

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний університет “Львівська політехніка”

**Муха Тарас Орестович**

УДК 004.942:004.42:621.382

**ПРИКЛАДНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ  
ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ КИПІННЯМ І  
ВИПАРОВУВАННЯМ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ**

Спеціальність 01.05.03 – Математичне та програмне  
забезпечення обчислювальних машин і систем

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

Львів 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
Федасюк Дмитро Васильович  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
проректор з науково-педагогічної роботи, завідувач  
кафедри програмного забезпечення

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
Пелешин Андрій Миколайович  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
завідувач кафедри соціальних комунікацій та  
інформаційної діяльності

доктор технічних наук, професор  
Попович Василь Степанович  
Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я.С. Підстригача НАН України, заступник  
директора з наукової роботи, провідний науковий  
співробітник відділу термомеханіки

Захист відбудеться « 08 » червня 2012 р. о 16<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.05 у Національному університеті “Львівська політехніка” ( 79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12)

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” ( 79013, м. Львів-13, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий «    » травня 2012 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор



Р.А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Упродовж останніх десятиліть усталеною тенденцією в електроніці є мініатюризація електронних компонентів. Унаслідок різкого зростання щільності компонування мікроелектронних елементів збільшується і кількість тепла, яка виділяється мікроелектронними пристроями. Якщо тепловідведення є недостатнім для забезпечення відповідного температурного режиму, то температура пристрою або його конструктивного елемента зростає і створює загрозу виходу з ладу. За таких критичних умов виникає потреба в додатковому відведенні тепла, яке б дало змогу швидко зменшити температуру охолоджуваного елемента.

Швидке тепловідведення забезпечує один із сучасних підходів, при якому використовується зміна стану речовини з рідкого на газоподібний. Тепловідведення у такий спосіб включає випаровування рідини в гарячій ділянці та конденсацію пари в холодній ділянці і забезпечує відведення набагато більшої кількості тепла, ніж та, яка відводиться внаслідок вимушеної конвекції повітря чи рідини.

Аналіз відомих програмних засобів для дослідження теплообміну в мікроелектронних пристроях та їх конструктивних елементах показує, що наявні в них засоби не дають можливості розрахунку температурних полів в елементах мікроелектронних пристроїв при використанні процесів кипіння і випаровування для інтенсифікації охолодження за критичних умов.

Під час аналізу математичного забезпечення моделювання процесу тепловідведення випаровуванням та кипінням рідини для інтенсифікації охолодження за критичних умов в елементах мікроелектронних пристроїв (МЕП) виявлено, що у відомих теоретичних дослідженнях розглядаються лише часткові випадки процесу відведення тепла за рахунок випаровування та кипіння рідини за критичних умов. Зокрема зосереджується увага лише на процесі випаровування, а теплообмін залишається поза увагою; досліджується лише процес стаціонарного теплообміну, що обмежує використання цих досліджень для аналізу нестаціонарного процесу теплообміну; при побудові математичних моделей робляться припущення, які суттєво спрощують модель, однак це впливає на адекватність результатів.

Тому виникає потреба створення математичного та програмного забезпечення для комп'ютерного аналізу процесу теплообміну в елементах МЕП при використанні випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації охолодження за критичних умов.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційних досліджень пов'язана з виконанням держбюджетних тем Національного університету "Львівська політехніка" "Розробка методів та засобів розподілення обчислень в задачах теплового проектування електронних пристроїв нового покоління", (автор розробив лінійну математичну модель нестаціонарного процесу теплообміну з врахуванням

впливу випаровування рідини на процес тепловідведення, описав результати чисельних експериментів), яка виконувалась в період з 2008 по 2009 рр. (номер державної реєстрації 0108U000331) і “Розробка лінійних та нелінійних математичних моделей та методів аналізу теплових режимів електронних пристроїв із неоднорідною структурою”, (автором розроблено нелінійну нестационарну математичну модель теплообміну з використанням випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення в МЕП за критичних умов, спосіб аналізу температурного поля з використанням ітераційних методів, програмна реалізація обчислень значень числового розв’язку, опрацьовано результати чисельних експериментів), яка виконується з 2010 р. і до цього часу (номер державної реєстрації 0110U001121).

**Мета і завдання дослідження.** Метою досліджень є розроблення математичного і програмного забезпечення для комп’ютерного аналізу процесів теплообміну в елементах мікроелектронних пристроїв при використанні випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації відведення тепла за критичних умов.

Для досягнення мети дослідження вирішено такі завдання:

1. Аналіз відомих програмних засобів моделювання процесу теплообміну в МЕП, сучасних підходів до забезпечення тепловідведення та математичних моделей процесу теплообміну в елементах МЕП з використанням випаровування та кипіння рідини.
2. Формалізація й обґрунтування відповідних математичних моделей процесу теплообміну в елементах МЕП, які враховують вплив випаровування та кипіння рідини за критичних умов та залежності теплових характеристик матеріалу від температури.
3. Вибір та обґрунтування використання відповідних чисельних і аналітичних методів розв’язування задач, пов’язаних із математичними моделями, розробка алгоритмів для їх програмної реалізації.
4. Створення прикладних програмних засобів моделювання процесу тепловідведення при використанні випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації охолодження за критичних умов в елементах МЕП.
5. Проведення обчислювальних експериментів, дослідження змін температури елементів МЕП з часом, дослідження впливу випаровування та кипіння на процес тепловідведення на основі створеного математичного і програмного забезпечення.

***Об’єктом дослідження*** є процес побудови прикладних програмних засобів моделювання теплообміну в МЕП.

***Предметом дослідження*** є прикладні програмні засоби моделювання процесу тепловідведення при використанні випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації охолодження за критичних умов в елементах МЕП.

**Методи дослідження:** математичні моделі теплових процесів з врахуванням впливу випаровування та кипіння розроблені з використанням теорії теплових процесів; початково-крайові задачі, які виникають при формалізації математичних моделей, розв'язано з використанням методів математичної фізики та чисельних методів; для створення програмного забезпечення застосована теорія об'єктно-орієнтованого програмування; для графічного представлення результатів моделювання використано графічну бібліотеку OpenGL.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Вперше побудовано моделі процесу теплообміну в елементах МЕР з використанням кипіння та випаровування рідини, які враховують залежність теплофізичних параметрів від температури, що дає змогу проводити тепловий аналіз елементів МЕР за критичних умов.
2. Удосконалено метод аналізу температурного поля для нелінійних моделей теплообміну в елементах МЕР при застосуванні кипіння та випаровування рідини для інтенсифікації охолодження за критичних умов, при якому використовується дискретизація в часі та метод продовження за параметром, що дає змогу отримати розподіл температури елементів МЕР.
3. Вперше розв'язано нелінійну крайову задачу відносно приростів шуканої температури елемента МЕР при застосуванні кипіння та випаровування рідини за критичних умов, що дає можливість обчислювати значення температури елементів МЕР, використовуючи нелінійні моделі.
4. Для зменшення обчислювальних затрат за рахунок зменшення точності удосконалено метод аналізу температурного поля елементів МЕР при використанні випаровування рідини, коли нелінійна залежність потоку тепла, що відводиться через випаровування, від температури апроксимується лінійною функцією методом найменших квадратів.
5. Вперше розроблено архітектуру прикладного програмного комплексу для моделювання процесу тепловідведення випаровуванням та кипінням рідини за критичних умов в елементах МЕР, який ґрунтується на використанні розробленої бібліотеки класів, що створює можливість для його використання в рамках компонентного підходу та методу повторного використання при розробленні інших прикладних програмних засобів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичне значення роботи полягає в тому, що створений програмний комплекс, який ґрунтується на розроблених автором чисельних і аналітичних підходах до розв'язування нестаціонарних задач теплопровідності, може бути використаний при тепловому проектуванні сучасних електронних пристроїв. Розроблені прикладні програмні засоби базуються на використанні розробленої бібліотеки класів, що створює можливість їхнього використання в рамках

компонентного підходу та методу повторного використання при розробленні інших прикладних програмних засобів.

Розроблені прикладні програмні засоби можуть бути застосовані і при аналізі теплових процесів в інших об'єктах, теплова модель яких представляється у вигляді нескінченної пластини.

Результати проведених модельних експериментів теплообміну в елементах МЕР з використанням випаровування та кипіння дали можливість оцінити вплив вхідних параметрів на зміну температури елементів МЕР з часом, та визначити межі застосування підходу з використанням апроксимації нелінійної залежності потоку випаровування від температури лінійною, що може бути використано при проектуванні систем відведення тепла в МЕР та при виборі методів для інженерних розрахунків температури МЕР та їх елементів.

Наукові положення та висновки дисертації використані під час виконання завдань держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ/КОС – «Розробка лінійних та нелінійних математичних моделей та методів аналізу теплових режимів електронних пристроїв із неоднорідною структурою» та держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ/Діаграма — «Розробка методів та засобів розподілення обчислень в задачах теплового проектування електронних пристроїв нового покоління» у Національному університеті «Львівська політехніка», у навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисципліни «Математичне забезпечення програмних систем». Окремі результати дисертаційної роботи використані в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача Національної академії наук України (м. Львів).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [6, 10] – побудова лінійної нестационарної математичної моделі процесу теплообміну з урахуванням впливу випаровування води шляхом лінеаризації нелінійної функції методом найменших квадратів, розроблення методу аналізу температурного поля, проведення обчислювальних експериментів, опрацювання результатів; [5, 11, 12, 13] – розроблення лінійної нестационарної математичної моделі теплообміну в тепловідвідній пластині МЕР з урахуванням впливу випаровування будь-якої рідини шляхом лінеаризації нелінійної залежності від температури потоку тепла, який відводиться за рахунок випаровування, методом найменших квадратів, автором знайдено аналітичний розв'язок модельної задачі за допомогою методу розділення змінних, здійснена програмна реалізація обчислень значень аналітичного розв'язку; [4, 9] – побудова лінійної нестационарної математичної моделі процесу охолодження при критичних умовах за рахунок випаровування рідини, розроблення способу її аналізу з використанням чисельних методів, проведення

обчислювальних експериментів; [2, 7, 14] – нелінійна нестационарна математична модель теплообміну з використанням випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення в МЕР за критичних умов, розроблення методу аналізу температурного поля з використанням ітераційних методів, програмна реалізація обчислень значень числового розв’язку, проведення обчислювальних експериментів; [1, 8] – математична модель процесу теплообміну з використанням кипіння рідини за критичних умов, програмна реалізація обчислень, проведення обчислювальних експериментів, опрацювання результатів моделювання; [3] – порівняння розв’язків задачі теплопровідності з використанням випаровування для інтенсифікації тепловідведення за критичних умов, отриманих за допомогою нелінійної та лінеаризованої моделей, програмна реалізація обчислень значень числових розв’язків, опрацювання результатів моделювання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень неодноразово доповідалися на міжнародних наукових конференціях, зокрема: Міжнародній науково-технічній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології” CSIT (м. Львів, 2008, 2010, 2011 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія”, (м. Вінниця, 2010 р.), 18-ій Міжнародній українсько-польській науково-технічній конференції “САПР в машинобудуванні. Проблеми впровадження та навчання” CADMD’2010 (м. Львів, 2010 р.), 11-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці” CADSM’2011 (с. Поляна-Свалява, 2011 р.), 7-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Перспективні технології і методи проектування MEMC” MEMSTECH’2011 (с. Поляна-Свалява, 2011 р.), 3-ій Міжнародній науково-практичній конференції “Обробка сигналів та негауссівських процесів” ОСНП 2011 (м. Черкаси 2011 р.), наукових семінарах кафедри “Програмне забезпечення” Національного університету “Львівська політехніка” (2009 – 2011 рр.).

**Публікації.** За результатами проведених досліджень опубліковано 14 друкованих праць, з яких 6 – в наукових фахових виданнях України, 8 – у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота загальним обсягом 142 сторінки складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків і переліку використаної літератури. Основний текст викладено на 118 сторінках, робота містить 36 рисунків і 11 таблиць, список літератури з 124 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання досліджень, показано зв’язок

роботи із науковими програмами, планами, темами. Вказано наукову новизну, практичну цінність та впровадження отриманих результатів. Наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень і публікації.

**У першому розділі** розглянуто сучасні підходи до забезпечення тепловідведення у МЕР, сучасні засоби моделювання теплових процесів у МЕР та існуючі дослідження і моделі процесу теплообміну з використанням випаровування та кипіння рідини.

На підставі проведеного аналізу сучасних підходів до тепловідведення в мікроелектронних пристроях виявлено, що використання зміни агрегатного стану речовини дає можливість значно інтенсифікувати тепловідведення, оскільки характеризується високими коефіцієнтами тепловіддачі. Непряме рідинне охолодження з використанням випаровування дає можливість уникати контакту рідини, яка випаровується, з мікроелектронним пристроєм, що полегшує процес конструювання систем охолодження та збільшує їхню надійність. Виявлено, що непряме рідинне охолодження з використанням окремого тепловідводу для кожного тепловиділяючого елемента незначно поступається в здатності відводити тепло прямому рідинному охолодженню. Тому в дисертаційній роботі розглядається теплообмін в мікроелектронних пристроях із застосуванням саме цього підходу до охолодження.

В результаті огляду сучасних систем для моделювання теплових процесів у мікроелектронних пристроях обґрунтовано необхідність розроблення програмного забезпечення для моделювання процесу теплообміну з врахуванням впливу випаровування в МЕР за критичних умов.

На основі аналізу літературних джерел виявлено особливості моделювання процесу випаровування і основні фактори, які потрібно врахувати при моделюванні. Також аналіз показав відсутність моделей, які давали б змогу моделювати процес теплообміну з використанням випаровування для додаткового тепловідведення в критичних умовах та враховували б нелінійність процесу теплообміну при випаровуванні рідини.

**У другому розділі** формалізовано математичні моделі процесу теплообміну в МЕР з використанням випаровування рідини та кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення у критичних умовах, що мають різну область застосування, рівень адекватності та швидкості аналізу. Для цих моделей розроблено методи аналізу температурного поля.

Розглядається МЕР, конструкція якого зображена на рис. 1. На підкладці встановлений кристал, що захищений корпусом. Відведення тепла від МЕР в навколишнє середовище забезпечує приєднана до корпусу кристалу тепловідвідна пластина. Між пластиною та корпусом міститься теплопровідна паста, яка поліпшує тепловий контакт. Коли температура корпусу перевищує критичну, то на поверхню тепловідвідної пластини



подається рідина, яка в результаті кипіння забезпечує додаткове відведення тепла.

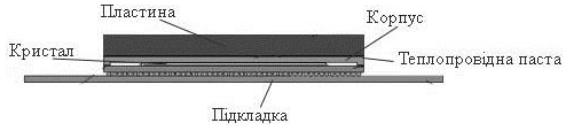


Рис. 1. Конструкція МЕР

При моделюванні враховуються два режими теплообміну: 1) за звичайних умов, коли тепловідведення відбувається за рахунок конвекції; 2) при кипінні рідини, яка подається на поверхню за умови перевищення критичної температури. Кипіння рідини забезпечує додаткове тепловідведення за критичних умов в МЕР. Теплову модель МЕР представлено у вигляді нескінченної пластини товщиною  $D$  (рис. 2). Пластину знизу нагріває потік тепла величини  $q_0$ . Поки температура є меншою за критичну, то тепло відводиться з поверхні пластини за рахунок конвекції. В початковий момент часу пластина має однорідну температуру  $T_b$ . Коли температура нижньої поверхні пластини перевищує  $T_{cr}$ , на верхню поверхню виливається рідина, яка в результаті кипіння відводить тепло. Утворений шар рідини має набагато меншу товщину, ніж товщина пластини. Температура навколишнього середовища –  $T_\infty$ , атмосферний тиск –  $P_{atm}$ . Коефіцієнт теплопровідності пластини залежить від температури.

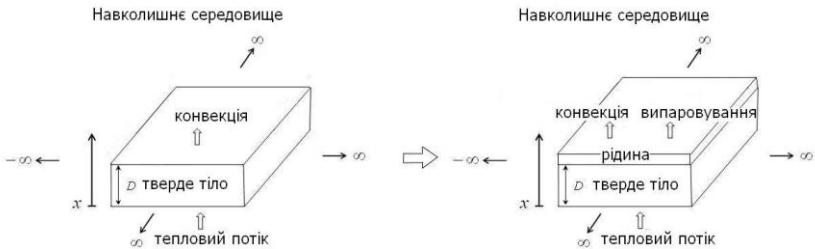


Рис. 2. Теплова модель МЕР

Процес теплообміну в звичайному режимі описується таким нелінійним диференціальним рівнянням у частинних похідних та початковою і граничними умовами:

$$c_s(T_1)\rho_s(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right), \quad k(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=0} = -q_0'', \quad -k(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=D} = q_{conv}'' ,$$

$$T_1(x, t=0) = T_b .$$

де  $T_1 = T_1(x, t)$  – температура пластини в точці з координатою  $x$ , в момент часу  $t$  у звичайному режимі;  $k(T)$ ,  $c_s(T)$ ,  $\rho_s(T)$  – коефіцієнт

теплопровідності  $[Bm/m \cdot K]$ , питома теплоємність  $[Дж/кг \cdot K]$  і густина  $[кг/м^3]$  матеріалу пластини відповідно,  $q_0''$  – величина потоку тепла, який передається від МЕП до тепловідвідної пластини  $[Bm/m^2]$ ,  $q_{conv}''$  – потік тепла, який відводиться від поверхні за рахунок конвекції  $[Bm/m^2]$ ,  $T_b$  – початкова температура пластини  $[K]$ .

При використанні кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення процес теплообміну в критичному режимі описується такими рівняннями

$$c_s(T_2)\rho_s(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right), \quad k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=0} = -q_0'',$$

$$-k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=D} = q_{conv}'' + q_{boil}'' \quad T_1(x, t = t_{cr}) = T_2(x, t = t_{cr}),$$

де  $T_2 = T_2(x, t)$  – температура пластини в точці з координатою  $x$ , в момент часу  $t$  при критичному режимі,  $q_{boil}''$  – потік тепла, який відводиться від поверхні за рахунок кипіння  $[Bm/m^2]$ .

Потік тепла, який відводиться за рахунок конвекції згідно із законом Ньютона описується рівнянням

$$q_{conv}'' = h(T_i(D, t) - T_\infty), \quad i = 1, 2,$$

де  $h$  – коефіцієнт конвективного теплообміну з навколишнім середовищем  $[Bm/m^2 \cdot K]$ ,  $T_\infty$  – температура навколишнього середовища,  $i = 1$  для звичайного режиму та  $i = 2$  для критичного режиму.

Потік тепла, який відводиться за рахунок кипіння рідини, обчислюється

$$q_{boil}'' = \mu_l h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3, \quad T_2 \geq T_{boil} + 5$$

де  $h_{fg}$  – питома теплота випаровування рідини  $[Дж/кг]$ ,  $\mu_l$  – в'язкість рідини  $[кг/с \cdot м]$ ,  $g$  – прискорення вільного падіння  $[м/с^2]$ ,  $\rho_l, \rho_v$  – густина речовини, яка кипить у рідкому та газоподібному станах  $[кг/м^3]$  відповідно,  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини  $[Н/м]$ ,  $c_{p,l}$  – питома теплоємність рідини при сталому тиску,  $\Delta T_e = T_2(D, t) - T_{boil}$  – різниця між температурою верхньої поверхні пластини і температурою кипіння рідини,  $C_{s,f}$ ,  $n$  – константи, які знаходять експериментально для кожної пари поверхня-рідина,  $Pr_l$  – число Прандтля для рідини.

На практиці виникають ситуації, при яких тепловідлення МЕП не є настільки великим, щоб забезпечити кипіння рідини на поверхні

тепловідвідної пластини, або товщина плівки рідини є настільки малою, що тепло передається через плівку рідини та відводиться з її поверхні в результаті випаровування. За таких умов різниця температур у плівці є недостатньою для того, щоб почалось кипіння рідини. Тоді інтенсифікація тепловідведення відбувається за рахунок випаровування рідини. Для таких випадків побудовано математичну модель процесу теплообміну в МЕП з використанням випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення в критичних умовах.

Процес теплообміну у звичайному режимі описується такими ж рівняннями, як і в попередній моделі.

У критичному режимі процес теплопровідності описується рівняннями

$$c_s(T_2)\rho_s(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right), \quad k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Bigg|_{x=0} = -q_0'',$$

$$-k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Bigg|_{x=D} = q_{conv}'' + q_{evap}'', \quad T_1(x, t = t_{cr}) = T_2(x, t = t_{cr}),$$

де  $q_{evap}''$  – потік тепла, який відводиться від поверхні в результаті випаровування рідини  $[Bm/m^2]$ .

Потік тепла, який відводиться за рахунок конвекції знаходиться так само, як і в попередній моделі.

Потік тепла, який відводиться за рахунок випаровування рідини обчислюється

$$q_{evap}'' = h_{fg}h\frac{M_A}{R\rho_a c_a}Le^{-\frac{2}{3}}\left(\frac{p_{A,sat}(T_2(D,t))}{T_2(D,t)} - \frac{p_{A,\infty}}{T_\infty}\right),$$

де  $M_A$  – молярна маса рідини  $[кг/моль]$ ,  $R$  – універсальна газова стала,  $p_{A,sat}(T_2(D,t))$ ,  $p_{A,\infty}$  – тиск насиченої пари рідини біля поверхні поділу рідина-газ при температурі  $T_2$  і тиск насиченої пари рідини в навколишньому середовищі при температурі  $T_\infty$   $[Па]$ ,  $\rho_a$  – густина повітря,  $c_a$  – питома

теплоємність повітря при сталому тиску,  $Le = \frac{\alpha_a}{D_{AB}}$  – число Льюїса,  $\alpha_a$  – коефіцієнт температуропровідності повітря,  $D_{AB}$  – коефіцієнт дифузії для двокомпонентної суміші.

У випадку використання води для інтенсифікації тепловідведення потік тепла, який відводиться випаровуванням, має дещо інший вигляд

$$q_{evap}'' = h_{fg}h\frac{M_A}{R\rho_a c_a}Le^{-\frac{2}{3}}\left(\frac{p_{A,sat}(T_2(D,t))}{T_2(D,t)} - \frac{\varphi \cdot p_{A,sat}(T_\infty)}{T_\infty}\right),$$

де  $\varphi$  – відносна вологість повітря.

Методи аналізу температурного поля для лінійних моделей не застосовні до аналізу температурного поля для нелінійних моделей. Тому в роботі удосконалено метод аналізу температурного поля для розроблених нелінійних математичних моделей. При цьому застосовується сукупність числових методів. Спочатку відбувається дискретизація задачі за часом згідно з методом Рунге, коли похідні за часом замінюються скінченно-різницевиими співвідношеннями. Внаслідок дискретизації початково-крайова задача зводиться до послідовності нелінійних граничних задач, які розв'язуються послідовно. Оскільки кожна з граничних задач є нелінійною, то для їх розв'язування на кожному часовому шарі використано метод продовження за параметром. За цим методом, якщо не вдається розв'язати задачу для заданого значення потоку  $q_0''$  (розв'язок розбігається), то розв'язується задача із значенням потоку  $p \cdot q_0''$ , де  $p \in (0,1]$ . Якщо вдається знайти розв'язок задачі для деякого значення параметра  $p$ , тоді він збільшується на деяку величину  $\Delta p$  і здійснюється пошук функції  $\Delta T$ , на яку зміниться розв'язок задачі при зміні параметра  $p$ .

Для знаходження функції  $\Delta T$  розв'язано нелінійну крайову задачу відносно приростів шуканого розв'язку задачі теплообміну в МЕП з використанням випаровування та кипіння рідини.

Обчислення значень функції  $\Delta T$  здійснюється ітераційно, при цьому на кожній наступній ітерації знаходиться уточнення розв'язку, отриманого на попередній ітерації. Для ітераційного знаходження приростів значень температури на кожній ітерації необхідно розв'язати СЛАР.

Для випадків, коли необхідно зменшити обчислювальні затрати та збільшити швидкість аналізу за рахунок зменшення точності, запропоновано спосіб лінеаризації нестационарної нелінійної математичної моделі теплообміну в МЕП з використанням випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення в критичних умовах.

Лінеаризована модель має такий вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad k_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -q_0,$$

$$k_s \frac{\partial T}{\partial x} = h_{fg} h \frac{M_A}{R \rho_a c_a} Le^{\frac{2}{3}} \left( C_1 T + C_2 - \frac{P_{A,\infty}}{T_\infty} \right) + h(T(D,t) - T_\infty), \quad T(x,t=0) = T_b.$$

У випадку використання води для інтенсифікації тепловідведення, гранична умова має вигляд

$$k_s \frac{\partial T}{\partial x} = h_{fg} h \frac{M_A}{R \rho_a c_a} Le^{\frac{2}{3}} \left( C_1 T + C_2 - \frac{\varphi \cdot P_{A,sat}(T_\infty)}{T_\infty} \right) + h(T(D,t) - T_\infty).$$

Лінеаризація математичної моделі відбувається за рахунок апроксимації нелінійної функції  $\frac{P_{A,sar}(T(D,t))}{T(D,t)}$  в граничних умовах лінійною функцією вигляду  $C_1T + C_2$ . Константи  $C_1$  і  $C_2$  обчислюють за допомогою методу найменших квадратів.

Лінеаризація моделі дає можливість застосувати для її аналізу як числові так і аналітичні методи. В роботі здійснено аналіз лінеаризованої нестационарної моделі теплообміну в МЕП з використанням випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення в критичних умовах методом розподілення змінних. При цьому знайдено аналітичний розв'язок лінеаризованої задачі.

У **третьому розділі** описано розроблене програмне забезпечення для моделювання теплообміну в МЕП з використанням випаровування та кипіння в критичних умовах: компоненти програмного комплексу, інформаційну модель створеної програмної системи, обчислювальні схеми для програмної реалізації методів аналізу математичних моделей теплообміну в МЕП з використанням випаровування в критичних умовах. Інтерфейси програмного комплексу зображено на рис.3.

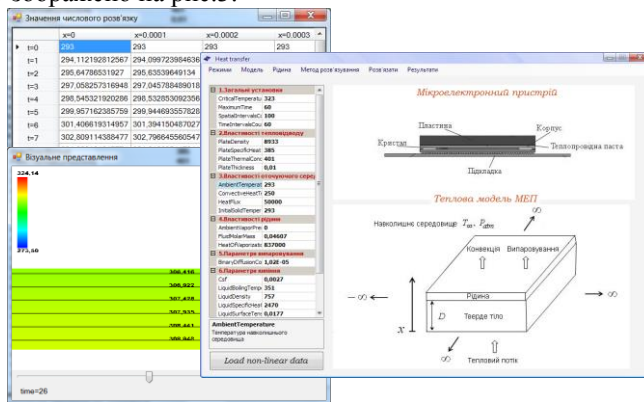


Рис. 3. Вигляд розроблених інтерфейсів програмного комплексу

Програмний комплекс розроблено в середовищі візуального програмування Microsoft Visual Studio 2010 мовою програмування C++, перевагами якої є висока швидкодія та масштабованість. Процесор програмного комплексу реалізований згідно з принципами об'єктно-орієнтованого програмування у вигляді класів та їхніх функцій-членів мовою C++ і скомпільований у динамічну бібліотеку DLL (dynamic link library). Це створює можливість підключення програми до існуючих систем автоматизованого проектування з метою розширення функціоналу. Використання динамічної бібліотеки забезпечує високу гнучкість системи,

оскільки це дозволяє викликати функції бібліотеки програмним чином в інших прикладних програмних комплексах.

На рис. 4 за допомогою уніфікованої мови моделювання (UML) зображено інформаційну модель розробленого програмного комплексу для моделювання теплообміну в МЕР з використанням випаровування в критичних умовах у вигляді діаграми класів.

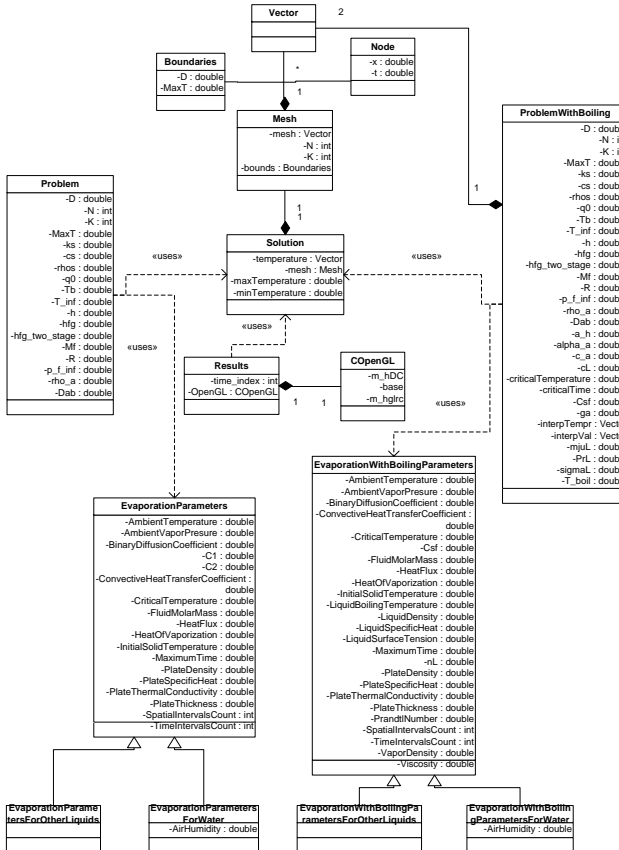


Рис. 4. Інформаційна модель розробленого програмного комплексу

Класи розроблені в рамках парадигм об'єктно-орієнтованого підходу: вони інкапсулюють властивості об'єктів, приховуючи внутрішню реалізацію від користувача, надають користувачеві інтерфейс для роботи з об'єктами завдяки функціям-членам класів, при побудові класів використовуються наслідування та поліморфізм.

В роботі представлено обчислювальні схеми методів аналізу температурного поля для розроблених математичних моделей.

Обчислювальна схема аналізу температурного поля для теплообміну в МЕП з використанням випаровування в критичних умовах зображена на рис.5.

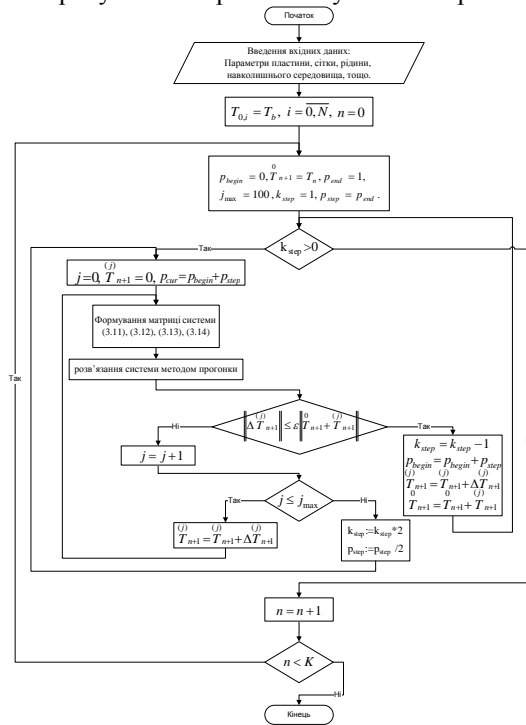


Рис. 5. Обчислювальна схема аналізу температурного поля для нелінійних моделей

У четвертому розділі наведено перелік вхідних даних, які необхідні для моделювання процесу теплообміну в МЕП з використанням випаровування або кипіння рідини за критичних умов. Здійснено порівняльний аналіз результатів моделювання, отриманих з використанням лінійної та нелінійної моделей процесу теплообміну з врахуванням впливу випаровування. Досліджено вплив вхідних параметрів на процес тепловідведення.

В результаті числових експериментів виявлено, що близькість температури, отриманої з використанням лінеаризованої моделі, до температури, отриманої з використанням нелінійної моделі, залежить від значень багатьох параметрів, зокрема від вибраної рідини; від вибору вузлів для лінійної апроксимації; від величини потоку, що нагріває тіло; від режиму конвективного теплообміну. Для досліджених матеріалів температури, отримані з використанням двох моделей, у звичайному режимі незначно відрізняються одна від одної, однак можуть суттєво відрізнятись при

критичному режимі. Тому в загальному випадку краще використовувати нелінійну модель для моделювання процесу теплообміну за критичних умов, а лінеаризовану модель варто використовувати для моделювання звичайного режиму та у випадках, коли виникає потреба мінімізувати час обчислень та обчислювальні затрати за рахунок зменшення точності.

Значення температури при різних режимах конвективного теплообміну, що отримані з використанням двох моделей наведені на рис. 6.

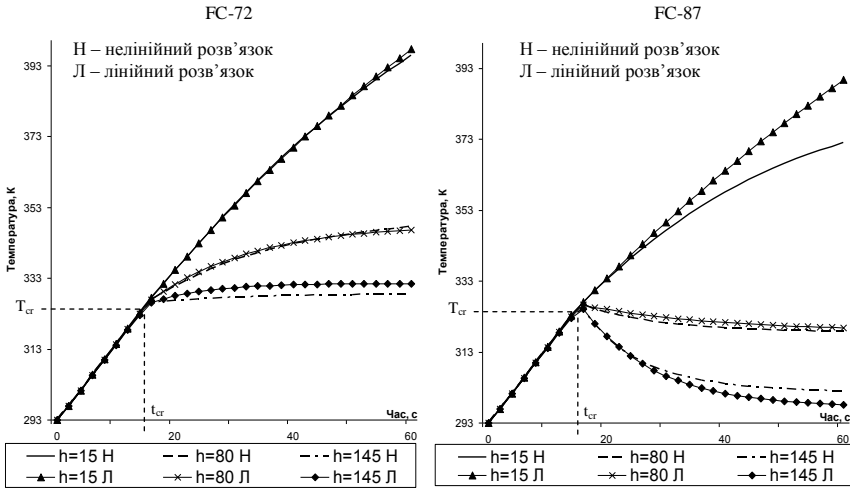


Рис. 6. Розв'язки при різних режимах конвективного теплообміну

Дослідження впливу випаровування рідини на тепловідведення в критичних умовах здійснювалось на основі аналізу теплових потоків, які відводяться тепловідвідною пластиною в процесі теплообміну (рис. 7).

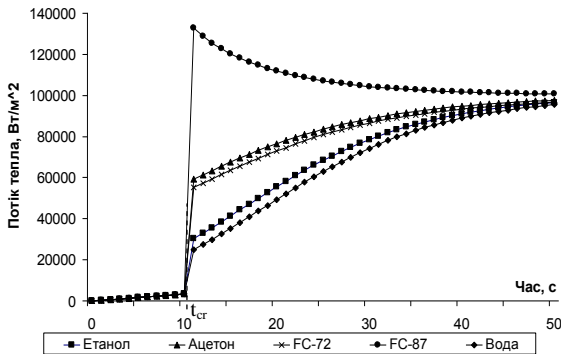


Рис. 7. Потоки тепла, які відводяться при використанні випаровування



В момент часу, коли температура тепловідводу перевищує критичну і на поверхню пластини подається рідина, потік тепла, який відводиться з поверхні, різко зростає, що є наслідком інтенсифікації тепловідведення за рахунок випаровування рідини. При цьому у випадку використання рідини FC-87 потік, який відводиться за рахунок випаровування, в критичний момент більш як у 35 разів більший за потік, який відводиться за рахунок конвекції. Серед досліджуваних рідин у випадку використання рідини FC-87 потік, який відводиться з поверхні, є найбільшим.

Дослідження впливу кипіння рідини на тепловідведення в критичних умовах здійснювалось на основі аналізу зміни температурного поля тепловідвідної пластини з часом при використанні кипіння та без, а також на основі аналізу теплових потоків, які відводяться в процесі теплообміну. На рис. 8 показано зміну температури тепловідводу на нижній поверхні з часом, оскільки на нижній поверхні пластини температура є найвищою. На відміну від випаровування, яке відбувається при будь-якій температурі, кипіння рідини можливе лише тоді, коли температура тепловідвідної пластини перевищує температуру кипіння. Тому рідина подається в момент, коли температура пластини перевищує температуру кипіння. Після цього температура пластини зростає повільніше, оскільки тепло додатково відводиться за рахунок кипіння рідини. Зростання температури припиняється, коли різниця між температурою на верхній поверхні пластини та температурою кипіння рідини стає такою, що забезпечує відведення необхідного потоку тепла.

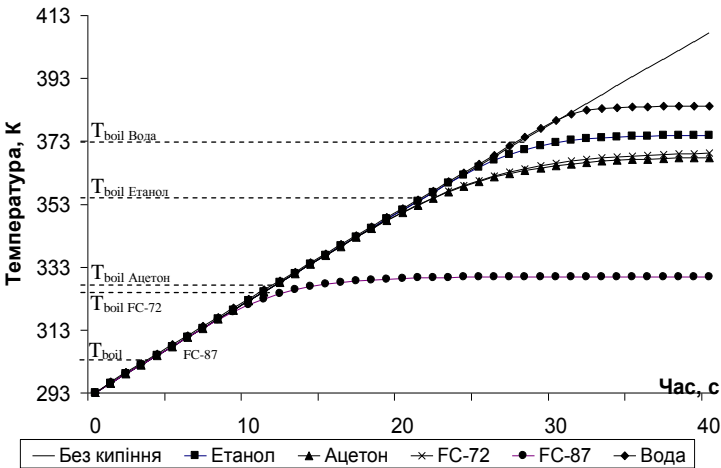


Рис. 8. Зміна температури при використанні кипіння

Чим нижча температура кипіння рідини, тим нижча температура встановлюється при використанні кипіння для інтенсифікації тепловідведення.

### **ВИСНОВКИ**

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу розробки математичного і програмного забезпечення для комп'ютерного аналізу процесів теплообміну в мікроелектронних пристроях при використанні випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації відведення тепла за критичних умов.

1. Проведено аналіз і систематизацію: можливостей відомих програмних засобів моделювання процесу теплообміну в МЕР; сучасних підходів до забезпечення тепловідведення у МЕР та математичних моделей процесу теплообміну в елементах МЕР з використанням випаровування та кипіння рідини. Сформульовано основні вимоги до математичного та програмного забезпечення для комп'ютерного аналізу процесів теплообміну в МЕР при використанні випаровування та кипіння рідини за критичних умов.
2. Побудовано моделі процесу теплообміну з використанням кипіння та випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення в елементах МЕР, які враховують залежність теплофізичних параметрів від температури, що дає змогу проводити тепловий аналіз елементів МЕР за критичних умов.
3. Для моделювання тепловідведення випаровуванням та кипінням в електронних пристроях із використанням нелінійних моделей удосконалено метод аналізу температурного поля елементів МЕР.
4. Для зменшення обчислювальних затрат за рахунок зменшення точності удосконалено метод аналізу температурного поля елементів МЕР при використанні випаровування рідини, коли нелінійна залежність потоку тепла, що відводиться через випаровування, від температури апроксимується лінійною функцією методом найменших квадратів.
5. На основі створених математичних моделей та методів аналізу температурного поля розроблено прикладний програмний комплекс для моделювання процесу тепловідведення випаровуванням та кипінням рідини за критичних умов в елементах МЕР, який дає можливість автоматизувати хід розв'язування задач аналізу нестационарних теплових процесів в МЕР з випаровувальним охолодженням, та отримувати результати моделювання у числовій та графічній формах.
6. В результаті обчислювальних експериментів, проведених з використанням розроблених прикладних програмних засобів виявлено, що випаровування та кипіння суттєво інтенсифікує процес

тепловідведення і є ефективним засобом для додаткового відведення тепла за критичних умов.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Федасюк Д. В. Моделювання процесу охолодження мікроелектронних пристроїв з використанням кипіння рідини за критичних умов [Електронний ресурс] / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2011. – № 4. Режим доступу до журн.: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2011\\_4/2011-4.files/uk/11dvfimd\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2011_4/2011-4.files/uk/11dvfimd_ua.pdf)
2. Федасюк Д. В. Знаходження розв'язку нелінійної задачі теплопровідності з використанням випаровування для інтенсифікації тепловідведення / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2011. – № 711. – С. 38–47.
3. Федасюк Д. В. Порівняння нелінійної та лінійної моделей процесу теплообміну з використанням випаровування / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Вісник Національного технічного університету "ХП". Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 53. – С. 139–145.
4. Федасюк Д. В. Моделювання процесу охолодження при критичних умовах за рахунок випаровування рідини / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2011. – № 710. – С. 18–26.
5. Федасюк Д. В. Дослідження впливу випаровування і конвекції на процес відведення тепла з поверхні пластини / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2010. – № 686. – С. 255–264.
6. Федасюк Д. В. Моделювання теплообміну з урахуванням випаровування на поверхні пластини / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 650. – С. 151–158.
7. Fedasyuk D. Non-linear transient heat exchange with taking into account evaporation problem solving / Dmytro Fedasyuk, Taras Mukha // Proceedings of the VIIth International Conference in MEMS Design (MEMSTECH'2011). – Lviv-Polyana, 2011. – P. 202–204.
8. Fedasyuk D. Heat transfer modeling with using of liquid boiling to cooling enhancement / Dmytro Fedasyuk, Taras Mukha // Proceedings of the 6-th International Conference on Computer Science and Information Technologies CSIT-2011. – Lviv, 2011. – P. 116–117.
9. Fedasyuk D. Modeling of cooling process under critical conditions due to liquid evaporations / Dmytro Fedasyuk, Taras Mukha // Proceedings of the XIth International Conference The Experience of Designing and Application of

- CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2011). – Lviv-Polyana, 2011. – P. 12–14.
10. Fedasyuk D. Modeling of heat exchange with evaporation on plate surface / Dmytro Fedasyuk, Taras Mukha // Proceedings of the 3-rd International Conference on Computer Science and Information Technologies CSIT-2008. – Lviv, 2008. – P. 55–58.
  11. Федасюк Д. В. Застосування випаровування для інтенсифікації тепловідведення / Д. В. Федасюк, Т. О. Муха // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». – Вінниця, 2010. – С. 35–36.
  12. Fedasyuk D. Evaluation of evaporation influence on the heat dissipation process from a flat plate surface / Dmytro Fedasyuk, Taras Mukha // Proceedings of the 5-th International Conference on Computer Science and Information Technologies CSIT-2010. – Lviv, 2010. – P.111–113.
  13. Fedasyuk D. Numerical investigation of mass loss of liquid during evaporative cooling / Dmytro Fedasyuk, Taras Mukha // Proceedings of the 18-th Ukrainian-Polish Conference on “CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Problems” CADMD'2010. – Lviv, 2010. – P. 18–19.
  14. Федасюк Д. В. Моделирование процесса охлаждения в критических условиях за счет испарения жидкости / Федасюк Д. В., Муха Т. О. // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів». – Черкаси, 2011. – С. 279–281.

## АНОТАЦІЇ

**Муха Т.О. Прикладні програмні засоби моделювання процесу тепловідведення кипінням і випаровуванням в електронних пристроях.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем. – Національний університет “Львівська політехніка” МОНмолодьспорту, Львів, 2012.

В дисертаційній роботі розв'язано важливу наукову задачу розроблення математичного і програмного забезпечення для комп'ютерного аналізу процесів теплообміну в елементах мікроелектронних пристроїв при використанні випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації відведення тепла за критичних умов. Для вирішення цієї задачі побудовано математичні моделі процесу теплообміну з використанням випаровування та кипіння рідини як засобу охолодження за критичних умов в електронних пристроях, розроблено методи аналізу температурного поля. Розроблено прикладні програмні засоби для автоматизації процесу розв'язання задач нестационарного аналізу теплових процесів в МЕП з використанням випаровування та кипіння рідини, та для представлення результатів

моделювання у числовій та графічній формах. Це дало змогу дослідити та показати ефективність використання випаровування та кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення за критичних умов у МЭП.

*Ключові слова:* прикладні програмні засоби, випаровування, кипіння, теплообмін, нелінійна математична модель, інтенсифікація тепловідведення.

**Муха Т.О. Прикладные программные средства моделирования процесса теплоотвода кипением и испарением в электронных устройствах.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.03 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем. – Национальный университет “Львовская политехника” Министерства образования и науки, молодежи и спорта, Львов, 2012.

В диссертационной работе решена важная научная задача разработки математического и программного обеспечения для компьютерного анализа процессов теплообмена в элементах микроэлектронных устройств при использовании испарения и кипения жидкости для интенсификации отвода тепла в критических условиях. Для решения этой задачи построены математические модели процесса теплообмена с использованием испарения и кипения жидкости как средства охлаждения при критических условиях в электронных устройствах, разработаны методы анализа температурного поля. Разработаны прикладные программные средства для автоматизации решения задач нестационарного анализа тепловых процессов в МЭП с использованием испарения и кипения жидкости, и для представления результатов моделирования в числовой и графической формах. Это позволило исследовать и показать эффективность использования испарения и кипения жидкости для интенсификации теплоотвода в критических условиях в МЭП.

В первом разделе рассмотрены современные подходы к обеспечению теплоотвода в МЭП, современные средства моделирования тепловых процессов в МЭП и существующие модели процесса теплообмена с использованием испарения. Обоснована необходимость создания прикладных программных средств и разработки математического обеспечения для компьютерного анализа процесса теплообмена в элементах МЭП при использовании испарения и кипения жидкости для интенсификации охлаждения в критических условиях.

Во втором разделе формализованы математические модели процесса теплообмена в МЭП с использованием испарения и кипения жидкости для интенсификации теплоотвода в критических условиях, имеющие разную область применения, уровень адекватности и скорости анализа: Для каждой

из построенных математических моделей разработан метод анализа температурного поля.

В третьем разделе описаны разработанные прикладные программные средства моделирования процесса теплоотвода кипением и испарением в элементах МЭП: компоненты программного комплекса, информационную модель созданной программной системы, вычислительные схемы программной реализации методов анализа температурного поля для математических моделей теплообмена в МЭП с использованием испарения и кипения в критических условиях.

В четвертом разделе приведен перечень исходных данных, необходимых для моделирования процесса теплообмена в МЭП с использованием испарения или кипения жидкости в критических условиях. Осуществлен сравнительный анализ результатов моделирования полученных с использованием линейной и нелинейной моделей процесса теплообмена с учетом влияния испарения. Исследовано влияние входных параметров на процесс теплоотвода с использованием испарения или кипения жидкости в критических условиях.

*Ключевые слова:* прикладные программные средства, испарение, кипение, теплообмен, нелинейная математическая модель, интенсификация теплоотвода.

**Mukha T.O. Applied software for simulation of heat dissipation process due to boiling and evaporation in electronic devices.** – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. degree by specialty 01.05.03 - Mathematical and software support of computational machines and systems. – Lviv Polytechnic National University Ministry of education and science, youth and sport of Ukraine , Lviv, 2012.

The important scientific problem of mathematical and software support development for computer analysis of heat transfer processes into microelectronic devices (MED) elements using liquid evaporation and boiling for heat dissipation intensification under critical conditions has been solved in this dissertation. To solve this problem the mathematical models of heat transfer with cooling due to liquid evaporation and boiling under critical conditions into electronic devices have been built, the methods of thermal field analysis have been developed. The applied software for problems solving automation of heat transfer processes transient analysis into MED using liquid evaporation and boiling and for numerical and graphical representation of modeling results have been developed. It has taken opportunity to investigate and show liquid evaporation and boiling using effectiveness for heat dissipation intensification under critical conditions into MED.

*Key words:* applied software, evaporation, boiling, heat transfer, nonlinear mathematical model, heat dissipation intensification.