

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 62.403

Моделювання процесів теплообміну в мікромеханічних перетворювачах на основі добавок наночасток графена

Б. Б. Черниш¹, С. В. Артеменко²✉¹⁻²Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ²sergey.artemenko@gmail.comORCID: ²<https://orcid.org/0000-0002-1398-1472>

Вивчення термодинамічних та електричних властивостей мікромеханічних перетворювачів дає змогу краще зрозуміти за якими принципами відбуваються процеси в наноматеріалах, та за допомогою яких комбінацій послідовності дій можливо впливати на ці процеси. Основою мікромеханічного сенсорів є вбудовані наноструктуровані матеріали, які являються основою в якості нових матеріалів що мають задані властивості. Види генеалогічного дерева графена: графіт – багатопшаровий графен, фуллерен (C_{60}) – упакований графен, вуглецеві нанотрубки (CNT) – згорнутий графен, при додаванні до струмопровідних полімерів створюють нові матеріали з певними властивостями які потрібно дослідити. Запропоновано алгоритм розрахунку термодинамічних властивостей середовищ на основі рівняння стану NIST (National Institute of Standards and Technologies) при різних концентраціях наночасток графена що змішуються з струмопровідним полімером *Pedot:PSS*. Проведені розрахунки показали, що більшим значенням теплопровідності відповідають нижчі максимальні температури графенового шару, а збільшення потужності теплового потоку призводить до збільшення максимальної температури. Наведено термодинамічні властивості розчину карбонових нанотрубок зі струмопровідним полімером. Запропоновані регулярні та сингулярні частини термодинамічної поверхні референтної рідини та нанофлюїду (концентрація наночастинок у кількості $< 3\%$ у зведеному вигляді). Розглянуто альтернативний підхід до інтенсифікації теплообміну на основі концепції нанофлюїдів, тобто модифікації властивостей базисної сполуки за рахунок наноструктур. Теоретично передбачено резистивну залежність від температури. Описано результати розрахунків фазової рівноваги для флюїдних сполук. Показано, що виробництво наноребер є однією з найбільш актуальних проблем застосування нанотехнологій в теплоенергетиці.

Ключові слова: Струмопровідний полімер; Структурований вуглець; Вуглецеві сполуки; Нанофлюїди; Мікромеханічні перетворювачі; Термодинамічні властивості

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i2.2022>

© The Author(s) 2021. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Теплові та електричні властивості графену – це актуальна область досліджень завдяки надзвичайним властивостям тепло, та електропровідності графена та його потенціалу для застосування в системах термічного управління.

Вимірювана теплопровідність графена знаходиться в інтервалі 3000-5000 Вт/м·К при кімнатній

температурі, що є винятковим показником у порівнянні з теплопровідністю піролітичного графіту близько 2000 Вт⁻¹·К⁻¹ при кімнатній температурі. Однак існують інші дослідження, які вважають, що це число перебільшено, і що теплопровідність графена у площині при кімнатній температурі складає близько 2000-4000 Вт⁻¹·К⁻¹ для вільно підвішених зразків. Ця цифра залишається серед найвищих з усіх відомих матеріалів.

Графен вважається відмінним теплопровідником, і ряд досліджень виявили, що він характеризується необмеженим потенціалом теплопровідності, котрий залежить від структурованості та розміру зразка. Цей факт суперечить закону теплопровідності (закону Фур'є) в мікросвіті. В комп'ютерних симуляціях

Графен вважається відмінним теплопровідником, і ряд досліджень виявили, що він характеризується необмеженим потенціалом теплопровідності, котрий залежить від структурованості та розміру зразка. Цей факт суперечить закону теплопровідності (закону Фур'є) в мікросвіті. В комп'ютерних симуляціях та експериментах, встановлено, що чим більше сегмент графена, тим більше теплоти він може передати. Теоретично, графен може поглинути необмежену кількість теплоти. Термоперенесення відбувається на молекулярному рівні, коли теплова енергія поглинається поверхнею і викликає мікроскопічні зіткнення частинок і рух електронів у цьому тілі. У процесі вони стикаються один з одним і передають енергію своєму «сусідові». Процес триватиме до тих пір, поки буде додаватися тепло [1].

Теплопровідність збільшується логарифмічно, і дослідники вважають, що це може бути пов'язано зі стабільним способом зчеплення в 2D матеріалі. Оскільки графен є значно стійкішим до розриву, ніж сталь, а також легкий і гнучкий, його провідність може мати деякі привабливі реальні застосування. Ще однією з головних властивостей структурованого вуглецю є його електричні показники. В залежності від атомної структури вуглецю можливо задати певні параметри електропровідності [2].

2. Мікромеханічний перетворювач льоду на основі PEDOT

В цій частині розглядається мікромеханічний перетворювач, що побудований з графену та струмопровідного полімеру, описуються його фізичні властивості. Датчики для виявлення льоду використовуються в багатьох сферах людської діяльності, включаючи контроль навколишнього середовища, авіаційну, морську та наземну техніку. На сьогодні використовуються ультразвукові та ємкісні датчики, проте вони габаритні, схематично складні та дорогі. Дана розробка в перспективі може використовуватись як дешевий, простий, гнучкий та тонкий датчик по виявленню води та

попередженню утворенню льоду. Тому дослідження нових хімічних сполук та дослідження їхніх нових властивостей є перспективним напрямком на сьогоднішній день. На рис. 1 показано структуру плівки полімера без наявності води, де контакт між графеновими провідниками та полімером можна вважати 100%, а на рис. 2 зображено з наявністю води, де чутлива поверхня набухає та зморщується, що внаслідок зменшує площу контакту між полімером та провідниками.



Рисунок 1 – Структура плівки полімера без наявності води

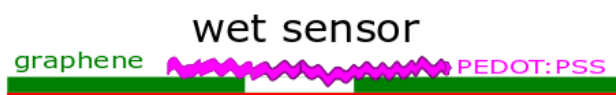


Рисунок 2 – Деградація структури полімера при контакті з водою

Під час набухання полімеру його поверхня змінює свої геометричні параметри. На рис. 3 показана структурна схема мікромеханічного перетворювача на основі струмопровідного полімеру та графенових провідників.

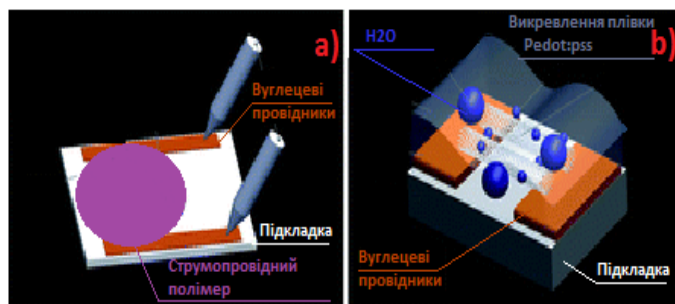


Рисунок 3 – Структурна схема: а) будова мікромеханічного перетворювача; б) викривлення чутливої плівки при взаємодії з водою [3]

Останнім часом провідні структури на полімерно-графеновій основі широко вивчаються для застосування в нових сферах людської діяльності. Вони можуть бути використані для виготовлення різних датчиків, наприклад, для виявлення точки кристалізації (H_2O) з метою запобігання намерзання льоду. Такі навички потрібні в багатьох сферах: авіація, морський транспорт, альтернативна енергетика, автомобілі та ін. [4].

Оскільки матеріали, що використовуються

для іммобілізації ферментів, можуть запобігати перенесенню електронів, таким чином, в цьому дослідженні був розроблений датчик, котрий здійснює своє функціонування по іншому принципу, а саме по принципу реакції впливу на чутливу ділянку сенсора. Полі (3,4-етилendio-ксітіофен): полі (стіролсульфонат) (PEDOT: PSS) є одним з провідних полімерів, який був досліджений для використання в якості хімічних та фізичних сенсорів.

Графенові композити з провідними полімерами можуть поліпшити чутливі властивості завдяки чудовій провідності, високої стабільності і хорошій біосумісності. Щоб спростити використання графена в нанопристрої, пропонується перетворення двовимірного (2D) графена в 0D графенові квантові точки (GQD). Дисперсія GQD в звичайних розчинниках має багато переваг в різних сполуках, оброблюваних розчинами. Зокрема GQD вважається найбільш підходящим через низьку вартість, низьку токсичність і екологічність. Заміщення азоту в решітці GQD дає більше активних центрів, які можна використовувати в різних областях, включаючи сенсори. На рис. 4 наведено розподіл температурних полів в листі графену при розміщенні джерела теплоти в центрі листа [5].

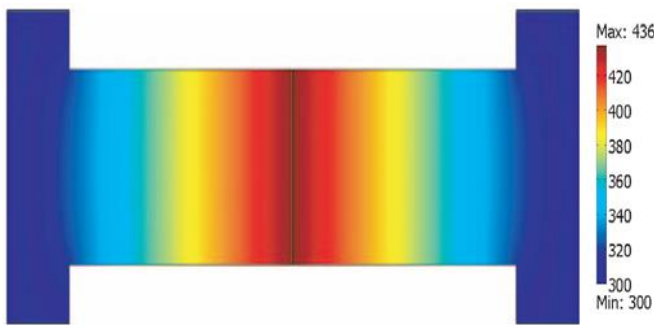


Рисунок 4 – Температурні поля у листі графену

Початкові дані для моделювання поширення теплових полів для набору лінійних джерел теплоти потужністю: 0,5 мВт, 1,0 мВт, 1,5 мВт, 2,0 мВт, 2,5 мВт у графеновому шарі, теплопровідність якого вибирали в діапазоні від $3000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ до $5000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Проведені розрахунки показали, що більшим значенням теплопровідності відповідають нижчі максимальні температури графенового шару, а збільшення потужності теплового потоку призводить до збільшення максимальної температури. Для мінімального джерела теплоти (0,5 мВт) мак-

симальне значення температури майже однаково при будь-якій з конфігурацій листів графену [6].

Система рівнянь для імпульсу

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= 0 \\ U &= 0 \text{ при } y=0, y=H \\ \frac{\partial U}{\partial z} &= 0 \text{ при } z=0, U=0, z=\frac{W_c}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Система рівнянь для енергії

$$\begin{aligned} \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) &= 0 \\ T &= T_w \text{ при } y=0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ при } y=H \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \text{ при } z=0, z=\frac{W}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

де p , T , T_w , U , W , W_c – тиск, температура полімера, температура підкладки, компонента швидкості потоку уздовж координати x , ширина стінки каналу та ширина каналу, відповідно.

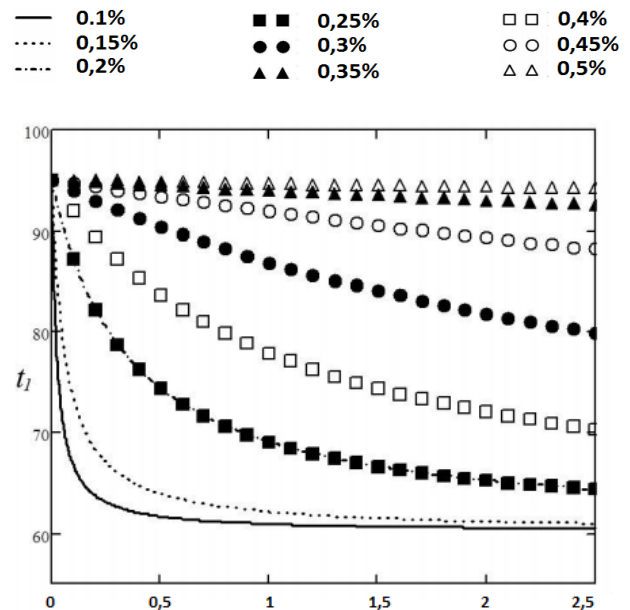


Рисунок 5 – Концентрація наночастинок графену у розчині PSS

Як видно з рис. 5, завдяки вищій теплопровідності нанофлюїда, розподіл температур ділянок теплоносія стає більш однорідним, що підвищує ефективність системи охолодження. Розглянутий альтернативний підхід до інтенсифікації теплообміну шляхом використання нанофлюїдів

як компонента, що додається до струмопровідного полімеру системи, тобто модифікації властивостей базисної сполуки за рахунок додавання наноструктур [7].

Хаотичні коливання наночастинок в сполуці стимулюють мікроконвекцію і перемішування, які впливають на макрохарактеристики нанофлюїдів. Для зменшення Броунівської дифузії наночастинок необхідно «заморозити» хаотичний рух, фіксуючи відносне положення вуглецевих нанотрубок, які мають максимальну теплопровідність серед відомих структур і значно збільшують ефективну площу охолоджуючої поверхні. Це досягається шляхом переходу від нанотрубок (невпорядковані структури в рідині) до наноребер (впорядковані структури на поверхні мікроканалу). Технології створення мініатюрних охолоджуючих елементів, з використанням нанотрубок дозволяють інтенсифікувати відведення теплоти від електронних пристроїв і відкривають можливості створення легших і одночасно жорсткіших ребер. Виробництво таких наноребер є однією з найбільш актуальних проблем застосування нанотехнологій в теплоенергетиці [8].

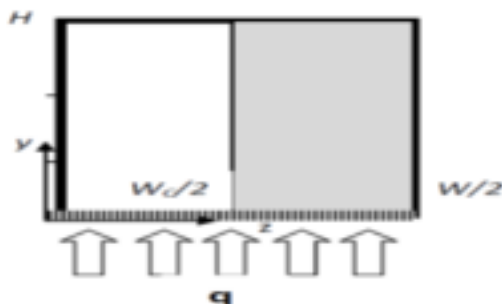


Рисунок 6 – Область чисельного інтегрування мікроканального стоку теплоти

У роботі проведені детальні розрахунки поширення теплового потоку в графенових шарах різної форми. Розрахунки проводили методом кінцевих елементів за допомогою програмного комплексу COMSOL. Форму джерел теплоти, граничні умови і структурні параметри вибирали за літературними даними, що найближче відбивають реальні пристрої. Генерована сітка була вибрана досить дрібною, щоб забезпечити високу точність прогнозування температурних полів. Товщина шару графена відповідає діаметру атома вуглецю ~ 0.35 і імітується двома ідентичними підобластями, кожна з яких представляється паралелепіпедом з розмірами $W \times 2L \times h$ (рис. 8). Поверхня контакту $W \times h$ є межею, вздовж якої тепловий

потік рухається перпендикулярно шару графена (рис. 7а,б).

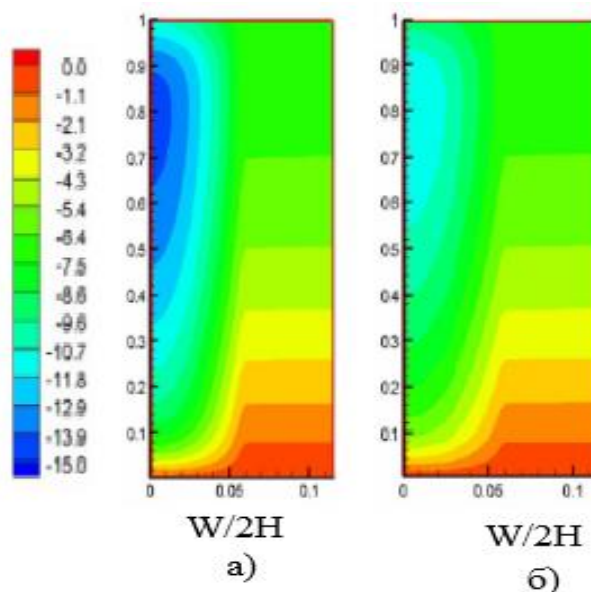


Рисунок 7 – Термічний опір мікроканальної системи охолодження для різних теплоносіїв: а) вода; б) вода + нанотрубки (концентрація $V_n = 2\%$) [9]

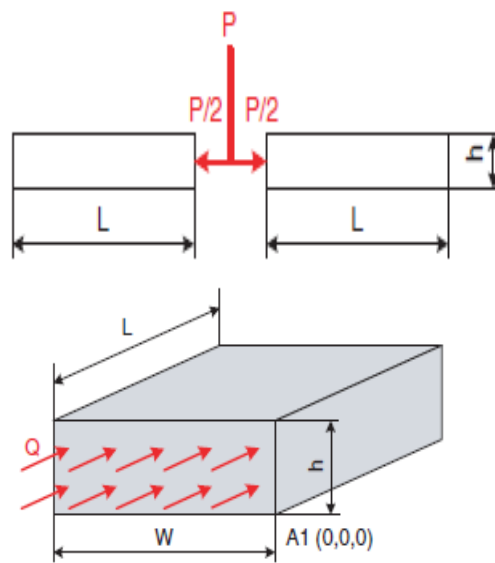


Рисунок 8 – Тепловий потік у графені

Дослідники з університету Райса побудували комп'ютерні моделі на рівні атома рівня графенових аркушів графена, з'єднаних з ковалентно зв'язаними вуглецевими нанотрубками, і виявили, що маніпулювання зв'язаннями між нанотрубками та графеном має значний вплив на здатність матеріалу спрямовувати тепло. Група заявила, що це може виявитись важливим, оскільки електронні пристрої скорочуються і вимагають більш складних радіаторів.

Дослідники, які вивчають або працюють над перетворенням графенів, мають насамперед розглянути дві характеристики теоретичного матеріалу: довжину стовпів та їх відстань один від одного. Нове дослідження показує, що треба також розглянути третій параметр – характер з'єднання між графеном і нанотрубками [12].

На рис. 9,10 показана орієнтація з'єднань графенових нанотрубок, де чітко видно повздовжні та поперечні сплетіння, від характеру сплетіння залежать електричні, фізичні (міцність) та теплові характеристики матеріалу.

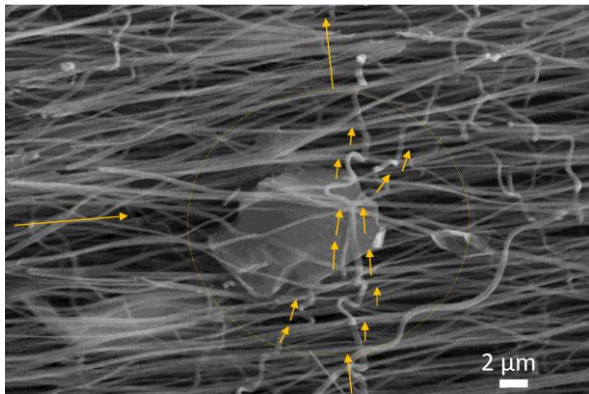


Рисунок 9 – Орієнтація графенових нанотрубок, стрілками показані поперечно орієнтовані сплетіння

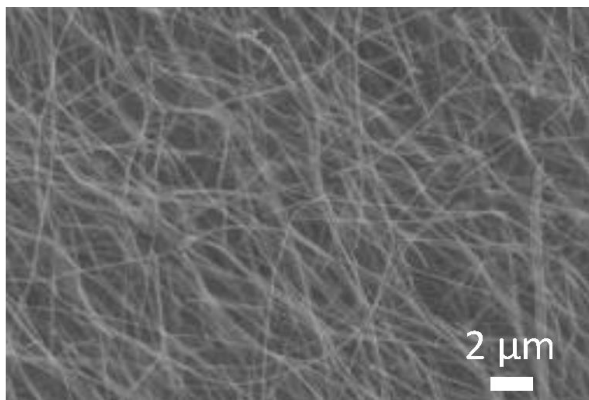


Рисунок 10 – Орієнтація волокна нанотрубок

Безшовне з'єднання плоского графена з круглими нанотрубками потребує коректування їх характеристик вуглецевих кілець. Найпростіший спосіб – надати половину кільця на стику додаткового атому. Шість семичленних кілець, що чергуються із шістьма кільцями із шести членами, дозволяють листові зробити оберт на 90 градусів, щоб стати трубкою.

Однак, це, здається, не є оптимальною конфігурацією для транспортування теплоти.

Слід інтуїтивно очікувати, що зморшки змен-

шують термічний транспорт. З іншого боку, термічний транспорт через графен «в площині» стає швидшим за рахунок зморшок. Чим менше кільця в переходах між нанотрубками та графенами, тим менше розсіювання теплонесучих фононів [13].

Вимірювані вздовж найдовшої площини, моделі з восьмикутниками були на 20% кращі при транспортуванні фононів, ніж без них. Вважають, що перенос фононів через нанотрубки був більш повільний, ніж у графені.

Наближений і неузгоджений опис наявних експериментальних даних є наслідком використання співвідношень для однокомпонентних рідин. Серед конкуруючих процесів інтенсифікації перенесення енергії в нанофлюїдах найбільш важливими є аномальна Броунівська дифузія і термофоріз. Зазначені механізми перенесення важко описати в рамках однокомпонентної моделі ньютонівської рідини і необхідні інші узагальнені підходи. Більш коректний підхід базується на врахуванні не тільки температурних градієнтів, а й градієнтів концентрацій або інших зовнішніх сил в рамках нерівноважної термодинаміки [14].

Для опису процесів конвективного теплообміну при плинні нанофлюїду в мікроканалах була використана двокомпонентна модель, що входить до складу пакету COMSOL

$$\begin{aligned} \nabla \cdot W(\vec{r}, t) &= 0; \\ (\partial_t + W(\vec{r}, t) \cdot \nabla) T(\vec{r}, t) &= \nabla \cdot (\chi \nabla T(\vec{r}, t)); \\ (\partial_t + W(\vec{r}, t) \cdot \nabla) C(\vec{r}, t) &= D \nabla \cdot \left(\frac{k_T}{T(\vec{r}, t)} \nabla T(\vec{r}, t) + \nabla C(\vec{r}, t) \right); \\ (\partial_t + W(\vec{r}, t) \cdot \nabla) W(\vec{r}, t) &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \Delta W(\vec{r}, t) + \frac{\rho}{\rho_0} g. \end{aligned} \quad (3)$$

де W – швидкість потоку; T – температура; C – концентрація; D – коефіцієнт дифузії; χ – коефіцієнт температуропровідності; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

У даній моделі теплопровідність залежала від концентрації наночастинок і враховувала наявність термодифузійних процесів. Густина нанофлюїду представляли у вигляді лінійної комбінації вкладів від густини і концентрації наночастинок:

$$\rho = \rho_0 [1 - \alpha(T - T_0) + \beta(x - x_0)] \quad (4)$$

Виникнення конвекції між двома площинами з різними температурами при зміні різниці тем-

ператур за рахунок концентрації наночастинок ініціює ефект Соре, що приводить, в свою чергу, до зміни теплопровідності в просторі. Збільшення різниці значень теплопровідності між теплими і холодними граничними поверхнями призводить до зміщення процесу виникнення конвекції до більших значень числа Релея.

Для моделювання тривимірних полів температур і швидкостей розглядали стаціонарний ламінарний потік холодоагенту ($Re < 2000$) для поверхні, рівномірно заповненої нанотрубками. Для порівняння ребрена нанотрубками поверхня була порівняна з гладкою поверхнею. Отримані значення швидкості потоку використовували для емпіричної апроксимації середнього коефіцієнта теплопередавання в залежності від обраної геометрії мікроканалу. Типові значення коефіцієнта теплопередавання варіювали в інтервалі $50 \dots 500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Радіаційні поправки не враховували, оскільки розрахунки проводили для низькотемпературної області. [15]

Розглянемо теплопередавання між вуглецевою нанотрубкою та рідиною. Аналіз передавання теплоти в такій системі дозволить передбачити перспективи використання ансамблю вуглецевих нанотрбок як наноребер. На рис. 11 показані результати молекулярно-динамічних розрахунків конфігурації атомної структури системи вода – вуглецева нанотрубка [16].

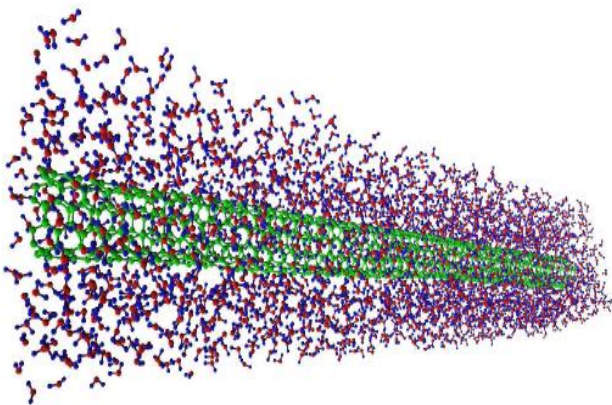


Рисунок 11 – Вуглецева нанотрубка в оточенні молекул води

На рис. 12 показана графічна ілюстрація наноребра. У континуальному наближенні, як температурні поля, так і теплові потоки в одновимірному випадку описуються стандартним рішенням, де знаходяться з періодичних граничних умов для кожної осі.

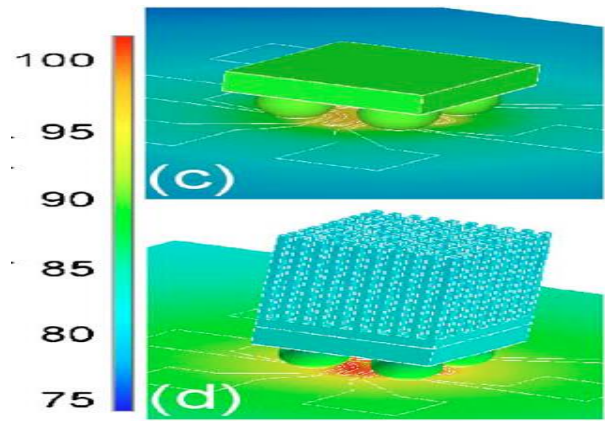


Рисунок 12 – Концептуальний дизайн наноребер для охолодження кремнієвих підкладок

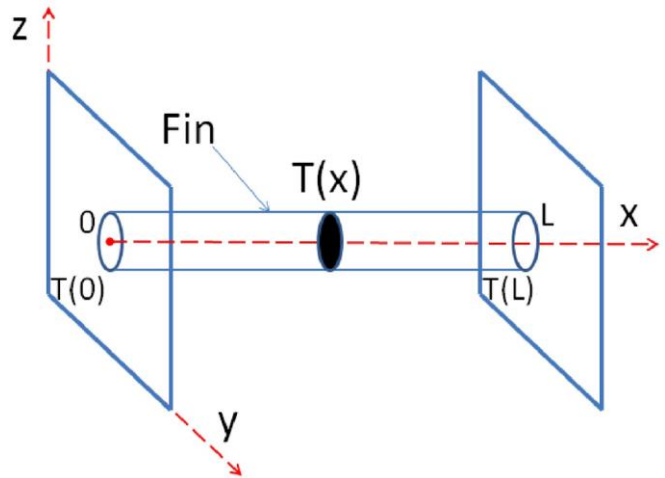


Рисунок 13 – Наноребро в потоці рідини визначає різницю між температурою в довільній точці наноребра $T(x)$ і температурою навколишньої рідини T_w .

Величина визначає різницю між температурою в довільній точці наноребра $T(x)$ і температурою навколишньої рідини T_w .

Стаціонарне рішення має вигляд:

$$\tilde{T}(x) = \tilde{T}(0) \frac{\cosh[m(L/2 - x)]}{\cosh(mL/2)}; \quad (5)$$

$$q_0 = m\lambda S \tilde{T}(0) \tanh(mL/2).$$

Наприклад, для $mL/2 = 0,28$ при $L = 10$ нм тепловий потік q_0 становить близько $3 \cdot 10^{-3}$ Вт. Коефіцієнт ефективності ребра складає близько 0,98 [12].

Технології створення мініатюрних охолоджуючих елементів з використанням нанотрбок дозволяють інтенсифікувати відведення теплоти від електронних пристроїв і відкривають можливості створення більш легких і одночасно більш жорстких ребер. Виробництво таких наноребер є

однією з найбільш актуальних проблем застосування нанотехнологій в теплоенергетиці [16].

3. Висновки

Нанофлюїди демонструють великі теоретичні можливості підвищення ефективності процесів перенесення енергії в системах охолодження, якщо будуть вирішені технологічні проблеми синтезу і стабілізації металевих наночастинок і вуглецевих нанотрубок. Аналіз літературних джерел показує, що основний фактор підвищення ефективності характеристик систем охолодження електронних пристроїв – теплопровідність наноматеріалів.

Поєднання методів підвищення теплопровідності традиційних композитних структур за рахунок добавок наноструктурованих матеріалів і зменшення характеристичної довжини каналів за рахунок створення конструктивних середовищ відкриває шляхи до створення нового покоління теплоносіїв.

Для зменшення Броунівської дифузії наночастинок необхідно «заморозити» хаотичний рух, фіксуючи відносно положення вуглецевих нанотрубок, які значно збільшують ефективну площу охолоджуючої поверхні. Це досягається шляхом переходу від нанотрубок (невпорядковані структури в рідині) до наноребер (впорядковані структури на поверхні мікроканалу), ефективність яких прагне до одиниці

Одержані прикладні результати:

– покращання умов теплопередавання. У зв'язку з тим, що передавання теплоти відбувається через поверхню частки, бажано мати максимально розвинені площі поверхні. Значно більші відносні площі поверхні наночастинок у порівнянні з мікронними розмірами традиційних мікрочастинок сприятимуть підвищенню теплопередавання та стабілізації нанофлюїдів;

– зменшення витрат на прокачування рідин. Для того, щоб досягти збільшення коефіцієнту теплопередавання у традиційних теплоносіях в 2 рази, потрібно в 10 разів підвищити витрати на прокачування. У той же час, при збільшенні в 3 рази коефіцієнту теплопровідності традиційного теплоносія за рахунок добавок наночастинок досягається подвійне підвищення коефіцієнту теплопередавання при тій же швидкості потоку рідини;

– мінімальне засмічення трубопроводів. Наночастки, поведінка яких схожа з молекулами рідини, не руйнують поверхню трубопроводу і не

призводять до засмічення мікроканалів, що грає принципову роль для систем охолодження комп'ютерів;

– мініатюризація теплообмінних систем. Найбільш перспективний напрямок в задачах охолодження електронної апаратури є концепція мініатюризації, оскільки потоки теплоти збільшуються пропорційно квадрату зворотної характеристичної довжини тепловідвідних шляхів, тобто зменшення розміру охолоджуючої системи зумовлює значну інтенсифікацію процесів тепловідведення без збільшення габаритів електронного виробу.

Особистий внесок авторів CRediT

Черниш Б.Б.: перевірка, верифікація, візуалізація, програмне забезпечення, написання – огляд та редагування, адміністрування. **Артеменко С.В.:** концептуалізація, ресурси, методологія, дослідження, формальний аналіз, написання – оригінальний проект.

Література

1. **S. Artemenko, V. Karnaukh, V. Mazur.** Phase Behavior of Liquids Embedded with Graphene Genealogic Tree Nanoparticles // Chapter 3 in the book **L. Bulavin and A. Chalyi** (eds.) *Modern Problems of Molecular Physics, Selected Reviews*, Springer Proceedings in Physics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.
2. **R. Bhowmik, J. Berry, M. F. Durstock and B. J. Leever.** ACS // *Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – Vol. 9. – P. 19269-19277
3. **N. Kim, I. Petsagkourakis, S. Chen, M. Berggren, X. Crispin, M. P. Jonsson and I. Zozoulenko.** *Electric Transport Properties in PEDOT Thin Films, Conjugated Polymers: Properties, Processing, and Applications*. – CRC Press, 2019.
4. **D. Fan, Q. Li, W. Chen, J. Zeng.** Graphene nanofluids containing core-shell nanoparticles with plasmon resonance effect enhanced solar energy absorption // *Solar Energy*. – 2017. – Vol. 158. – P. 1-8.
5. **M. Mehrli, M. K. Ghatkesar, R. Pecnik.** Full-spectrum volumetric solar thermal conversion via graphene/silver hybrid plasmonic nanofluids // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 224. – P. 103-115.
6. **E. Sani, J.P. Vallejo, L. Mercatelli, M.R. Martina, D.D. Rosa, A. Dell'Oro, L. Lugo.** A comprehensive physical profile for aqueous dispersions of

carbon derivatives as solar working fluids // *Applied Science*. – 2020. – Vol. – 10. – P. 528

7. **A. Gimeno-Furio, L. Hernandez, N. Navarrete, R. Mondragon.** Characterisation study of a thermal oil-based carbon black solar nanofluid // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 140. – P. 493-500.

8. **A. Gimeno-Furió, E. Juliá, S. Barison, F. Agresti, C. Friebe, M.H. Buschmann.** Nanofluids as direct solar energy absorbers // *Journal of Nanofluids*. – 2019. – Vol. 8. – P. 17–29.

9. **C. Campos, D. Vasco, C. Angulo, P.A. Burdiles, J. Cardemil, H. Palza.** About the relevance of particle shape and graphene oxide on the behavior of direct absorption solar collectors using metal based nanofluids under different radiation intensities // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 181. – P. 247-257.

10. **E. Sani, N. Papi, L. Mercatelli, G. Zyla.** Graphite/diamond ethylene glycol-nanofluids for solar energy applications // *Renewable Energy*. – 2018. – Vol. 126. – P. 692-698.

11. **I.W. Almanassra, A.D. Manasrah, U.A. Al-Mubaiyedh, T. Al-Ansari, Z.O. Malaibari, M.A. Atieh.** An experimental study on stability and thermal conductivity of water/CNTs nanofluids using different surfactants: A comparison study // *Journal of Molecu-*

lar Liquids. – 2019. – Vol. 304. – P. 111025

12. **R. Gómez-Villarejo, T. Aguilar, S. Hamze, P. Estellé, J. Navas.** Experimental analysis of water-based nanofluids using boron nitride nanotubes with improved thermal properties // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Vol. 277. – P. 93-103

13. **T.J. Choi, S.P. Jang, M.A. Kedzierski.** Effect of surfactants on the stability and solar thermal absorption characteristics of water-based nanofluids with multi-walled carbon nanotubes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 122. – P. 483-490.

14. **F.Q. Wang, M. Hu, Q. Wang.** Ultrahigh thermal conductivity of carbon allotropes with correlations with the scaled Pugh ratio // *Journal of Material Chemistry A*. – 2019. – Vol. 7. – P. 6259-6266.

15. **S. Li, H. Ren, Y. Zhang, X. Xie, K. Cai, C. Li, N. Wei.** Thermal conductivity of two types of 2D Carbon allotropes: A molecular dynamics study // *Nanoscale Research Letters*. – 2019. – Vol. 14.

16. **T. Ambreen, M.H. Kim.** Influence of particle size on the effective thermal conductivity of nanofluids: A critical review // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 26415. – P. 114684.

Отримана в редакції 11.04.2021, прийнята до друку 14.06.2021

Modeling of heat transfer processes in micromechanical transducers based on graphene nanoparticle additives

Bohdan Chernish¹, Sergiy Artemenko²✉

^{1,2}Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ²sergey.artemenko@gmail.com

ORCID: ²<https://orcid.org/0000-0002-1398-1472>

The creation of the thermodynamic powers of the micromechanical transformations gives the ability to better understand the processes in nanomaterials behind the same principles, and for the additional analysis of the after-effects of the possible processes in the process The micromechanical sensor is based on nanostructured materials, which are the basis in the quality of new materials given the power. Types of the graphene genealogical tree: graphite – large-globular graphene, fullerene (C₆₀) – packings of graphene, in carbon nanotubes (CNT) – graphene bends, when added to the conductive polymers, they create new materials with the necessary power. The algorithm for the development of the thermodynamic powers of the middle is proponated on the basis of the standard NIST (National Institute of Standards and Technologies), at low concentrations of graphene nanoparticles, it is possible to change against the string-conducting polymer Pedot: PSS. The calculations showed that lower values of thermal conductivity correspond to lower maximum temperatures of the graphene layer, and an increase in the power of the heat flux leads to an increase in the maximum temperature. The thermodynamic power is induced to break the carbon nanotubes with a string-wire polymer. The proponation of the regular and singular part of the thermodynamic surface of the reference range of the nanofluid (the concentration of nanoparticles in the

amount of $< 3\%$ in the grown vigil). An alternative approach to the intensification of heat transfer based on the concept of nanofluids, i.e. modification of the properties of the basic compound due to nanostructures, is considered. Theoretically, a resistive temperature dependence is predicted. The results of phase equilibrium calculations for fluid compounds are described. It is shown that the production of nanobins is one of the most pressing problems of nanotechnology application in thermal power engineering.

Keywords: String-conducting polymer; Structured carbon; Carbon compounds; Nanofluids; Micromechanical transducers; Thermodynamic properties

References

1. Artemenko, S., Karnaukh, V., Mazur, V. (2017) Phase Behavior of Liquids Embedded with Graphene Genealogic Tree Nanoparticles. Chapter 3 in the book L. Bulavin and A. Chalyi (eds.), *Modern Problems of Molecular Physics, Selected Reviews, Springer Proceedings in Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
2. Bhowmik, R., Berry, J., Durstock, M. F., Leever, B. J. (2017) *ACS. Applied Materials & Interfaces*, 9, 19269-19277.
3. Kim, N., Petsagkourakis, I., Chen, S., Berggren, M., Crispin, X., Jonsson, M., Zozoulenko, P. (2019) Electric Transport Properties in PEDOT Thin Films, Conjugated Polymers: Properties, Processing, and Applications. *CRC Press*.
4. Fan, D., Li, Q., Chen, W., Zeng, J. (2017) Graphene nanofluids containing core-shell nanoparticles with plasmon resonance effect enhanced solar energy absorption. *Solar Energy*, 158, 1-8.
5. Mehrali, M., Ghatkesar, M.K., Pecnik, R. (2018) Full-spectrum volumetric solar thermal conversion via graphene/silver hybrid plasmonic nanofluids. *Applied Energy*, 224, 103-115.
6. Sani, E., Vallejo, J.P., Mercatelli, L., Martina, M.R., Rosa, D.D., Dell'Oro, A., Lugo, L. (2020) A comprehensive physical profile for aqueous dispersions of carbon derivatives as solar working fluids. *Applied Science*, 10, 528.
7. Gimeno-Furio, A., Hernandez, L., Navarrete, N., Mondragon, R. (2019) Characterisation study of a thermal oil-based carbon black solar nanofluid. *Renewable Energy*, 140, 493-500.
8. Gimeno-Furió, A., Juliá, E., Barison, S., Agresti, F., Friebe, C., Buschmann, M.H. (2019) Nanofluids as direct solar energy absorbers. *Journal of Nanofluids*, 8, 17-29.
9. Campos, C., Vasco, D., Angulo, C., Burdiles, P.A., Cardemil, J., Palza, H. (2019) About the relevance of particle shape and graphene oxide on the behavior of direct absorption solar collectors using metal based nanofluids under different radiation intensities. *Energy Conversion and Management*, 181, 247-257.
10. Sani, E., Papi, N., Mercatelli, L., Zyla, G. (2018) Graphite/diamond ethylene glycol-nanofluids for solar energy applications. *Renewable Energy*, 126, 692-698.
11. Almanassra, I.W., Manasrah, A.D., Al-Mubaiyedh, U.A., Al-Ansari, T., Malaibari, Z.O., Atieh, M.A. (2019) An experimental study on stability and thermal conductivity of water/CNTs nanofluids using different surfactants: A comparison study. *Journal of Molecular Liquids*, 304, 111025.
12. Gómez-Villarejo, R., Aguilar, T., Hamze, S., Estellé, P., Navas, J. (2019) Experimental analysis of water-based nanofluids using boron nitride nanotubes with improved thermal properties. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 93-103.
13. Choi, T.J., Jang, S.P., Kedzierski, M.A. (2018) Effect of surfactants on the stability and solar thermal absorption characteristics of water-based nanofluids with multi-walled carbon nanotubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 483-490.
14. Wang, F.Q., Hu, M., Wang, Q. (2019) Ultrahigh thermal conductivity of carbon allotropes with correlations with the scaled Pugh ratio. *Journal of Material Chemistry A*, 7, 6259-6266.
15. Li, S., Ren, H., Zhang, Y., Xie, X., Cai, K., Li, C., Wei, N. (2019) Thermal conductivity of two types of 2D Carbon allotropes: A molecular dynamics study. *Nanoscale Research Letters*, 14.
16. Ambreen, T., Kim, M.H. (2020) Influence of particle size on the effective thermal conductivity of nanofluids: A critical review. *Applied Energy*, 26415, 114684.

Received 11 April 2021
Approved 14 June 2021
Available in Internet 30 June 2021