияние внутренней воздушной области [1, 2, 21, 29, 30].

Многослойные наносвитки из h-BN обладают умеренно высокой продольной теплопроводностью, которая слабее зависит от числа слоев, и более высокой поперечной теплопроводностью. Это делает h-BN

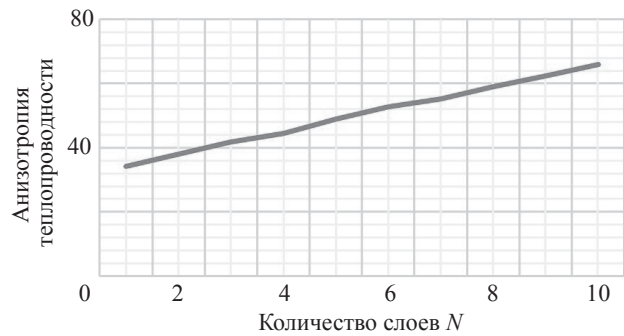


Рис. 7. Зависимость анизотропии теплопроводности многослойного наносвитка h-BN от количества слоев

Fig. 7. Dependence of the thermal conductivity anisotropy ratio of a multilayer h-BN nanoscroll on the number of layers

структуры потенциально более предпочтительными для применений, требующих эффективного отвода тепла в направлениях, отличных от оси нанобъекта, например, в композитных тепловых интерфейсных материалах.

Заключение

Представлена аналитическая модель расчета эффективной анизотропной теплопроводности многослойных наносвитков на основе теории обобщенной проводимости. Модель учитывает геометрические параметры «свитка» (диаметр, число слоев), анизотропию тепловых свойств материала и дополнительное фоновое рассеяние на межслойных границах, описываемое введенным параметром γ .

Предложенный подход успешно прогнозирует теплопроводность слоистых наноструктур. Валидация путем сравнения с молекулярно-динамическим моделированием подтвердила адекватность модели для инженерных оценок; основной источник погрешностей — вариабельность параметра межслойного рассеяния, зависящего от качества синтеза, дефектов и структуры.

Расчеты для многослойных наносвитков из гексагонального нитрида бора позволили установить количественные закономерности влияния числа слоев на их теплопроводность. Полученные результаты подчеркивают высокий потенциал использования многослойных наносвитков из гексагонального нитрида бора в качестве теплоотвода в композитных тепловых интерфейсных материалах и диэлектрических подложек для графена или дихалькогенидов переходных металлов.

Светлой памяти научного руководителя Юрия Петровича Заричняка (1937–2024) и с сердечной благодарностью за плодотворное руководство, ценные советы и вклад в формирование идей настоящей работы.

Литература

1. Aigbodion V.S., Alayyaf A.A., Ozoude C.J. Understanding the anti-corrosion characteristics of surface modification of h-BN and carbon nanotubes/magnesium composites in simulated seawater // *RSC Advances*. 2024. V. 14. N 33. P. 24152–24164. <https://doi.org/10.1039/d4ra04076g>
2. Syduzzaman M., Islam Saad M.S., Piam M.F., Talukdar T.A., Shobdo T.T., Pritha N.M. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry // *Results in Materials*. 2024. V. 25. P. 100654. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100654>
3. Chen H., Chen S. The fracture behaviors of carbon nanotube and nanoscroll reinforced silicon matrix composites // *Carbon*. 2014. V. 67. P. 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.10.004>
4. Watanabe K., Taniguchi T., Kanda H. Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal // *Nature Materials*. 2004. V. 3. P. 404–409. <https://doi.org/10.1038/nmat1134>
5. Dean C.R., Young A.F., Meric I., Lee C., Wang L., Sorgenfrei S., et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics // *Nature Nanotechnology*. 2010. V. 5. N 10. P. 722–726. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.172>
6. Dean C.R., Young A.F., Cadden-Zimansky P., Wang L., Ren H., Watanabe K., et al. Multicomponent fractional quantum Hall effect in graphene // *Nature Physics*. 2011. V. 7. P. 693–696. <https://doi.org/10.1038/nphys2007>
7. Cui X., Lee G.H., Kim Y.D., Arefe G., Huang P.Y., Lee C.-H., et al. Multi-terminal transport measurements of MoS₂ using a Van der Waals heterostructure device platform // *Nature Nanotechnology*. 2015. V. 10. N 6. P. 534–540. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.70>
8. Chan M.Y., Komatsu K., Li S.-L., Xu Y., Darmawan P., Kuramochi H., et al. Suppression of thermally activated carrier transport in atomically thin MoS₂ on crystalline hexagonal boron nitride substrates // *Nanoscale*. 2013. V. 5. N 20. P. 9572–9576. <https://doi.org/10.1039/c3nr03220e>
9. Lee G.H., Yu Y.-J., Cui X., Petrone N., Lee C.-H., Choi M.S., et al. Flexible and transparent MoS₂ field-effect transistors on hexagonal boron nitride-graphene heterostructures // *ACS Nano*. 2013. V. 7. N 9. P. 7931–7936. <https://doi.org/10.1021/nn402954e>
10. Liu Y., Ong Z.-Y., Wu J., Zhao Y., Watanabe K., Taniguchi T., et al. Thermal conductance of the 2D MoS₂/h-BN and graphene/h-BN interfaces // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 43886. <https://doi.org/10.1038/srep43886>
11. Kaneda M., Zhang W., Liu Z., Gao Y., Maruyama M., Nakanishi Y., et al. Nanoscrolls of Janus monolayer transition metal dichalcogenides // *ACS Nano*. 2024. V. 18. N 4. P. 2772–2781. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c05681>
12. Wang Y., Zhang Y. Superior thermal conductivity of carbon nanoscroll based thermal interface materials // *Proc. of the IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. 2015. P. 1234–1239. <https://doi.org/10.1109/ectc.2015.7159754>
13. Pietrak K., Wisniewski T.S. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials // *Journal of Power Technologies*. 2015. V. 95. N 1. P. 14–24.
14. Эдвabник В.Г. Теория обобщённой проводимости. Новосибирск: Наука, 2019. 212 с.
15. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 247 с.
16. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1974. 264 с.
17. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества. Учеб. пособие. Томск: STT, 2016. 48 с.
18. Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А. Оценка параметров расчетных моделей теплопроводности композиционных материалов с полимерным связующим по экспериментальным данным // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2020. Т. 18. № 4. С. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>
19. Заричняк Ю.П., Аливердиев А.А., Алексеев Е.В., Савватеева М.В., Ходунков В.П. Экстремальная анизотропия теплопроводности одностенных углеродных нанотрубок со структурой свитка-рулона // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2024. № 3. С. 2430701.
20. Fujii M., Zhang X., Xie H.Q., Ago H., Takahashi K., Ikuta T., et al. Measuring the thermal conductivity of a single carbon nanotube //

References

1. Aigbodion V.S., Alayyaf A.A., Ozoude C.J. Understanding the anti-corrosion characteristics of surface modification of h-BN and carbon nanotubes/magnesium composites in simulated seawater. *RSC Advances*, 2024, vol. 14, no. 33, pp. 24152–24164. <https://doi.org/10.1039/d4ra04076g>
2. Syduzzaman M., Islam Saad M.S., Piam M.F., Talukdar T.A., Shobdo T.T., Pritha N.M. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. *Results in Materials*, 2024, vol. 25, pp. 100654. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100654>
3. Chen H., Chen S. The fracture behaviors of carbon nanotube and nanoscroll reinforced silicon matrix composites. *Carbon*, 2014, vol. 67, pp. 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.10.004>
4. Watanabe K., Taniguchi T., Kanda H. Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal. *Nature Materials*, 2004, vol. 3, pp. 404–409. <https://doi.org/10.1038/nmat1134>
5. Dean C.R., Young A.F., Meric I., Lee C., Wang L., Sorgenfrei S., et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, no. 10, pp. 722–726. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.172>
6. Dean C.R., Young A.F., Cadden-Zimansky P., Wang L., Ren H., Watanabe K., et al. Multicomponent fractional quantum Hall effect in graphene. *Nature Physics*, 2011, vol. 7, pp. 693–696. <https://doi.org/10.1038/nphys2007>
7. Cui X., Lee G.H., Kim Y.D., Arefe G., Huang P.Y., Lee C.-H., et al. Multi-terminal transport measurements of MoS₂ using a Van der Waals heterostructure device platform. *Nature Nanotechnology*, 2015, vol. 10, no. 6, pp. 534–540. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.70>
8. Chan M.Y., Komatsu K., Li S.-L., Xu Y., Darmawan P., Kuramochi H., et al. Suppression of thermally activated carrier transport in atomically thin MoS₂ on crystalline hexagonal boron nitride substrates. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, no. 20, pp. 9572–9576. <https://doi.org/10.1039/c3nr03220e>
9. Lee G.H., Yu Y.-J., Cui X., Petrone N., Lee C.-H., Choi M.S., et al. Flexible and transparent MoS₂ field-effect transistors on hexagonal boron nitride-graphene heterostructures. *ACS Nano*, 2013, vol. 7, no. 9, pp. 7931–7936. <https://doi.org/10.1021/nn402954e>
10. Liu Y., Ong Z.-Y., Wu J., Zhao Y., Watanabe K., Taniguchi T., et al. Thermal conductance of the 2D MoS₂/h-BN and graphene/h-BN interfaces. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 43886. <https://doi.org/10.1038/srep43886>
11. Kaneda M., Zhang W., Liu Z., Gao Y., Maruyama M., Nakanishi Y., et al. Nanoscrolls of Janus monolayer transition metal dichalcogenides. *ACS Nano*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 2772–2781. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c05681>
12. Wang Y., Zhang Y. Superior thermal conductivity of carbon nanoscroll based thermal interface materials. *Proc. of the IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2015, pp. 1234–1239. <https://doi.org/10.1109/ectc.2015.7159754>
13. Pietrak K., Wisniewski T.S. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. *Journal of Power Technologies*, 2015, vol. 95, no. 1, pp. 14–24.
14. Edvabnik V.G. *Theory of Generalized Conductivity*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2019, 212 p. (in Russian)
15. Dul'nev G.N., Novikov V.V. *Transfer Processes in Inhomogeneous Media*. Leningrad, Energoatomizdat, 1991, 247 p. (in Russian)
16. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials*. Reference book. Leningrad, Energy Publ., 1974, 264 p. (in Russian)
17. Krajinov A.Yu. *Heat Transfer Fundamentals. Heat Transfer Through a Layer of Material*. Textbook. Tomsk, STT, 2016, 48 p. (in Russian)
18. Sulaberidze V.Sh., Skorniakova E.A. Estimation of thermal conductivity calculation model parameters for composite materials with a polymer binder based on experimental data. *Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 57–64. (in Russian). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>
19. Zarichnyak Yu.P., Aliverdiev A.A., Alekseev E.V., Savvateeva M.V., Khodunkov V.P. Extreme anisotropy of thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes with a scroll-roll structure. *Journals of Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University*, 2024, no. 3, pp. 2430701. (in Russian)
20. Fujii M., Zhang X., Xie H.Q., Ago H., Takahashi K., Ikuta T., et al. Measuring the thermal conductivity of a single carbon nanotube.

- Physical Review Letters. 2005. V. 95. N 6. P. 065502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.065502>
21. Yu C., Shi L., Yao Z., Li D., Majumdar A. Thermal conductance and thermopower of an individual single-wall carbon nanotube // *Nano Letters*. 2005. V. 5. N 9. P. 1842–1846. <https://doi.org/10.1021/nl051044e>
 22. Шевченко О.Ю. Основы физики твердого тела. СПб: НИУ ИТМО, 2010. 76 с.
 23. Zhang Y.Y., Pei Q.X., Wang C.M. A molecular dynamics investigation on thermal conductivity of graphynes // *Computational Materials Science*. 2012. V. 65. P. 406–410. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.07.044>
 24. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C. Superior thermal conductivity of single-layer graphene // *Nano Letters*. 2008. V. 8. N 3. P. 902–907. <https://doi.org/10.1021/nl0731872>
 25. Ghosh S., Calizo I., Teweldebrhan D., Pokatilov E.P., Nika D.L., Balandin A.A., et al. Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits // *Applied Physics Letters*. 2008. V. 92. N 15. P. 151911. <https://doi.org/10.1063/1.2907977>
 26. Bhattacharjee A., Jiang H., Li L., Huang S., Chen Y.I., Cai Q. Thermal transport property of boron nitride nanosheets // *Applied Physics Reviews*. 2024. V. 11. N 4. P. 041322. <https://doi.org/10.1063/5.0213741>
 27. Антонова И.В. Вертикальные гетероструктуры на основе графена и других монослойных материалов // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50. № 1. С. 67–82.
 28. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
 29. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
 30. Елецкий А.В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. № 3. С. 225–242.
- Physical Review Letters*, 2005, vol. 95, no. 6, pp. 065502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.065502>
21. Yu C., Shi L., Yao Z., Li D., Majumdar A. Thermal conductance and thermopower of an individual single-wall carbon nanotube. *Nano Letters*, 2005, vol. 5, no. 9, pp. 1842–1846. <https://doi.org/10.1021/nl051044e>
 22. Shevchenko O.Yu. *Fundamentals of Solid State Physics*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2010, 76 p. (in Russian)
 23. Zhang Y.Y., Pei Q.X., Wang C.M. A molecular dynamics investigation on thermal conductivity of graphynes. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 65, pp. 406–410. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.07.044>
 24. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 902–907. <https://doi.org/10.1021/nl0731872>
 25. Ghosh S., Calizo I., Teweldebrhan D., Pokatilov E.P., Nika D.L., Balandin A.A., et al. Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 15, pp. 151911. <https://doi.org/10.1063/1.2907977>
 26. Bhattacharjee A., Jiang H., Li L., Huang S., Chen Y.I., Cai Q. Thermal transport property of boron nitride nanosheets. *Applied Physics Reviews*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 041322. <https://doi.org/10.1063/5.0213741>
 27. Antonova I.V. Vertical heterostructures based on graphene and other 2D materials. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 1, pp. 66–82. <https://doi.org/10.1134/s106378261601005x>
 28. Vargaftik, N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 720 p. (in Russian)
 29. Mischev M.A., Mischev I.M. *Fundamentals of Heat Transfer*. Moscow, Energy Publ., 1977, 344 p. (in Russian)
 30. Eletskiy A.V. Transport properties of carbon nanotubes. *Physics-Uspeski*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 209–224. <https://doi.org/10.3367/ufne.0179.200903a.0225>

Авторы

Савватеева Мария Витальевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-2562-1173>, mashanyasav@mail.ru

Пилипенко Николай Васильевич — доктор технических наук, профессор, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7006938207](https://orcid.org/0000-0001-9328-3166), <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>, pilipenko38@mail.ru

Баранов Игорь Владимирович — доктор технических наук, профессор, директор ОЦ «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57209773690](https://orcid.org/0000-0003-0595-368X), <https://orcid.org/0000-0003-0595-368X>, ivbaranov@itmo.ru

Аливердиев Абутраб Александрович — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал ОИВТ РАН, Махачкала, 367030, Российская Федерация; профессор, Дагестанский государственный университет, Махачкала, 367000, Российская Федерация, [sc 6701343109](https://orcid.org/0000-0003-1650-3633), <https://orcid.org/0000-0003-1650-3633>, aliverdi@mail.ru

Колодийчук Павел Андреевич — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58038475100](https://orcid.org/0000-0002-9984-1613), <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>, pkolodiychuk@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2025
Одобрена после рецензирования 26.02.2026
Принята к печати 20.03.2026

Authors

Mariya V. Savvateeva — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-2562-1173>, mashanyasav@mail.ru

Nikolay V. Pilipenko — D.Sc., Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7006938207](https://orcid.org/0000-0001-9328-3166), <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>, pilipenko38@mail.ru

Igor V. Baranov — D.Sc., Professor, Director of the Education Center “Energy-Efficient Engineering Systems”, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57209773690](https://orcid.org/0000-0003-0595-368X), <https://orcid.org/0000-0003-0595-368X>, ivbaranov@itmo.ru

Abutrab A. Aliverdiev — D.Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Chief Researcher, Institute for Problems of Geothermics and Renewable Energy Research — Makhachkala subsidiary of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367030, Russian Federation; Professor, Dagestan State University, Makhachkala, 367000, Russian Federation, [sc 6701343109](https://orcid.org/0000-0003-1650-3633), <https://orcid.org/0000-0003-1650-3633>, aliverdi@mail.ru

Pavel A. Kolodiychuk — PhD of Engineering Sciences, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58038475100](https://orcid.org/0000-0002-9984-1613), <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>, pkolodiychuk@itmo.ru

Received 29.12.2025
Approved after reviewing 26.02.2026
Accepted 20.03.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»