

Автореферат М  
НБ2

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

**НІКІТІН ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ**

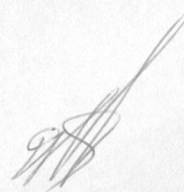
УДК 536.582:62-52 (043.3)

**ТЕПЛОФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
МІКРОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ  
ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова  
теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2005



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки (МОН) України

**Науковий керівник** - кандидат технічних наук, доцент  
**КОСОЙ Борис Володимирович**,  
Одеська державна академія холоду  
МОН України,  
доцент кафедри технічної термодинаміки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**НІКІТЕНКО Микола Іванович**,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
провідний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор  
**КАЛІНІН Лев Георгійович**,  
Одеська національна академія харчових  
технологій МОН України, професор кафедри  
процеси і апарати

**Провідна установа** - Одеський національний політехнічний  
університет МОН України, Одеса

Захист дисертації відбудеться 10 березня 2005 р. о 13.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65026, Україна.

Для ознайомлення можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65026, Україна

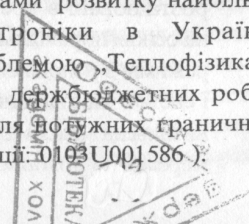
7 лютого 2005 року.

Мілованов В.І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сучасні тенденції в розвитку нових інформаційних технологій зумовили появу компактних і мініатюрних електронних пристроїв з потужнішими і ефективнішими енергетичними показниками, що вимагає розробки і створення принципово нових систем тепловідведення, які безпосередньо інтегровані в електронні пристрої та спроможні забезпечити мінімальні термічні опори між джерелами і стоками теплоти. Швидке зростання величини питомих теплових потоків, зменшення масогабаритних характеристик, екологічні вимоги і економічні показники виявилися нездоланною перешкодою для традиційних систем охолодження. Найбільш перспективними напрямками в створенні нових систем охолодження, яким відводиться центральна роль при проектуванні перспективних мікроелектронних систем, є двофазне охолодження, охолодження зрошенням і методи, що базуються на досягненнях техніки мікроелектромеханічних систем (MEMS) – мікροканалне охолодження і випаровування ультратонких плівок. Потенційний успіх кожного з перерахованих напрямів залежить від створення і розвитку економічно ефективної і науково-обґрунтованої технології, яка б підтвердила свою надійність і працездатність протягом всього життєвого циклу виробу. Однією з основних проблем застосування нових технологій охолодження в промисловому масштабі є труднощі аналітичного моделювання характеристик нестаціонарних температурних полів в системах охолодження, які повинні бути інтегровані в електронні пристрої в процесі проектування і виробництва. Прогнозування температурних полів під впливом заданої конфігурації теплових джерел і стоків в кремнієвих підкладках є ключовим питанням оптимального проектування сучасних мікроелектронних пристроїв. Сумісне застосування комп'ютерно-орієнтованих моделей балансу маси, енергії і імпульсу разом з концепцією паралельного проектування (*concurrent engineering*) виробу в цілому є принципово важливим кроком для аналізу теплових явищ в електронних системах і робить *актуальними* дослідження в галузі розробки нових підходів до управління тепловими потоками високої густини енергії у високоєфективних мікроелектронних системах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Робота виконувалася відповідно до державної науково-технічної програми розвитку найбільш конкурентноздатних напрямів мікроелектроніки в Україні, Координаційного плану НАН України за проблемою „Теплофізика і теплоенергетика”, а також в межах виконання держбюджетних робіт “Створення термоелектричних охолоджувачів для потужних гранично-локалізованих джерел теплоти” (№ держ. реєстрації 0103U001586.)



**Мета і задачі досліджень.** Мета дослідження полягає в розробці теплофізичних моделей відведення теплоти від джерел високої густини енергії, які інтегровані у високоефективні мікроелектронні системи, на основі створення фрактальних мереж мікроканалів для відведення теплоти, що імітують природні транспортні артерії з мінімальними термічними і механічними опорами.

Для досягнення наміченої мети були поставлені і вирішені наступні *основні задачі*:

- теоретичного обґрунтування ефективності відведення і розподілу теплоти від об'єктів з високою густиною енергії за рахунок мережевого асемблювання локальних мікроканалів з одно – і двофазними робочими тілами;
- моделювання шорсткості поверхонь мікроканалів фрактальними і хаотичними структурами, а також оцінки впливу неоднорідностей різної природи на двовимірні і тривимірні температурні поля в мікроканалах різної геометрії;
- розрахункової оцінки граничних габаритних розмірів мікротеплових труб (МТТ) з погляду забезпечення допустимих умов тепломасопереносу і їх конкурентоспроможності відповідно до металевих теплостоків;
- теоретичного обґрунтування недостатності умови механічної нерівноваги для забезпечення циркуляції теплоносія в традиційних МТТ у порівнянні з випарними мікроканалами (ВМК) з малими еквівалентними діаметрами в діапазоні 0,5...4мм;
- ранжирування ефективності систем охолодження в системах термостабілізації електронної апаратури на основі локальних ВМК з неподіленими зонами нагріву і охолодження та мережевих ВМК при однакових температурних режимах, витратах теплоносіїв і геометрії теплопередавальних елементів.

**Об'єктами дослідження** є мережеві системи розподілу і відведення теплоти від джерел високої густини енергії в пристроях електронної техніки різного призначення.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що

- розроблена стратегія проектування інтегрованих мережевих систем відведення і розподілу теплоти від джерел високої густини енергії, які розташовані в кремнієвих підкладках електронних пристроїв;
- на основі порівняльного аналізу ефективності систем забезпечення теплових режимів з неподіленими зонами нагріву і охолодження (локальні ВМК) і систем забезпечення теплових режимів з мережевими ВМК теоретично визначена максимальна теплотехнічна ефективність при об'єднанні ВМК у мережі, що розташовуються в площинах, нормальних до руху теплоносіїв;

- запропоновано підхід до моделювання і управління неоднорідністю стінок мікроканалів для поліпшення процесів переносу енергії та імпульсу, який засновано на фрактальному описі ефектів поверхневої шорсткості уздовж стінок каналів різної геометрії;
  - отримані тривимірні розподіли швидкостей, тисків і температур в реальних моделях електронних пристроїв різного призначення із заданими джерелами тепловиділення при фрактальному асемблюванні мереж ВМК, які підтвердили ефективність відведення теплоти в таких інтегрованих системах в порівнянні з традиційним розподілом каналів, зокрема з паралельним.
- На основі отриманих результатів в дисертації сформульовані і захищаються нові наукові положення:

1. Підвищення ефективності охолодження електронних пристроїв з джерелами високої густини енергії досягається за рахунок створення фрактальних мереж тепловідводящих мікроканалів, що імітують природні транспортні артерії з мінімальними термічними і механічними опорами. Відношення витрат потужності на прокачування робочих тіл у фрактальних мережах в порівнянні з паралельними каналами з тією ж площею сумарної поверхні при технологічно оптимальному рівні галуження рівному п'яти складає 1:3.
2. При температурних режимах, витратах теплоносіїв, геометрії теплопередавальних елементів і нормованих енерговитратах на прокачування робочих тіл, які характерні для систем термостабілізації радіоелектронної апаратури, в системах охолодження з мережевими випарними мікроканалами існують оптимальні поверхні теплопередачі (діаметри теплопередавальних елементів ~15...20мкм), що в 2...7 разів нижче в порівнянні з традиційними системами.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень і результатів визначаються: коректною постановкою задач; перевіркою адекватності теоретичних моделей і експериментальних даних; використанням сучасних математичних методів і програмних засобів моделювання процесів розповсюдження теплоти в суцільних середовищах.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає у створенні комп'ютерно-орієнтованих методів розрахунку і проектування процесів гідродинаміки і теплообміну в системах терморегулювання інтегрованих мікроелектромеханічних пристроїв. Запропоновані рішення про мережеве асемблювання мікроканалів дозволяють вже на стадії проектування здійснити вибір робочих тіл, скоротити об'єм і терміни коштовних експериментальних досліджень. Результати роботи було використано при розробці систем охолодження процесорів з тактовою частотою 5ГГц (за договором з компанією Alliance Marketing Group LLC, США), при виконанні контракту

з фірмою Mainland projects LLC (Великобританія) на виготовлення мікросенсорної системи безпеки автомобілів, а також при конструюванні систем охолодження електронної апаратури ТОВ “Телекарт–Прилад” (Україна).

**Особистий внесок здобувача.** Наведені в дисертаційній роботі результати досліджень отримано здобувачем в межах наукової тематики, яка виконувалася в Одеській державній академії холоду і за контрактами з рядом зарубіжних фірм по проектуванню систем охолодження різноманітних об'єктів електронної техніки. Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні вибору об'єктів дослідження, в зборі й аналізі експериментальної інформації, в проведенні розрахунків температурних полів для моделей фрактальних мереж з різними робочими тілами. У співавторстві сформульовані загальні напрями досліджень і програма їх виконання, а також публікація частини результатів роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень були представлені та обговорювалися на Міжнародній науково-технічній конференції студентів, молодих науковців і фахівців “Молоді науковці у рішенні комплексної програми науково-технічного прогресу країн-членів РЕВ”, (Київ, 1989р.), Міжнародної конференції зі застосування пористих середовищ (Евора, Португалія, 2004р.), 5-му Мінському Міжнародному Форумі з тепломасообміну (Мінськ, Білорусь, 2004р.), конференції “Інформаційні системи і технології” (Одеса, Україна, 2004р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції „Енергетика, енергозбереження, енергосервіс”, (Одеса, Україна, 2004р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено в чотирьох статтях, надрукованих у професійних періодичних журналах, що відповідають вимогам ВАК України; 6 друкувань представлено у вигляді тез доповідей в збірках наукових праць міжнародних і регіональних конференцій.

**Об'єм і структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури і додатків, в яких наведені акти про впровадження результатів роботи. Загальний обсяг роботи – 186 сторінок, включаючи 52 рисунки, 8 таблиць і 208 літературних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, відображено зв'язок з державними програмами і темами, сформульовано мету і задачі дослідження. Наведено нові наукові положення, конкретний особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації і публікації.

**Перший розділ дисертації** присвячено обґрунтуванню і раціональному вибору методів відведення теплоти від джерел енергії мережевими

системами. Висока густина теплових потоків є одним з головних обмежень створення компактніших і досконаліших пристроїв мікроелектроніки. Проблема пошуку раціональних рішень, що задовольняють взаємно протилежні вимоги до проектування мікроохолоджувальних систем, знаходиться в центрі уваги багатьох дослідників. Відмічено значний внесок вітчизняних і зарубіжних вчених М.К.Безродного, Л.Л.Васильєва, Т.Коттера, М.Г.Семени, Г.Ф.Смірнова, Г.Петерсона, Л.С.Піоро та ін.

Найперспективнішим напрямом в задачах охолодження електронної апаратури є концепція мініатюризації, оскільки швидкості тепло- і масообміну збільшуються пропорційно квадрату зворотної характеристичної довжини тепловідводних шляхів, тобто зменшення розміру охолоджуючої системи зумовлює значну інтенсифікацію процесів тепловідведення без збільшення габаритів електронного виробу в цілому. В той же час зменшення розмірів не може відбуватися нескінченно, оскільки надмірні втрати тиску, поява паразитних теплових мостів викликають природні обмеження на зменшення розмірів таких систем.

Рішення цієї проблеми зумовлює необхідність розробки нових систем терморегулювання на субмікронному рівні, які здатні до відведення необхідної теплоти від функціональних елементів електронних пристроїв за рахунок зниження густини теплового потоку та шляхом розподілу його по більшій поверхні з подальшим розсіянням. У роботі виконано критичний аналіз основних фізичних механізмів терморегулювання таких, як: повітряне охолодження, вимушена конвекція, безпосереднє охолодження з фазовими переходами, використання випарних термосифонів, вільне стікання рідких плівок, непряме охолодження та ін. Порівняльний аналіз систем охолодження об'єктів мікроелектроніки продемонстрував, що термодинамічна ефективність виявляється вищою в мікроканаліному способі в порівнянні з мікроструменевим і мікрокраплинним охолодженням. У традиційних системах мікроканалів спостерігається нерівномірний розподіл температур на поверхні підкладки, що викликане перебігом рідини артеріями, на відміну від однорідного розподілу при мікроструменевому і мікрокраплинному способах охолодження. Максимальні значення теплових потоків, що відводяться, спостерігаються при мікроструменевому охолодженні.

Суттєве зменшення розмірів каналів вимагає перегляду або підтвердження існуючих методів опису явищ перенесення енергії, маси і імпульсу. Існують прямо протилежні точки зору на це питання, і в даній роботі здійснено спробу попередньої оцінки ефектів переходу від макро- до мікроканалів. У недавніх роботах Herwig і Hausner (2003) висловлюється точка зору, що майже всі дослідження, в яких знайдені нові ефекти при течії

в мікроканалах, є помилковими і цілком можуть бути пояснені класичними результатами для макроканалів, якщо правильно виконати масштабування відповідних рівнянь. Було проведено аналіз ролі різних наближень необхідних для розуміння і оцінки фізичних процесів в мікроканалах та зроблено висновки, щодо алгоритмів розрахунку мікросистем.

Розглянуто загальну задачу раціонального забезпечення теплових режимів мікроелектронних систем, що полягає в підтримці заданих температурних умов в деякому кінцевому об'ємі –  $V$ , в якому розміщені електронні пристрої – теплогенеруючі елементи. Метою рішення цієї задачі є розробка системи охолодження із стоком теплоти  $q_0$ , що знаходиться на межі, яка відповідає заданому температурному рівню за рахунок оптимального розподілу тепловідводів. Передбачається, що провідність тепловідводів значно вища за провідність розподіленого джерела генерації теплоти. Вперше рішення такого роду задачі для двовимірного випадку було одержано на основі уявлень теорії конструкторів в роботі Бежана і Еррери (Bejan, Errera; 1997), які розглянули архітектуру потоків з мінімальним опором та підтвердили їх біфуркаційну природу. Деревовидна структура теплопровідних шляхів є одним з можливих шляхів оптимального охолодження об'єктів, що генерують потоки теплоти в заданому кінцевому об'ємі.

У дисертації розглядається один з сучасних підходів до проектування мікомасштабних теплообмінних пристроїв, що застосовує метод конструкторів, в якому структура природних і штучних транспортних потоків формується зовнішніми умовами і наперед невідома. Структура транспортних потоків системи, яка нарешті формується, є результатом виконання наступних вимог (Bejan, 2001):

- при заданій геометрії шляхів транспорту маси, імпульсу і енергії повинно бути забезпечено мінімальний опір потокам будь-якої природи;
- при заданих значеннях загальної провідності і поверхні системи необхідно досягти мінімального об'єму займаного простору;
- при заданих значеннях загальної провідності і внутрішніх розмірах системи повинна бути зайнята максимальна поверхня.

У другому розділі досліджено задачі моделювання температурних полів в інтегрованих системах розподілу теплоти. У якості Internet-орієнтованої системи для досліджень і розробок в рамках глобально розосередженої концепції паралельного проектування було обрано ANSYS систему проектування, яка сумісна з більшістю CAD-моделей.

На першому етапі аналізували точність визначення характеристик теплопередачі і течії холодильних агентів в кремнієвих мікроканалах на основі 3D моделювання стаціонарних рівнянь балансу маси, енергії і імпульсу методом кінцевих елементів. Надійність комп'ютерних

експериментів при моделюванні теплових процесів в об'єктах електроніки перевірено для випадків, для яких були відомі аналітичні рішення для нетривіальних тривимірних задач розподілу теплоти в системах теплорозсіювання. Такі системи управління тепловими потоками складаються з джерела енергії, пластини, що розсіює теплоту, і теплостока.

Теплота, що генерується джерелом заданої геометричної конфігурації, передається кондуктивним потоком всередину пластини, яка потім розсіює теплоту в навколишнє середовище шляхом конвективного переносу. В результаті чисельного рішення стаціонарної тривимірної задачі теплопровідності з граничними умовами, які відповідають конфігурації розсіювача у формі паралелепіпеда було встановлено, що чисельне рішення задачі відтворює точні аналітичні залежності для кубічного розсіювача з точністю менше 0,1%. Приведено результати розрахунків температурних полів в розсіювачах теплоти різної форми, для яких відсутні аналітичні рішення.

Точність розрахунків термічного опору залежить від розбиття на кінцеві елементи рівнянь балансу. В результаті комп'ютерних експериментів було знайдено, що більш детальне розбиття просторової сітки приводить до покращання визначення термічного опору в межах 15%, що знаходиться в межах погрішності реального експерименту. З цієї причини в подальших розрахунках було обрано грубішу схему дискретизації (32×32×32 кінцевих елементів в напрямках осей  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ , відповідно).

Моделювання температурних полів в мікроканалах на основі методів комп'ютерної флюїдної динаміки вимагає перевірки адекватності таких моделей при зіставленні з існуючими експериментальними даними, які найчастіше задаються у формі локального термічного опору. У якості дослідних даних, за якими були відкалібровані параметри визначальних співвідношень для кремнієвих мікроканалів і робочого тіла, використовували класичні результати Tuckerman (1981). На рис. 1 зображена архітектура каналів, яку було досліджено в експериментах за визначенням термічного і гідравлічного опорів в мікроканалах. Потік теплоти  $q$  підводився до частини кремнієвої підкладки з лінійними розмірами 1см×1см (рис.2).

Відведення теплоти здійснювалося системою мікроканалів (від 150 до 200), що розташовані паралельно. Ширина каналів варіювалася в інтервалі від 50 до 65 мкм, а висота від 280 до 300 мкм. Зона нагріву знаходилася на початковій ділянці в центрі кремнієвої підкладки. У якості охолоджувальної рідини розглядали воду з початковою температурою 20°C. У розрахунках геометричну конфігурацію обмежували з умов симетрії тільки половиною мікроканала і половиною ребра, як зображено на рис.2. Геометричні параметри обирали для найбільш вивченої конфігурації з такими значеннями: загальна довжина мікроканалів – 2 см; число мікроканалів –

150; ширина мікроканала –  $W_c$  – 64 мкм; ширина кремнієвої підкладки між мікроканалами – 36 мкм; висота кремнієвої підкладки –  $H = 489$  мкм; висота мікроканала –  $H_c = 280$  мкм; об'ємна витрата води через всю систему мікроканалів –  $1,277 \text{ см}^3/\text{с}$ ; тепловий потік –  $34,6 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

Здійснити пряме моделювання системи зі 150 мікроканалів неможливо і тому при розрахунках було застосовано умови симетрії, а тепловий потік обрано саме в центрі підкладки, як зображено на рис.2, щоб умови чисельного експерименту збігалися з реальним експериментом. При такому обранні обчислювального осередку розповсюдження теплоти від меж до центру практично не відбувається, що спостерігалось в експериментах, і є непрямим підтвердженням коректності прийнятого розбиття в рамках математичної моделі.

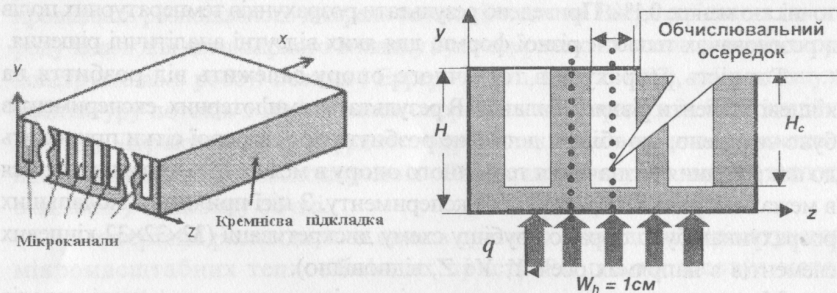


Рис. 1. Архітектура кремнієвих мікроканалів

Рис. 2. Основні розміри мікроканалів

На жаль, в існуючій літературі відсутні дані про коефіцієнти теплопровідності на верхній стінці кремнієвої підкладки. У подальших розрахунках було зроблено припущення про адіабатичність верхньої стінки кремнієвої підкладки, оскільки в експериментах Tuckerman (1981), остання виготовлена зі скла, теплопровідність якого на два порядки нижча за теплопровідність кремнію.

На рис.3 наведено результати розрахунків локальних термічних опорів для обраної конфігурації і експериментальних даних (Tuckerman, 1981).

Результати розрахунків виявляються декілька нижчими в порівнянні з експериментальними даними. Найбільш вірогідна причина розбіжностей – порушення умов адіабатичності на верхній поверхні кремнієвої підкладки і неможливість точного погодження експериментальних і заданих значень витрат теплоносія. Узгодження з експериментом може бути легко досягнуто шляхом варіювання теплопровідності кремнієвої підкладки.

Принципова проблема, що виникає при моделюванні течій в мікроканалах, пов'язана з урахуванням ефектів неоднорідності поверхні каналів. Зменшення розмірів теплотехнічних пристроїв призводить до

необхідності врахування масштабних чинників, які б відображали геометрію поверхні каналу. Було досліджено три моделі неоднорідності: регулярна, що імітує шорсткість прямокутниками або трикутниками, які розташовані уздовж стінки каналу із заданим періодом; випадкова, в якій положення вузлів неоднорідності задається датчиком випадкових чисел, а сполучні лінії описуються прямими лініями; фрактальна, у формі кривої Коха, що імітує форму сніжинки.

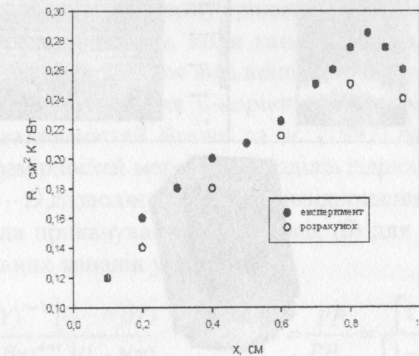


Рис. 3. Порівняння розрахункових і експериментальних термічних опорів для центрального мікроканалу

На рис.4 показано характерне поле швидкостей для регулярного покриття, що підтверджує періодичний характер рішення.

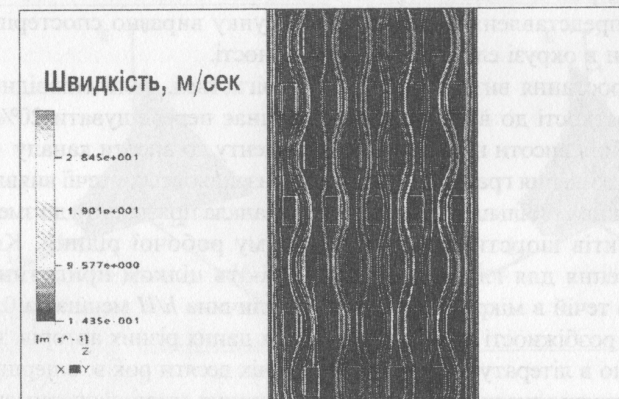


Рис. 4. Розподілення швидкостей уздовж регулярної неоднорідної поверхні

Геометричні розміри, які найближче відображають характеристики реальних мікрофлюїдних пристроїв, у розрахунках варіювали таким чином: – висота прямокутного мікроканала –  $H$  : 10...100 мкм;

- висота елементів неоднорідності –  $h$  в інтервалі від 0,1 до 2 мкм;
- ширина –  $a$  в інтервалі від 0,1 до 1 мкм;
- відстані між елементами шорсткості вздовж і поперек потоку – ( $b = c$ ) обирали однаковими ( 5 ...50 мкм ).

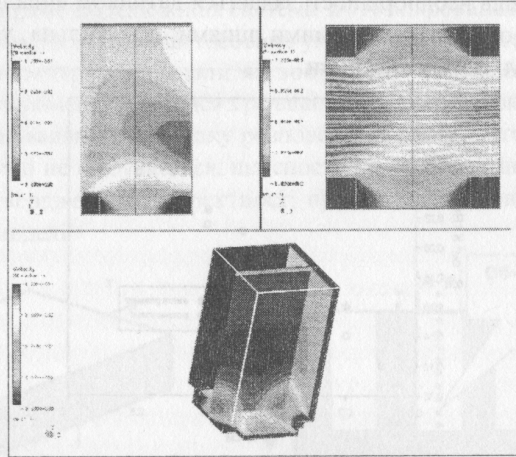


Рис. 5. Поля швидкостей для регулярної моделі шорсткості  
( $H = 5$  мкм,  $h = 0,5$  мкм,  $a = 2$  мкм,  $b = 2$  мкм)

Тривимірне поведінка ліній обтікання елементів неоднорідних поверхонь представлена на рис.5. На рисунку виразно спостерігаються застійні зони в окрузі елементів неоднорідності.

Різке зростання витрат тиску спостерігається, коли співвідношення висоти шорсткості до висоти каналу починає перевищувати 20%. Якщо співвідношення висоти неоднорідного елемента до висоти каналу складає  $h/H \sim 0,5$ , відхилення градієнта тиску від пуазельовської течії виявляються в 20 разів вищим. Збільшення висоти мікроканала призводить до зменшення впливу ефектів шорсткості на лінії струму робочої рідини. Класичні співвідношення для гладких каналів стають цілком придатними для розрахунків течій в мікроканалах, якщо величина  $h/H$  менша за 0,2.

Наявні розбіжності експериментальних даних різних авторів, які було опубліковано в літературі впродовж останніх десяти років, в першу чергу, викликані труднощами відтворення ідентичних умов експериментів і їх точністю. Підвищення точності і надійності вимірювань призводить до узгодження відомих класичних кореляцій для числа Нуссельта і гідравлічних опорів, що дозволяє використовувати класичні рівняння при проектуванні мікропристроїв, якщо враховані відповідні обмеження.

У третьому розділі досліджено питання ефективності охолодження джерел високої густини енергії на основі мереж мікроканалів. Якщо розглянути граничний випадок, коли мережа теплопровідних елементів охоплює всю теплогенеруючу поверхню (тобто, коли лінії, фрактальна розмірність яких дорівнює одиниці, повністю покривають площину фрактальної розмірності  $D = 2$ ), то можна дійти висновку, що реальне рішення задачі слід шукати для випадку дробової розмірності  $1 \leq D \leq 2$ . Мережі, які складено із таких об'єктів, в нашому прикладі, мікроканалів, є фрактальними.

Вже в простому випадку, коли канали мають прямокутну форму, фрактальні мережі виявляються вигіднішими з погляду гідродинамічних і теплопровідних характеристик у порівнянні з паралельними каналами. Узагальнення залежностей Вrawn та ін. (1997) на випадок довільних фрактальних розмірностей мережі, розподілів гідравлічних діаметрів –  $\Delta$  і довжин каналів –  $D$  дозволяє записати співвідношення теплових потоків ( $\epsilon$ ) і потужностей на прокачування теплоносія ( $\delta$ ) для фрактальної мережі і мережі паралельних каналів у вигляді:

$$\epsilon = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\uparrow\downarrow}} = \frac{[1 - (N\gamma)^{m+1}](1 - N\beta\gamma)}{[1 - (N\beta\gamma)^{m+1}](1 - N\gamma)} \quad \delta = \frac{PP}{PP_{\uparrow\downarrow}} = \frac{[1 - \gamma/(N\beta^4)^{m+1}](1 - N\gamma)}{[1 - \gamma/(N\beta^4)](1 - (N\gamma)^{m+1})}$$

де  $m$  – число рівнів розгалуження,  $N$  – число гілок, на які роздвоюється простий канал,  $\gamma$  – відношення довжин попередніх і наступних каналів,  $\beta$  – відношення гідравлічних діаметрів попередніх і наступних каналів.

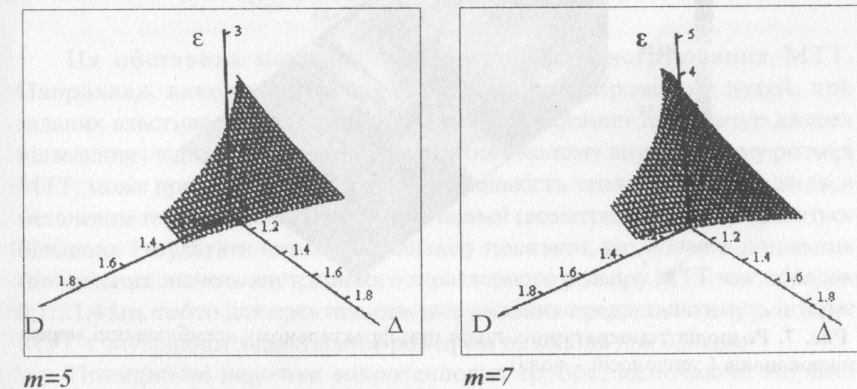


Рис. 6. Залежність співвідношення теплових потоків  $\epsilon$  у деревовидних і паралельних мережах при різних рівнях розгалуження

Збільшення фрактальної розмірності мережі каналів зумовлює зростання співвідношення теплових потоків у фрактальних і паралельних мережах (рис.6).

Мережа мікроканалів розглядається як система зв'язків (теплопровідних шляхів), розташування яких визначає її конфігурацію (структуру). Механізм утворення гілок дерева базується на властивості самоподібності і в результаті, мережа, яка утворюється внаслідок застосування операції самоподібності, починає заповнювати простір і, відповідно, збільшувати площу поперечного перетину. З другого боку, практична реалізація зростання, як числа каналів, так і числа галузень може приводити до виникнення паразитних містків між каналами.

Розглянута задача охолодження процесора з тактовою частотою порядку 5 ГГц, що еквівалентно відведенню теплоти порядку 200 Вт/см<sup>2</sup> від кремнієвої підкладки розміром 2см×2см, на якій зосереджено близько 400 мікросхем. Як охолоджуючий пристрій розглянуто фрактальне асемблювання мережі мікроканалів (рис.7), в якому досягається збільшення загального поперечного перетину потоку теплоносія і зменшення гідравлічного опору. При цьому було встановлено значне підвищення ефективної теплопровідності в порівнянні із звичайною плоскою підкладкою.

Для пошуку оптимальних рішень проведено пряме моделювання таких мереж методами комп'ютерного термічного аналізу. У роботі детально досліджено поля швидкостей і температур в кремнієвих підкладках MEMS – пристроїв, в які інтегруються мікроканалні системи терморегулювання (рис.7).

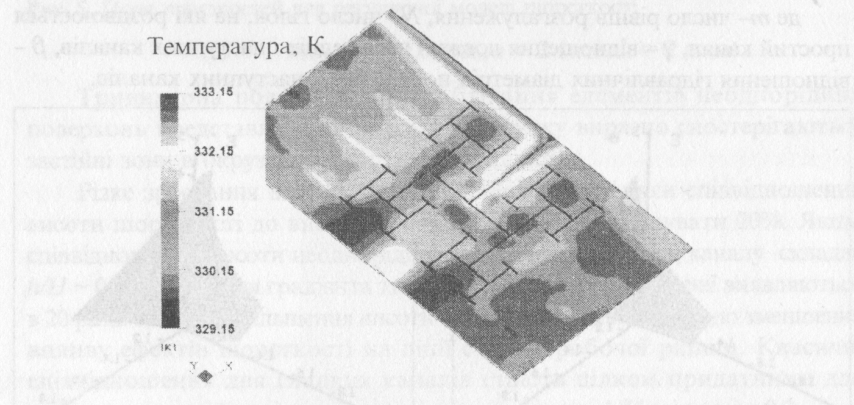


Рис. 7. Розподіл температурних полів при фрактальному асемблюванні мереж мікроканалів ( теплоносій – вода)

У четвертому розділі розглянуто теплофізичні моделі різноманітних варіантів конструктивно-технологічних рішень для тепловідводів і теплообмінників з випарними мікроканалами.

На основі аналізу теоретичних і експериментальних досліджень процесів перенесення в МТТ сформульовано теплофізичні обмеження з геометрії

мікротеплових трубок. Було прийнято, що капілярні ефекти визначаються малістю внутрішнього гідравлічного діаметру  $d$ , а течія пари і рідини в мікротеплових трубках є ламінарною.

Показано, що гідродинамічна межа при таких припущеннях роботи ТТ задовольняє нерівності:

$$2\sigma/d \geq \Delta P' + \Delta P'',$$

$$\Delta P' = \frac{C_1}{Re'} \cdot \frac{L_0}{\delta} \cdot \frac{\rho'(w')^2}{2}; \Delta P'' = \frac{C_2}{Re''} \cdot \frac{L_0}{d \left(1 - 2 \frac{\delta}{d}\right)} \cdot \frac{\rho''(w'')^2}{2}.$$

З цього виразу витікає, що існує величина

$$\bar{\delta}_{ext} = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{4}{3} \bar{\delta}_{ext}\right) \cdot (1 - 2 \bar{\delta}_{ext})^5}{\frac{64}{9} \cdot \frac{v''}{v'} \cdot (1 - \bar{\delta}_{ext})^2}}$$

яка визначає оптимальну заправку МТТ, залежну тільки від теплофізичних властивостей теплоносія  $v''/v'$  і тиску насичення.

Конкретні розрахунки показали, що для NH<sub>3</sub> при  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\delta_{ext} \approx 0,21$ . Для води при  $t = 100^\circ\text{C}$ ,  $\delta_{ext} \approx 0,14$ , що непогано узгоджується з літературними експериментальними даними ( $\delta = 0,125$ ) для відношення товщини плівки до радіусу. У гідродинамічній межі максимальний тепловий потік  $Q_{max}$  знижується із зменшенням діаметру МТТ за кубічною залежністю:

$$Q_{max} \leq \frac{\pi r d^3}{48 v L_0 Z(\bar{\delta}_{ext})} \cdot (2\sigma + g \rho' L_0 d \cdot \sin \varphi)$$

Ця обставина накладає обмеження на конструювання МТТ. Наприклад, використання металевих теплопровідних путей, при заданих властивостях матеріалу теплостоку  $\lambda_m$ , різниці температур джерел підведення і відведення тепла, при достатньо малому внутрішньому розмірі МТТ, може призвести до ситуації, коли кількість теплоти, яка передається металевим теплостоком такої ж зовнішньої геометрії, як і МТТ, виявиться більшою. Результати чисельного аналізу показали, що область доцільних мінімальних значень внутрішнього характерного розміру МТТ має порядок 0,7...1,4 мм, тобто для практичного застосування представлятимуть інтерес МТТ з внутрішнім характерним розміром не менше ніж 0,7 мм.

Принципові недоліки мікротеплових трубок, включаючи жорсткі обмеження з орієнтації при оптимальній заправці і «допустимим» довжинам тепломасопереносу, разом з посилюванням вимог до точності дозування при заправці теплоносія, дозволяють стверджувати, що для практичного використання маловірогідне уживання МТТ з характерними внутрішніми розмірами меншими за 1мм.

Більш ефективною системою тепловідведення є випарні мікроканали (ВМК), які практично не досліджені з точки зору задач мініатюризації. Для ВМК фізичне обґрунтування граничних співвідношень при зменшенні внутрішнього розміру повинно бути пов'язане не із забезпеченням певного масштабу рушійних сил, оскільки для ВМК це однозначно визначається дією сил гравітації, а з умовами природної сепарації рідкої і парової фази.

Переходячи до оцінки мінімального діаметру ВМК, при якому зберігаються існуючі теплопередаючі переваги цього пристрою в порівнянні з суцільнометалевим тепловідводом, і використовуючи умови зіставлення, які є аналогічними до розглянутих вище для МТТ, можна досягти не менше ніж в 10 разів інтенсивнішого перенесення теплоти в порівнянні з суцільнометалевим тепловідводом. Виконані оцінки застосовування принципу дії ВМК дозволяють вважати перспективним діапазоном зміни їх основних розмірів: довжини від 0,1 до 0,5 м (великі довжини можуть розглядатися щодо капілярних теплообмінників) і внутрішнього діаметру від 0,5 до 4 мм (менші внутрішні діаметри відносяться до капілярів з малою товщиною стінки  $\delta_0 = 1,0 \dots 0,2 \text{ мм}$ ).

У дисертації виконано порівняльний теплотехнічний аналіз теплообмінників типу газ – газ на основі локальних ВМК і мережевих ВМК. Для того, щоб забезпечити достатнє узагальнення такого аналізу, були прийняті наступні умови порівняння:

- однакові значення локальних і середніх коефіцієнтів теплопередачі для конструкцій теплообмінних апаратів (ТА) з ВМК, що порівнюються між собою, при однофазному конвективному теплообміні,
- однакові витрати теплоносіїв і їх теплофізичні властивості,
- однакові відносні напрями руху теплоносіїв і умови обтікання (протитечія, поперечне обтікання і т. ін.),
- однакові повні поверхні теплопередачі в зонах нагріву і охолодження.

Кожна зона (нагріву і охолодження) розглядалася як окремий теплообмінник, у якого на одному з боків здійснюється процес двофазного теплопереносу. Було показано, що для теплообмінників з розділеними зонами нагріву і охолодження, при заданій загальній поверхні теплообміну існує таке співвідношення між поверхнями зон нагріву і охолодження  $F_1$  і  $F_2$ , при якому досягається максимальне значення теплової потужності  $Q$ . Вперше встановлено оптимальне співвідношення для поверхонь теплообміну в зонах нагріву і охолодження таких систем.

Цей результат відрізняється від стандартних залежностей для звичних теплообмінників, де оптимальне співвідношення  $F_1/F_2$  залежить тільки від співвідношення коефіцієнтів теплопередачі  $k_1/k_2$  і не залежить від співвідношення повних теплоємностей потоків  $W_1/W_2$ . Використовуючи

результати наведеного порівняльного аналізу стосовно ТА з мережевих ВМК, в роботі викладено рекомендації з конструювання нових теплообмінників.

Для практичних застосувань виконано порівняльний теплотехнічний аналіз ТА типу газ – газ звичної трубчастої конструкції і на основі ВМК. Умови для аналізу обиралися типовими для здійснення тепловідведення з внутрішніх об'ємів герметичних шаф і стійок, які заповнені тепловиділяючою апаратурою, коли для виключення несприятливої дії забруднень, підвищеної вогкості й інших негативних властивостей повітря навколишнього середовища на надійність електронної апаратури, тепловий зв'язок між внутрішніми, повітряними об'ємами електронних комплексів і навколишнім середовищем здійснюється за допомогою теплообмінника типу повітря – повітря. Було виявлено, що в ТА на основі ВМК, і це є принциповим, виконання всіх проектних умов задачі, враховуючи обмеження на перекачування теплоносія, не заважає зменшенню діаметра  $d_p$  теплопередавального елемента ВМК.

## ВИСНОВКИ

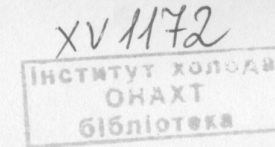
1. Порівняльний аналіз систем охолодження об'єктів мікроелектроніки показує, що термодинамічна ефективність виявляється вищою при мікроканальному способі в порівнянні з мікроструменевим і мікрокраплинним охолодженням. У звичайних системах мікроканалів спостерігається нерівномірний розподіл температур на поверхні підкладки, що викликано течією рідини по артеріях, на відміну від однорідного розподілу при мікроструменевому і мікрокраплинному способах охолодження. Максимальні значення теплових потоків, які відводяться, спостерігаються при мікроструменевому охолодженні.
2. Поля швидкостей, тисків і температур, що виникають в мікро- і макроканалах при аналізі різних моделей неоднорідної поверхні (регулярної, випадкової і фрактальної), підтверджують подібність процесів перенесення імпульсу за однакових граничних умов. Класичні співвідношення для коефіцієнтів тепловіддачі і гідравлічних опорів при течіях в звичайних каналах в основному залишаються істинними і для мікроканалів, якщо коректно сформульовані граничні умови і геометричні обмеження.
3. Аналіз результатів розподілу тисків при течії робочих тіл в мікроканалах дозволяє приблизно оцінити межі застосування співвідношень Хагена-Пуазейля, які стають некоректними при відносинах  $h/H > 0,5$ . Наявні розбіжності експериментальних даних різних авторів обумовлені труднощами відтворення ідентичних умов

експериментів і їх точністю, а не новими фізичними явищами, які могли б бути пов'язані з мікромасштабами.

4. Розгалужена структура теплопровідних путей є одним з можливих засобів підвищення ефективності охолодження об'єктів, що генерують потоки теплоти в заданому кінцевому об'ємі. Відношення витрат потужності на прокачування робочих тіл при біфуркації каналів і фрактальних розмірностях для розподілу довжин і діаметрів каналів  $D = 2$  і  $\Delta = 3$  складає 1:3, коли число рівнів галуження обране 5. При подальшому збільшенні числа рівнів галуження це відношення стає ще значнішим.
5. Розрахунково-теоретичні оцінки габаритних розмірів МТТ з погляду забезпечення можливих умов тепломасопереносу, а також з позицій конкурентоспроможності МТТ металевим теплоστοкам, дозволяють стверджувати, що для практичного застосування маловірогідні МТТ з діаметрами меншими 1мм і довжинами, які менші ніж 0,1...0,2м.
6. Для ТА на основі мережевих ВМК максимальна теплотехнічна ефективність досягається при об'єднанні ВМК у мережі, що розташовуються в площинах, нормальних до руху теплоносіїв, тобто в мережі слід асемблювати ВМК одного ряду; об'єднання в єдину мережу двох або більш фронтальних рядів істотно не знижуватиме теплопродуктивність до тих пір, поки теплообмінна поверхня не перевищить 10...15% від загальної поверхні ТА.
7. Порівняльний аналіз теплотехнічних і техніко-економічних показників теплообмінників газ-газ двох типів – ТА з ВМК і традиційних рекуперативних ТА показує, що при температурних режимах, витратах теплоносіїв і геометрії теплопередаючих елементів, які є типовими для застосування таких теплообмінників в системах термостабілізації радіоелектронної апаратури, теплообмінні поверхні в ТА з ВМК в 2...7 разів нижче, ніж в традиційних ТА; при цьому задовольняються обмеження по допустимих енерговитратах на прокачування теплоносіїв, які не перевищують 5...10% від переданої теплової потужності, що не завжди можливо в традиційних ТА.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО В ТАКИХ ПУБЛІКАЦІЯХ

1. Бирюков О.К., Никитин Д.Н., Крицкий В.И. Теплообменные аппараты на испарительных термосифонах // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ", Киев, 19-22 апреля, 1989г., с.95.



2. Никитин Д.Н., Бирюков О.К. Математическое моделирование теплообменных аппаратов со сложной схемой движения теплоносителей // Тезисы докладов международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ", Киев, 19-22 апреля, 1989г., с.96-97.

3. Косой Б.В., Никитин Д.Н. Терморегулирование тепловых потоков высокой плотности сетевыми системами охлаждения // Холодильная техника и технология, – 2003. – №6, с.13 – 18.

4. Nikitin D. N. Fractal Simulation of Cooling Effects in Mesoporous Structures, Proceedings of International Conference on Applications of Porous Media (ICAPM 2004), Evora, Portugal. – 2004. – pp. 443 – 447.

5. Kosoy, B.V. and Nikitin, D.N. Modeling of Miniature Two-Phase Thermal Control Systems, 5-th Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer, 2004.

6. Никитин Д.Н. Моделирование течения рабочих тел в кремниевых микроканалах // Холодильная техника і технологія. – 2004. – №91, с.65-72.

7. Никитин Д.Н. 3D-моделирование неоднородности поверхности при течениях в микроканалах. // Тези доповідей II Міжнародного семінару «Інформаційні системи і технології». Одеса. – 2004, с.34-38.

8. Никитин Д.Н., Косой Б.В. Моделирование температурных полей в кремниевых микроканалах, // Холодильная техника и технология. – 2004. – №92, с.59-64.

9. Косой Б.В., Никитин Д.Н., Смирнов Г.Ф. Теплотехнический анализ и практические рекомендации по применению теплообменников с локальными и сетевыми испарительными микроканалами, // Промышленная теплотехника. – 2005. – №1.

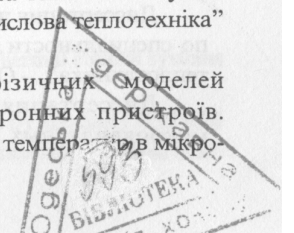
10. Косой Б.В., Никитин Д.Н. Системы распределения теплоты на основе микротепловых трубок, Материалы Всеукраїнської науково-практичної конференції „Енергетика, енергозбереження, енергосервіс”. Одеса. – 2004. – с.34-38.

#### АНОТАЦІЯ

**Никитин Д.М. Теплофізичне моделювання мікроканальних систем терморегулювання електронних пристроїв. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – „Технічна теплофізика та промислова теплотехніка” Одеська державна академія холоду. Одеса. 2005.

Дисертація присвячена розробці теплофізичних моделей мікроканальних систем терморегулювання електронних пристроїв. Комп'ютерне моделювання полів швидкостей, тисків і температур в мікро-



і макроканалів для різних типів неоднорідної поверхні (регулярної, випадкової і фрактальної) продемонструвало подібність процесів перенесення імпульсу за однакових граничних умов. Класичні співвідношення для коефіцієнтів тепловіддачі і гідравлічних опорів при течіях в звичайних каналах, в основному, залишаються справедливими і для мікроканалів, якщо коректно сформульовані граничні умови і геометричні обмеження. Аналіз результатів розподілу тиску при течії робочих тіл в мікроканалах дозволив приблизно оцінити межі застосування співвідношень Хагена-Пуазейля, які стають некоректними при відносинах висоти елементу неоднорідності до висоти каналу  $h/H > 0,5$ . Показано, що наявні розбіжності експериментальних даних різних авторів обумовлені труднощами відтворення ідентичних умов експериментів і їх точністю, а не новими фізичними явищами, які могли бути пов'язані з мікромасштабами.

У роботі досліджено підхід до підвищення ефективності систем відведення теплоти від джерел високої густини енергії за рахунок застосування деревовидних мереж мікроканалів. Показано, що співвідношення витрат потужності на прокачування робочих тіл при біфуркації каналів і фрактальних розмірностей для розподілу довжин і діаметрів каналів  $D = 2$  і  $\Delta = 3$  складає 1:3 для п'яти рівнів розгалуження. При подальшому збільшенні числа рівнів розгалуження дане співвідношення стає ще значнішим. Порівняльний аналіз ефективності систем охолодження на основі мереж мікроканалів з двофазними робочими тілами показав, що теплотехнічна ефективність систем газ – газ з ізольованими і розділеними зонами практично однакова. Розрахунково-теоретичні оцінки габаритних розмірів мікротеплових труб з погляду забезпечення допустимих умов тепломасопереносу, а також з позицій конкурентоспроможності металевим теплостокам, дозволили стверджувати, що для практичного застосування маловірогідні МТТ з діаметрами менш ніж 1мм.

**Ключові слова:** мікроканали, комп'ютерна флюїдна динаміка, моделювання, фрактальні мережі, теплові труби, терморегулювання.

#### АННОТАЦИЯ

**Никитин Д.Н.** Теплофизическое моделирование микроканальных систем терморегулирования электронных устройств. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – “Техническая теплофизика и промышленная теплотехника”. – Одесская государственная академия холода. Одесса. 2005.

Диссертация посвящена разработке теплофизических моделей микроканальных систем терморегулирования электронных устройств.

Компьютерное моделирование полей скоростей, давлений и температур в микро- и макроканалах для различных типов неоднородной поверхности (регулярной, случайной и фрактальной) подтвердило подобие процессов переноса импульса при одинаковых граничных условиях. Классические соотношения для коэффициентов теплоотдачи и гидравлических сопротивлений при течениях в обычных каналах, в основном, остаются справедливыми и для микроканалов, если корректно сформулированы граничные условия и геометрические ограничения. Анализ результатов распределения давлений при течении рабочих тел в микроканалах позволил приблизительно оценить пределы применимости соотношений Хагена-Пуазейля, которые становятся некорректными при отношениях высоты элемента неоднородности к высоте канала  $h/H > 0,5$ . Показано, что имеющиеся расхождения опытных данных различных авторов, обусловлены трудностями воспроизведения идентичных условий экспериментов и их точностью, а не новыми физическими явлениями, которые могли быть связаны с микромасштабами.

В работе развит подход к повышению эффективности систем отвода теплоты от источников высокой плотности энергии за счет применения деревовидных сетей микроканалов. Показано, что отношение затрат мощности на прокачку рабочих тел при бифуркации каналов и фрактальных размерностях для распределения длин и диаметров каналов  $D = 2$  и  $\Delta = 3$  составляет 1:3 для пяти уровней ветвления. При дальнейшем увеличении числа уровней ветвления данное отношение становится еще более значительным. Сравнительный анализ эффективности систем охлаждения на основе сетей микроканалов с двухфазным рабочим телом показал, что теплотехническая эффективность систем газ – газ с изолированными и разделенными зонами практически одинакова. Расчетно-теоретические оценки габаритных размеров микротепловых труб с точки зрения обеспечения допустимых условий тепло – массопереноса, а также с позиций конкурентно – способности металлическим теплостокам, позволили утверждать, что для практического применения маловероятны микротепловые трубы с диаметрами менее 1мм.

**Ключевые слова:** микроканалы, компьютерная флюидная динамика, моделирование, фрактальные сети, тепловые трубки, терморегулирование.

#### THE SUMMARY

**Nikitin D.N.** Thermophysical modeling of microchannel thermal control systems in electronic devices. – Manuscript.

Thesis for a candidate of science (Engineering) degree by specialty 05.14.06 – “Technical Thermophysics and Industrial Thermal Engineering”. – Odesa State

Academy of Refrigeration. Odesa. 2005.

The dissertation is devoted to development of thermophysical models of the microchannel thermal control systems of electronic devices. Simulation of the velocity fields, pressures and temperatures in micro- and macrochannels for different types of heterogeneous surface (regular, casual and fractal) confirmed similarity of processes of impulse transfer at identical scope terms. Classic correlations for the coefficients of heat transfer and hydraulic resistances at the flows in ordinary channels, mainly, remain the same for microchannels, if scope terms and geometrical limitations are correctly formulated. The analysis of results of distributing of pressures at the flow of working fluids in microchannels allow approximate estimation of the limits of applicability of the Hagen–Poiseuille's correlations, which become improper at attitudes of height of element of heterogeneity toward the height of channel of  $h/H > 0.5$ . It was shown that present divergences of experimental information of different authors, conditioned by difficulties of reproduction of identical terms of experiments and their exactness, instead of new physical phenomena which could be related to the microscales.

Approach to the increase of efficiency of the systems of taking of warmth from the sources of high closeness of energy due to application of treelike networks of microchannels was developed in the work. It is shown that relation of power on pumping of working fluids at channels bifurcation and fractal dimensions for distributing of lengths and diameters of the  $D = 2$  и  $\Delta = 3$  makes 1:3 for five levels of assembling. At the further increase of number of assembling levels this relation becomes yet more considerable. The comparative analysis of efficiency of the cooling systems on the basis of microchannel networks with a two-phase working fluid showed that thermal efficiency of the gas-gas systems with the isolated and separated zones are practically identical. Numerical and theoretical estimations of overall sizes of microheat pipes from point of providing of possible heat and mass transfer terms, and also from positions of competition to metal heat ways, allowed asserting that for practical application improbable microheat pipes with diameters less than 1mm.

**Keywords:** microchannels, computer fluid dynamics, modeling, fractal networks, heat pipes, thermal control.