

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

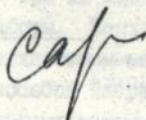
На правах рукописи

САРИГЛО Владимир Георгиевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ
МОНТАЖЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ**

Специальность: 05.14.05 "Теоретическая теплотехника"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Киев - 1995



Диссертация

Работа выполнена в Институте технической теплофизики
Национальной Академии Наук Украины.

Научные руководители: доктор технических наук
Н.М. Фялко,
кандидат технических наук
В.Г. Прокопов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Н.И. Никитенко,
кандидат физико-математических наук
Д.Г. Блинов

Ведущая организация: Институт проблем моделирования
в энергетике НАН Украины

Защита диссертации состоится "5" декабря 1995 г. в 13³⁰ часов
на заседании специализированного ученого совета К 50.04.03
в Институте технической теплофизики НАН Украины по адресу:
252057, г. Киев-57, ул. Желязова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
технической теплофизики НАН Украины

Автореферат разослан "3" ноября 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета,
кандидат технических наук

Г.Р. Кудрицкий

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Среди большого числа стремительно развивающихся технологий электроники одними из наиболее перспективных являются так называемые технологии поверхностного монтажа электронных компонентов. Данные технологии позволяют на порядок уменьшить площадь коммутационной платы, занимаемую компонентами монтажа, значительно повысить плотность монтажа, уменьшить массу и габариты печатных узлов и пр. Технологии поверхностного монтажа открывают значительные возможности для автоматизации производства и обладают такими достоинствами, как высокая производительность, экономичность, экологическая чистота и т.д.

В теплофизическом аспекте важнейшей отличительной особенностью технологий поверхностного монтажа является наличие сравнительно высоких уровней температур и температурных градиентов на установочной поверхности печатных плат, где закрепляются монтируемые изделия электронной техники. В этой ситуации возникает проблема обеспечения специальных температурных режимов печатных узлов, при которых исключается возможность перегрева термочувствительных компонентов монтажа, реализуются допустимые уровни температурных напряжений и т.п.

Как следует из анализа опубликованной литературы, исследования, посвященные изучению температурных режимов печатных узлов в условиях поверхностного монтажа электронных компонентов, крайне малочисленны, причем теоретические исследования базируются, главным образом, на результатах, полученных с использованием упрощенных моделей рассматриваемых явлений. Вместе с тем сложность реализующихся в данной ситуации процессов теплопереноса - их многомерность, нелинейность, наличие фазовых превращений, а также существенная разнородность геометрических и теплофизических характеристик конструктивных элементов печатных узлов обуславливают необходимость применения адекватных моделей изучаемых явлений, разработки новых и совершенствования существующих методических приемов, используемых при их моделировании и анализе.

Цель работы. Исследование процессов теплопереноса, протекающих при поверхностном монтаже печатных узлов в условиях реализации различных способов нагрева зоны пайки, на основе использования уточненных математических моделей, новых методических приемов, алгоритмов расчета и соответствующих комплексов программ и получение данных, необходимых при разработке и оптимизации базовых технологий монтажа на поверхность.

Задачи исследования:

- разработка на базе учета основных особенностей изучаемых процессов теплопереноса уточненных математических постановок и методических приемов численного решения рассматриваемых в работе задач;
- создание комплекса прикладных программ для решения поставленных задач на ЭЕМ;
- исследование температурных режимов печатных узлов при поверхностном монтаже электронных компонентов с использованием индивидуальной газовой пайки;
- анализ теплового состояния печатных узлов в условиях монтажа компонентов на поверхность печатных плат с применением резистивного и инфракрасного нагрева.

Научная новизна:

- сформулированы уточненные математические модели процессов теплопереноса, протекающих в условиях осуществления рассматриваемых в работе технологий;
- реализованы алгоритмы решения задач теплопереноса в печатных узлах, базирующиеся на использовании эффектов регионального влияния;
- разработана методика моделирования процессов теплопереноса в объектах сложной геометрической формы на основе предложенного локально-сетевого метода конечных элементов;
- созданы пакеты прикладных программ, реализующие разработанные методические приемы и алгоритмы расчета;
- выполнен анализ закономерностей протекания процессов теплопереноса в печатных узлах, монтируемых с использованием газового нагрева;
- изучены особенности изменения тепловых состояний печатных узлов в условиях пайки при резистивном и инфракрасном нагреве.

Предмет и методы исследования. Основным предметом исследования являлись процессы теплопереноса, протекающие в условиях реализации прогрессивных технологий поверхностного монтажа печатных узлов. Изучение данных процессов проводилось, главным образом, с использованием методов математического моделирования при реализации широкого комплекса вычислительных экспериментов.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Результаты выполненных исследований были использованы при создании базовых технологических процессов поверхностного монтажа

и соответствующего автоматизированного оборудования для их реализации. Эти разработки внедрены в НИИЭСМ (г.Киев), в НИИ "Пульсар" (г.Москва), в НПО "Сатурн" (г.Киев), на заводе "Радиоизмеритель" (г.Киев), на ПО "Интеграл" (г.Минск).

Обоснованность и достоверность результатов выполненных теплофизических исследований обусловлены их соответствием данным натуральных экспериментов, корректностью используемых физико-математических моделей анализируемых процессов теплопереноса, тщательным тестированием созданного программного обеспечения и эффективностью разработанных с их использованием технологических процессов монтажа печатных уалов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на международной конференции по тепло- и массообмену в технологии и эксплуатации электронных и микроэлектронных систем (Минск, 1989г.), на первой украинско-польской школе-семинаре "Смешанные задачи механики неоднородных структур" (Шацк, 1995г.), на конференциях молодых ученых ИТТФ НАН Украины (1990г., 1991г.) и обсуждались на научных семинарах в Научно-исследовательском институте электронного спецмашиностроения, Институте технической теплофизики и в Киевском политехническом институте.

Личный вклад автора.

Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ.

Структура и объем. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.

Объем диссертации составляет 189 страниц, в том числе 5 таблиц и 69 рисунков. Список литературы включает 109 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи работы и положения, определяющие ее научную новизну. Приведены краткое содержание работы и информация о внедрении результатов выполненных исследований.

В первой главе диссертации рассматривается содержание основных методических разработок, которые используются в настоящем исследовании при моделировании процессов теплопереноса, протекающих в

условиях реализации технологий поверхностного монтажа ПУ. Показано, что данные методики базируются, главным образом, на учете специфических особенностей анализируемых процессов.

В рамках этой главы освещаются основные особенности методики регионального моделирования теплового состояния термочувствительных КЭМ. Указанная методика основана на учете эффекта локализации влияния специфики всех условий однозначности, характеризующих каждый конкретный КЭМ. Методика содержит три основных этапа. На первом этапе выполняется приближенная оценка температурного режима ПУ в целом и находятся местоположения термочувствительных компонентов монтажа. При этом производится понижение размерности соответствующей задачи теплопереноса, упрощаются тепловые и математические модели, описывающие температурные режимы ПУ, и т.д. На втором этапе определяются размеры и конфигурация зон регионального влияния, т.е. подобластей, пределами которых практически ограничивается влияние на рассматриваемый процесс особенностей условий однозначности, отвечающих термочувствительным компонентам монтажа. На третьем, завершающем этапе определяется тепловое состояние собственно термочувствительных КЭМ. При этом задачи теплопереноса решаются лишь для подобластей, содержащих соответствующие зоны регионального влияния. Как показали проведенные исследования, использование методики регионального моделирования позволяет существенно упростить процесс нахождения решения формулируемых тепловых задач.

Реализация данной методики осуществлялась с использованием предложенного в работе локально-сетевых методов конечных элементов. Основная идея ЛС МКЭ состоит в объединении характерных достоинств различных численных методов, а именно, метода конечных элементов и сетевых методов. То есть в ЛС МКЭ совмещаются универсальность и эффективность методов конечных элементов с индифферентностью к пространственной размерности и физической наглядностью, свойственной сетевым методам. Отмеченное локально-сетевое построение предлагаемого метода позволяет сохранить в нем общие принципы реализации стандартных МКЭ и дает возможность при определенных условиях получить идентичные результирующие системы алгебраических уравнений для ЛС МКЭ и МКЭ.

Важнейшей особенностью ЛС МКЭ является способ определения коэффициентов результирующей системы алгебраических уравнений. Последние интерпретируются как термические проводимости соответствующих ветвей сети. В качестве примера рассмотрим особенности наход-

дения проводимостей ветвей ячейки сети при решении двумерной задачи теплопроводности. Дискретизация области реализуется с использованием треугольных элементов с тремя узлами в вершинах (рис. 1).

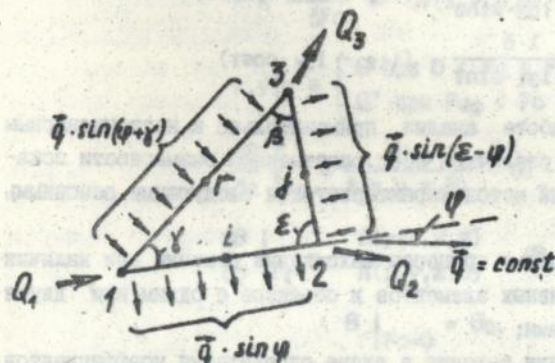


Рис. 1. К определению проводимостей ветвей ячейки сети при решении двумерных задач теплопроводности на основе ЛС МКЭ.

Согласно известному подходу сетевых методов, каждому элементу дискретизации ставится в соответствие ячейка сети из трех стержней с проводимостями G_{12} , G_{23} , G_{31} . Для определения данных проводимостей в ЛС МКЭ используется условие эквивалентности обеих указанных систем по температу-

рам в узловых точках и переносимым тепловым потокам. Причем достаточно выполнить это условие при $\vec{q} = \text{const}$, поскольку в данной ситуации процесс теплопереноса в пределах каждого элемента характеризуется постоянством вектора плотности теплового потока \vec{q} .

Пусть направление вектора плотности теплового потока \vec{q} определяется углом наклона φ к стороне 12 рассматриваемого треугольника (рис. 1). Тогда, заменяя тождественно распределенные по сторонам треугольника тепловые потоки на эквивалентные сосредоточенные в узлах тепловые нагрузки, получим

$$\begin{aligned} Q_1 &= -|\vec{q}| \cdot \sin\varphi \cdot k \cdot l_{12} \cdot \delta + |\vec{q}| \cdot \sin(\varphi + \epsilon) \cdot (1-n) \cdot l_{31} \cdot \delta; \\ Q_2 &= -|\vec{q}| \cdot \sin\varphi \cdot (1-k) \cdot l_{12} \cdot \delta - |\vec{q}| \cdot \sin(\epsilon - \varphi) \cdot m \cdot l_{23} \cdot \delta; \\ Q_3 &= -|\vec{q}| \cdot \sin(\epsilon - \varphi) \cdot (1-m) \cdot l_{23} \cdot \delta + |\vec{q}| \cdot \sin(\varphi + \epsilon) \cdot n \cdot l_{31} \cdot \delta. \end{aligned} \quad (1)$$

где k , m , n - приведенные длины участков сторон треугольника ($k = l_{11}/l_{12}$, $m = l_{22}/l_{23}$, $n = l_{33}/l_{31}$), δ - толщина треугольника.

Принимая во внимание выражение (1), с учетом выполнения условий теплового баланса в узловых точках окончательно получим следующие соотношения для определения проводимостей ветвей ячейки сети

$$\begin{aligned}G_{12} &= \frac{\lambda \cdot \delta}{2 \cdot l_{12} \cdot \sin \epsilon} \cdot (l_{23} - l_{12} \cdot \cos \epsilon) ; \\G_{23} &= \frac{\lambda \cdot \delta}{2 \cdot l_{23} \cdot \sin \beta} \cdot (l_{13} - l_{23} \cdot \cos \beta) ; \\G_{31} &= \frac{\lambda \cdot \delta}{2 \cdot l_{31} \cdot \sin \gamma} \cdot (l_{12} - l_{31} \cdot \cos \gamma) .\end{aligned} \quad (2)$$

Выполненный в работе анализ применительно к нестационарным задачам теплопереноса различной пространственной размерности показал, что предлагаемый метод характеризуется следующими основными достоинствами:

- высокой эффективностью процесса нахождения решения при наличии разнородных конструктивных элементов и объектов с одним или двумя преобладающими размерами;

- простотой реализации решения в плане определения коэффициентов результирующей системы уравнений и в отношении возможности осуществления единого подхода к определению параметров сети при использовании различных по конфигурации и пространственной размерности элементов дискретизации;

- возможностями интегрирования разработанного на базе предлагаемого метода программного обеспечения в существующие САПР.

Значительное внимание в данной главе уделено также рассмотрению основных подходов, применяемых для оценки достоверности результатов выполненных вычислительных экспериментов.

Вторая глава диссертации посвящена изучению процессов теплопереноса, протекающих в условиях монтажа единичных КИМ с применением газового нагрева. Приводятся результаты исследований особенностей теплового состояния ПУ при использовании различных схем нагрева зоны пайки - одиночной круглой струей снизу (рис. 2а), одиночной круглой струей сверху (рис. 2б), плоскими, профилированными по периметру МК струями сверху (рис. 2в) и комбинированный нагрев одиночной круглой струей снизу и плоскими, профилированными по периметру МК струями сверху (рис. 2г).

Теплофизический анализ рассматриваемой ситуации проводился на базе решения следующей объемной нестационарной задачи Стефана

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Lambda(x, y, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Lambda(x, y, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Lambda(x, y, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - K \cdot \frac{\partial S}{\partial Fo} = C_V(x, y, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Fo} \quad (3)$$

$$x, y, z \in \begin{cases} \Omega & \text{при } 0 < Fo < Fo_{\Phi} \\ \Omega^* & \text{при } Fo_{\Phi} < Fo < Fo_{\Gamma} \end{cases}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{\Gamma_C} = \frac{Bi_C}{\Lambda(x, y, z, \theta)} \cdot (\theta - \theta_C) \Big|_{\Gamma_C} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{\Gamma}} = - \frac{Bi_{\Gamma}(x, y, z)}{\Lambda(x, y, z, \theta)} \cdot (\theta - \theta_{\Gamma}) \Big|_{\Gamma_{\Gamma}} \quad (5)$$

$$\theta \Big|_{Fo=0} = \theta_0 \quad (6)$$

где Fo_{Φ} - число Фурье, отвечающее моменту времени в который среднеобъемная температура припой достигает температуры солидуса; Fo_{Γ} - число Фурье соответствующее времени окончания процесса; Ω, Ω^* - пространственная область, отвечающая ПУ до и после пайки; K - число фазового перехода, $K = a_0 \cdot \rho_0 \cdot L / \lambda_0 \cdot t_0$; S - относительная доля жидкой фазы; $\theta_C, \theta_{\Gamma}$ - безразмерная температура окружающей среды и греющего газа; $\Gamma_{\Gamma}, \Gamma_C$ - участки поверхности ПУ, на которых имеет место соответственно теплообмен с теплоносителем и окружающей средой; Bi_{Γ}, Bi_C - числа Bi на соответствующих поверхностях ПУ; L - удельная теплота плавления (кристаллизации).

Выполненный сравнительный анализ эффективности рассматриваемых схем нагрева ПУ показал, что в плане минимизации теплоподвода Q наилучшей является схема N 3, за ней следует вторая схема (здесь величина Q выше примерно на 8%); в четвертой и первой схемах эта величина превышает таковую для третьей схемы на 15% и 33% соответственно. Что же касается реализации благоприятных температурных режимов ПУ, то согласно полученным данным наилучшей в целом также оказывается третья схема, несколько уступает ей схема N 4, наихудшей же является вторая схема.

Специальные исследования были проведены для выявления эффектов влияния на тепловое состояние ПУ условий термического взаимодействия между МК и платой.

Определенное внимание уделено в работе анализу закономер-

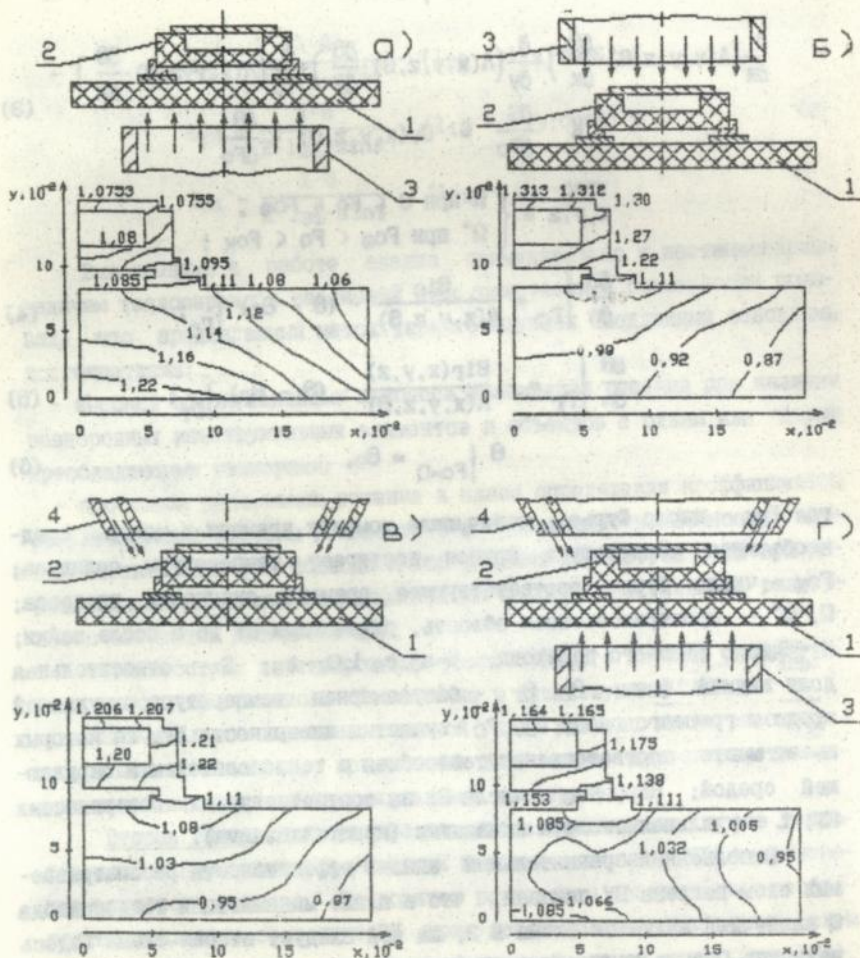


Рис.2. Схемы нагрева зоны пайки и соответствующие им температурные поля ПУ при монтаже МК типа Н на поверхности керамической ПШ для $y=0$, $F_0=1,42$: 1- ПШ; 2- МК; 3- газовый паяльник с круглым соплом; 4- газовый паяльник со щелевым соплом; а) нагрев одиночной круглой струей снизу (схема N 1); б) нагрев одиночной круглой струей сверху (схема N 2); в) нагрев плоскими, профилированными по периметру МК струями сверху (схема N 3); г) комбинированный нагрев - одиночной круглой струей снизу и плоскими, профилированными по периметру МК струями сверху (схема N 4).

ностей изменения температурных режимов ПУ при варьировании величины угла между осью струи и горизонтальной поверхностью ПШ в случае использования третьей и четвертой схем нагрева зоны пайки.

Освещаются результаты математического моделирования термонапряженного состояния ПУ при газовой пайке.

В данной главе рассматриваются также вопросы, касающиеся особенностей проявления в анализируемых условиях эффектов регионального влияния. В частности, показано, что с эффектами регионального влияния поверхностного характера источника нагрева и особенностей геометрических и теплофизических характеристик собственно монтируемого МК связана наблюдаемая в данной ситуации тенденция к вырождению размерности процесса теплопереноса, то есть к его трансформации из трехмерного в двумерный и т.д.

В третьей главе приводятся результаты исследований закономерностей протекания процессов теплопереноса в условиях газовой пайки при наличии множества ИЭТ. Здесь решение задач рассматриваемого класса для ПУ в целом находилось на основе методики регионального моделирования. Рис.3 иллюстрирует особенности постановки задачи теплопереноса на первом этапе реализации данной методики для ситуации пайки идентичных в конструктивном отношении КИМ регулярно расположенных на поверхности ПШ.

Освещаются результаты выполненного комплекса вычислительных экспериментов по изучению закономерностей влияния на тепловое состояние ПУ различных технологических и геометрических параметров - плотности монтажа электронных компонентов, геометрических характеристик собственно ПШ, местоположения монтируемых компонентов на плате и т.д. На рис.4 в качестве примера приведены данные о распределении температуры в ПУ при различном местоположении монтируемого МК на плате. Как видно, отличия температур для сопоставляемых ситуаций могут быть весьма существенными. (Так, расхождение максимальных безразмерных температур для МК, расположенного в центре ПШ, и наиболее удаленного от центра платы периферийного углового МК составляет 0,215). Это обстоятельство обуславливает необходимость корректировки условий теплоподвода при реализации технологического процесса пайки по мере удаления от центра ПШ к ее периферии.

Выполненный анализ позволил провести ранжирование рассматри-

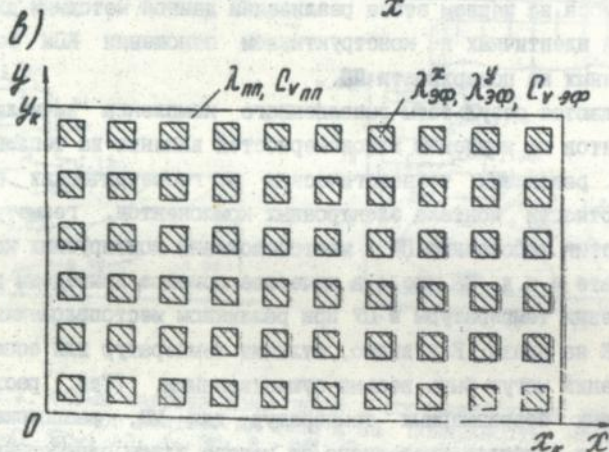
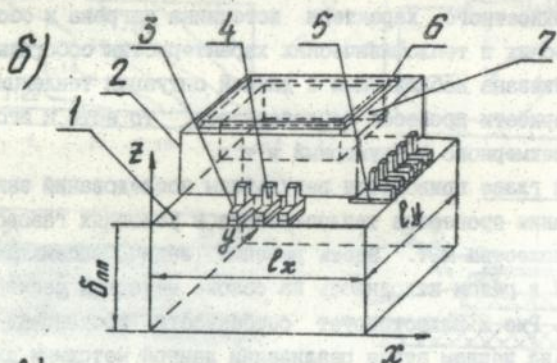
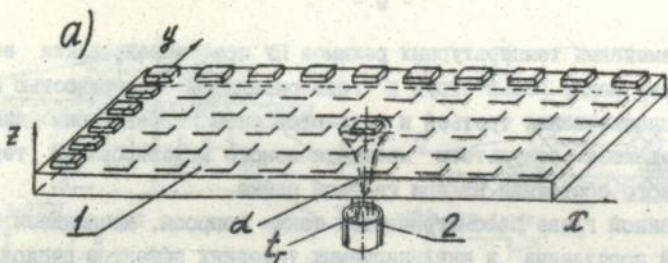


Рис. 3. К постановке задачи теплопереноса для первого этапа реализации методики регионального моделирования: а) схема нагрева ПУ при наличии множества КТМ; 1 - ПУ; 2 - газовый паяльник; б) замещаемая подобласть ПУ: 1 - ПП; 2 - МК; 3 - припой; 4 - вывод; 5 - контактная площадка; 6 - крышка МК; 7 - воздушный зазор; в) кусочно-однородная область, отвечающая ПУ после замещения.

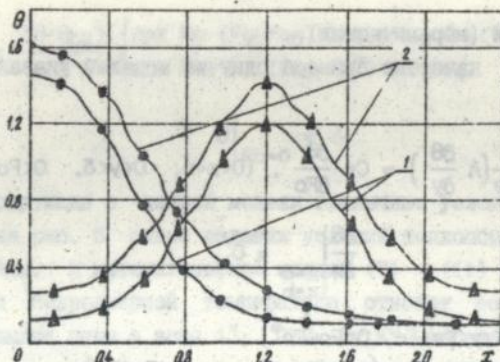


Рис. 4. Распределение безразмерной температуры ПУ вдоль оси абсцисс в сечении $y=0$ при центральном (—●—) и $y=0,168$ при периферийном углом (—▲—) расположении монтируемого МК; 1 - $Fo=0,53$; 2 - $Fo=1,42$.

ваемых факторов по степени их влияния на тепловое состояние монтируемого МК. Для исследуемого диапазона изменения параметров в порядке убывания влияния эти факторы располагаются следующим образом: толщина ПП, местоположение монтируемого МК на плате, плотность монтажа, размеры ПП в плане. При этом в рассматриваемой ситуации максимальные изменения безразмерной температуры составляют 0,323 при варьировании толщины ПП, 0,215 - в случае изменения местоположения МК на ПП, 0,083 - при изменении плотности монтажа и 0,063 - при варьировании продольных размеров ПП.

Четвертая глава посвящена изучению закономерностей изменения теплового состояния ПУ в условиях МК-пайки с использованием предварительного резистивного нагрева.

Анализ рассматриваемой ситуации проводился в два этапа. На первом этапе выполнялось исследование температурных режимов собственно печатных плат, на втором - как плат, так и монтируемых на них КИМ.

Для условий, отвечающих первому этапу, установлена определенная иерархия математических моделей исследуемого процесса теплопереноса. Каждая из таких моделей соответствует конкретной степени схематизации рассматриваемой физической ситуации. Предложенная иерархия охватывает весь практический диапазон теплофизических свойств ПП - от низкопроводных (стеклотекстолитовых) до высо-

котлопроводных (керамических).

Приведем в качестве примера одну из моделей указанной иерархии.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = C_V \frac{\partial \theta}{\partial Fo}, \quad (0 < x < b, \quad 0 < y < \delta, \quad 0 < Fo < Fo_0), \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ x=b}} = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=\delta} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < x < Pe \cdot Fo, \quad 0 < Fo < Fo^*, \\ -B_{11}^* \cdot \frac{(\theta - \theta_{c1})}{\Lambda} & \begin{cases} \text{при } Pe \cdot Fo < x < b, \quad 0 < Fo < Fo^*, \\ \text{при } 0 < x < b, \quad Fo^* < Fo < Fo_1, \\ \text{при } 0 < x < Pe \cdot (Fo - Fo_1), \quad Fo_1 < Fo < (Fo_1 + Fo^*), \end{cases} \\ -B_{12}^* \cdot \frac{(\theta - \theta_{c2})}{\Lambda} & \begin{cases} \text{при } Pe \cdot (Fo - Fo_1) < x < b, \quad Fo_1 < Fo < (Fo_1 + Fo^*), \\ \text{при } 0 < x < b, \quad (Fo_1 + Fo^*) < Fo < Fo_2. \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=0} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < x < Pe \cdot Fo, \quad 0 < Fo < Fo^*, \\ -\frac{K_{11}}{\Lambda} & \begin{cases} \text{при } Pe \cdot Fo < x < b, \quad 0 < Fo < Fo^*, \\ \text{при } 0 < x < b, \quad Fo^* < Fo < Fo_1, \\ \text{при } 0 < x < Pe \cdot (Fo - Fo_1), \quad Fo_1 < Fo < (Fo_1 + Fo^*), \end{cases} \\ -\frac{K_{12}}{\Lambda} & \begin{cases} \text{при } 0 < x < Pe \cdot (Fo - Fo_2), \quad Fo_2 < Fo < (Fo_2 + Fo^*), \\ \text{при } Pe \cdot (Fo - Fo_1) < x < b, \quad Fo_1 < Fo < (Fo_1 + Fo^*), \\ \text{при } 0 < x < b, \quad (Fo_1 + Fo^*) < Fo < Fo_2, \end{cases} \\ -\frac{K_{13}}{\Lambda} & \begin{cases} \text{при } Pe \cdot (Fo - Fo_2) < x < b, \quad Fo_2 < Fo < (Fo_2 + Fo^*), \\ \text{при } 0 < x < b, \quad (Fo_2 + Fo^*) < Fo < Fo_3, \\ \text{при } 0 < x < Pe \cdot (Fo - Fo_3), \quad Fo_3 < Fo < Fo_4, \\ \text{при } 0 < x < [b - Pe \cdot (Fo - Fo_3)], \quad Fo_4 < Fo < (Fo_3 + Fo^*), \end{cases} \\ 0 & \begin{cases} \text{при } Pe \cdot (Fo - Fo_3) < x < b, \quad Fo_3 < Fo < Fo_4, \\ \text{при } [b - Pe \cdot (Fo - Fo_3)] < x < Pe \cdot (Fo - Fo_4), \quad Fo_4 < Fo < (Fo_3 + Fo^*), \\ \text{при } 0 < x < [b - Pe \cdot (Fo - Fo_4)], \quad (Fo_3 + Fo^*) < Fo < (Fo_4 + Fo^*), \end{cases} \\ B_{11}^* \cdot \frac{(\theta - \theta_{c1})}{\Lambda} & \begin{cases} \text{при } [b - Pe \cdot (Fo - Fo_4)] < x < b, \quad (Fo_3 + Fo^*) < Fo < (Fo_4 + Fo^*), \\ \text{при } 0 < x < b, \quad (Fo_4 + Fo^*) < Fo < Fo_5, \\ \text{при } 0 < x < Pe \cdot (Fo - Fo_5), \quad Fo_5 < Fo < (Fo_5 + Fo^*), \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

$$Bi_2 \frac{(\theta - \theta_{C2})}{\Lambda} \begin{cases} \text{при } Pe \cdot (Fo - Fo_5) < x < b, & Fo_5 < Fo < (Fo_5 + Fo^*), \\ \text{при } 0 < x < b, & (Fo_5 + Fo^*) < Fo < Fo_6, \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta \Big|_{Fo=0} = \theta_0. \quad (11)$$

Фигурирующие в данной модели граничные условия отвечают приведенной на рис. 5 схеме задания условий теплообмена ПП с печью для ИК-пайки. В математической модели (7) - (11) подстрочные индексы при безразмерной температуре относят ее соответственно: $CT1$ - к крышке печи в зоне 1"; $CT2$ - к ИК-нагревателю в зоне 2"; $C1, C2$ - к охлаждаемому воздуху в зонах 5 и 6; $Fo_1, \overline{Fo}_2, Fo_1$ ($i=1,2,\dots,6$) - числа Фурье, отвечающие временам прохождения платой расстояния от начала печи до конца соответственно зон 1", 2", 1, 2, ..., 6; Fo^* - число Фурье, относящееся ко времени, в течение которого ПП проходит расстояние равное ее длине; Ki_1 - число Кирпичева в зонах 1, 2, 3, $Ki_1 = q_1 \cdot l_0 / \lambda_0 \cdot t_0$, ($i=1,2,3$); $Bi_1^*, Bi_2^*, Bi_1, Bi_2$ - числа Bi соответственно в зонах 1", 2", 5 и 6; b, δ - безразмерные длина и толщина платы, $b = b_p / l, \delta = \delta_p / l$.

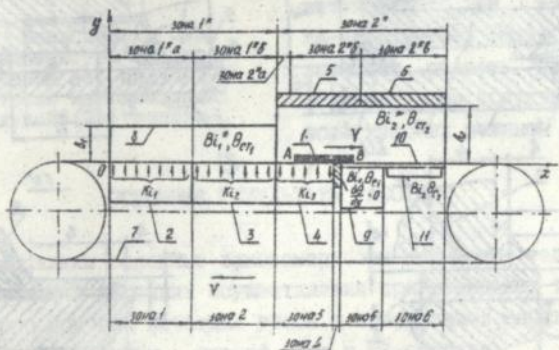


Рис. 5. Схема печи для ИК-пайки: 1 - ПУ; 2, 3, 4 - секции предварительного резистивного нагрева; 5, 6 - секции ИК-нагрева; 7 - транспортер; 8 - крышка; 9 - вентилируемый канал; 10 - крышка стола печи; 11 - оребренная поверхность.

В рамках второго из указанных этапов выполнен теплофизический анализ ситуаций, отвечающих условиям ИК-пайки различных изделий электронной техники, а именно - безвыводных (матричного керамического МК, рис. 6а), и МТК, рис. 6б)) и с планарными выводами

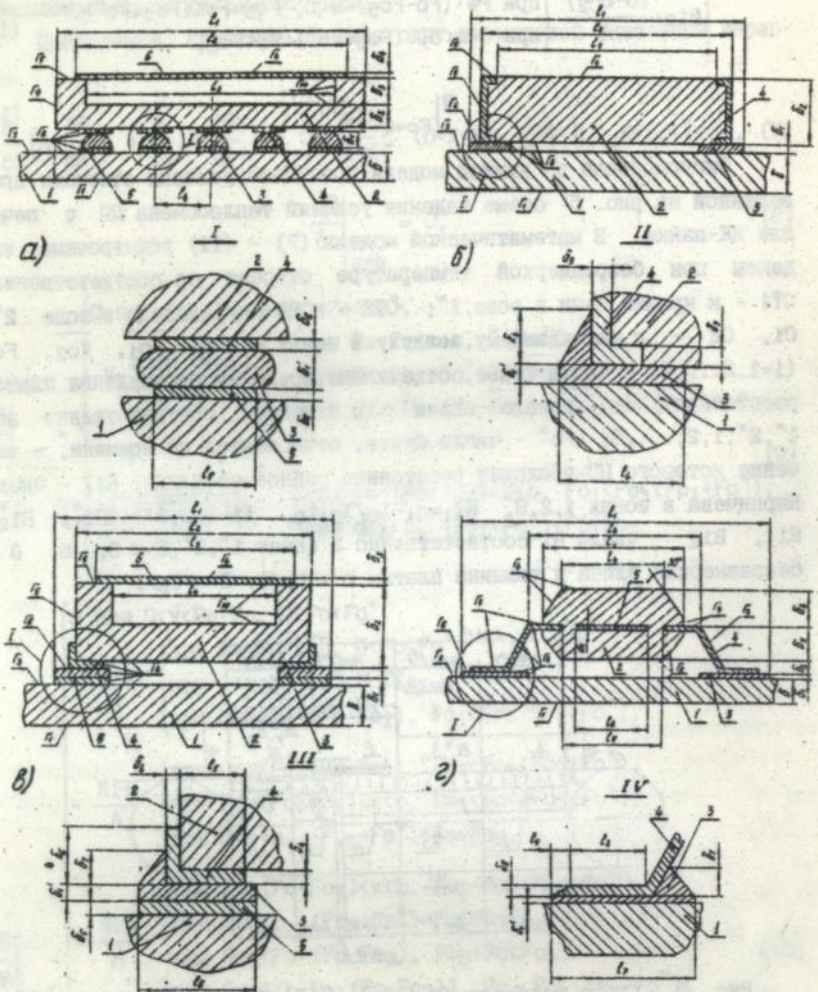


Рис. 8. Типы исследуемых компонентов поверхностного монтажа: а) матричный МК; б) МК; в) пластмассовый МК; г) периферийный МК (типа Н); 1 - ПП; 2 - МК; 3 - припой; 4 - вывод; 5 - контактная площадка; 6 - крышка МК; 7 - кристалл; I, II, III, IV - паяные соединения.

(пластмассового МК с выводом типа "крыло чайки", рис.6в), и металлокерамического периферийного МК типа Н, рис.6г)). При этом особое внимание уделялось установлению закономерностей воздействия на температурные режимы ПУ различных теплофизических и технологических факторов, таких как материал ПП, местоположение МК на плате, теплота фазового перехода в припое и т.д.

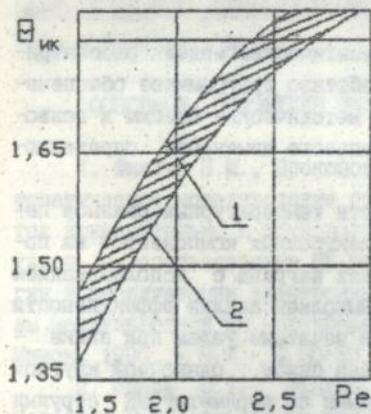


Рис. 7. Зависимость безразмерной температуры ИК-нагревателя от числа Re, полученная при контроле максимальной (1) и минимальной (2) температуры припоя.

Полученные данные о тепловом состоянии ПУ использовались для решения задачи по выбору основных режимных параметров при разработке базовых технологических процессов поверхностного монтажа. На рис.7 в качестве примера представлены результаты решения такой задачи применительно к определению взаимосвязи важнейших режимных параметров ИК-пайки — скорости перемещения транспортера печи (числа Re) и соответствующей ей температуры ИК-нагревателя ($\Theta_{ИК}$). Заштрихованная область на графике отвечает зоне допустимых технологических режимов ИК-пайки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлены основные закономерности процессов теплопереноса, протекающих в условиях осуществления прогрессивных технологий поверхностного монтажа печатных узлов с применением различных способов нагрева зоны пайки — струей газа и ИК-нагрева.

2. Реализован специальный подход к расчету температурных режимов ПУ — методика регионального моделирования теплового состояния термочувствительных компонентов монтажа. Данная методика базируется на использовании различных эффектов регионального влияния и позволяет значительно повысить эффективность моделирования температурных режимов печатных узлов, монтируемых с применением газовой и ИК-пайки.

3. Разработан численный метод решения задач переноса в областях сложной конфигурации - локально-сетевой метод конечных элементов. В основу метода положена идея объединения основных преимуществ методов конечных элементов и сетевых методов. Показано, что применение локально-сетевого МКЭ особенно эффективно для решения многомерных задач теплопереноса при наличии разнородных конструктивных элементов и объектов с одним или двумя преобладающими размерами.

4. Сформулированы уточненные математические модели рассматриваемых процессов теплопереноса и разработано программное обеспечение для ЭЭМ, реализующее предложенные методические приемы и позволяющее проводить расчеты в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

5. Выявлены характерные особенности температурных режимов печатных узлов при монтаже единичных электронных компонентов на поверхность коммутационных плат в условиях нагрева с использованием индивидуальных газовых паяльников. Выполнен анализ эффективности различных схем подвода теплоносителя к печатным узлам при пайке - одиночной круглой струей нагретого газа снизу, одиночной круглой струей сверху, плоскими профилированными по периметру МК струями сверху, комбинированного подвода - одиночной круглой струей снизу и плоскими профилированными по периметру МК струями сверху. Выявлено влияние на тепловое состояние ПУ угла между осью струи теплоносителя и горизонтальной поверхностью ПП а также условий теплового взаимодействия монтируемого КИМ с ПП.

6. Установлены закономерности изменения температурных режимов печатных узлов, монтируемых в условиях газовой пайки при наличии множества КИМ. Изучены зависимости теплового состояния ПУ от местоположения монтируемого компонента на плате, плотности монтажа, размеров ПП и т. д.

7. Выполнен анализ основных особенностей протекания процессов теплопереноса при поверхностном монтаже ИЭТ с использованием ИК-нагрева. Построена иерархия математических моделей, описывающих температурные режимы высоко- и низкотеплопроводных ПП. Установлены закономерности изменения теплового состояния ПУ для ситуаций, отвечающих условиям ИК-пайки различных КИМ - безвыводных (матричного металлокерамического МК и МТК) и с планарными выводами (пластмассового МК с выводом типа "крыло чайки" и металлокерамического периферийного МК типа Н). Изучены эффекты влияния на температурные

режимы ПУ при пайке таких факторов, как скорость движения транспортера печи, материал ПП, теплота фазового перехода в припой и т.д.

8. Выявлены особенности проявления различных эффектов регионального влияния при реализации анализируемых технологических процессов поверхностного монтажа.

9. На базе результатов выполненных исследований разработаны и оптимизированы технологические процессы монтажа печатных узлов с использованием различных способов нагрева ПУ - струей нагретого газа и ИК-излучением.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:

1. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Саріогло В.Г., Грачев А.А. Математическое моделирование процессов теплопереноса в печатных платах применительно к технологии поверхностного монтажа электронных узлов с использованием ИК-пайки // Тепло- и массообмен в технологии и эксплуатации электронных и микросистемных систем: Материалы международной шк.-семинара, г. Минск, 19-24 сентября 1989 г. - Минск, 1990. - Ч.2 - С.30-39.

2. Швець Ю.І., Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Грачев А.А., Саріогло В.Г. Аналіз температурних режимів печатних плат у технологічних процесах поверхневого монтажу електронних компонентів // Доповіді АН УРСР. - 1990. - №9. - С.65-70.

3. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Саріогло В.Г., Грачев А.А., Чебанова В.Н. Дослідження процесів теплопереносу при поверхневому монтажі мікрокорпусів інтегральних схем // Доповіді АН УРСР. - 1991. - №1. - С.59-64.

4. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Саріогло В.Г., Грачев А.А. Математичне моделювання теплового стану печатних вузлів стосовно до технології поверхневого монтажу електронних компонентів // Доповіді АН УРСР. - 1991. - №5. - С.86-91.

5. Прокопов В.Г., Фіалко Н.М., Саріогло В.Г., Грачев А.А. Математическое моделирование процессов теплопереноса при монтаже электронных компонентов на поверхность печатных плат // Инж.-физический журнал. - 1991. - 61, №2. - С.204-210.

6. Прокопов В.Г., Фіалко Н.М., Саріогло В.Г., Грачев А.А., Чебанова В.Н. Аналіз процесів теплопереносу при монтажі електронних компонентів з використанням резистивного і ІК-нагріву // Електронна обробка матеріалів. - 1991. - №2. - С.56-61.

7. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Саригло В.Г., Грачев А.А. Особенности процессов теплопереноса при пайке изделий электронной техники с планарными выводами // Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. - 1991. - №7. - С.94-101.

8. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Саригло В.Г., Грачев А.А., Рывкин Е.М. Исследование теплового состояния печатных узлов в условиях технологии газовой пайки // Докл. АН УССР. - 1991. - №12. - С.50-56.

9. Грачев А.А., Рывкин Е.М., Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Саригло В.Г., Магур А.И. Теплоперенос в условиях пайки ИС на поверхность струей нагретого газа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 1992. - №1. - С.22-26.

10. Фялко Н.М., Саригло В.Г., Чебанова В.Н. и др. Тепловое состояние монолитного танталового конденсатора в условиях пайки инфракрасным излучением // Автомат. сварка. - 1992. - №3. - С.26-30.

11. Прокопов В.Г., Фялко Н.М., Саригло В.Г. и др. Анализ схем струйного нагрева при пайке корпусов ИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 1993. - №1. - С.43-44.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

θ - безразмерная температура, $\theta = t/t_d$; Fo - число Фурье, $Fo = a_0 \cdot \tau / l^2$; Λ , C_v - безразмерные коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость, $\Lambda = \lambda / \lambda_0$, $C_v = c_v / c_{v0}$; x , y , z - безразмерные координаты прямоугольной системы координат, $x = x_p / l$, $y = y_p / l$, $z = z_p / l$; Bi - число Био, $Bi = \alpha \cdot l / \lambda_0$; n - нормаль к поверхности; Re - число Пекле, $Re = V \cdot l / a_0$; a - коэффициент температуропроводности; τ - время; l - характерный размер; λ - коэффициент теплопроводности; c_v - удельная объемная теплоемкость; ρ - плотность; L - удельная теплота плавления (кристаллизации); t - температура; t_d - температура ликвидуса для материала припоя; α - коэффициент теплоотдачи; V - скорость; q - плотность теплового потока. Индексы: "р" - размерная величина; "0" - характерное или начальное значение, ИК - инфракрасный; ИЭТ - изделие электронной техники; КПМ - компонент поверхностного монтажа; ЛС МКЭ - локально-сетевой метод конечных элементов; МК - микрокорпус; МКЭ - метод конечных элементов; МТК - монолитный танталовый конденсатор; ПП - печатная

плата; ПУ - печатный узел; САПР - система автоматизированного проектирования.

SUMMARY

Sarioglo V.G. Modeling of the heat transfer processes during surface mounting of electronic components.

Thesis for a candidate's degree of technical sciences on speciality 05.14.05 "Theoretical thermal technology". Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

Certain basic laws are established which govern heat transfer processes arising in new promising technologies for surface mounting of printed assemblies with the use of the two different types of solder area heating, namely the gas jet and infrared heating. Some special-proposed methods are suggested and implemented for computing the thermal condition of printed assemblies during soldering. We present the refined mathematical models of heat transfer processes in question and develop the corresponding software, which allow computation to be carried out in a wide practical range of characteristic parameters. The effect of various thermal and technological factors on the thermal condition of printed assemblies are studied. We analyse the relationship between most important parameters, determining the conditions of technological processes under consideration.

АННОТАЦИЯ

Сариогло В.Г. Моделирование процессов теплопереноса при поверхностном монтаже электронных компонентов.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 "Теоретическая теплотехника". Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1995.

Установлены основные закономерности протекания процессов теплопереноса при реализации прогрессивных технологий поверхностного монтажа печатных узлов с использованием различных способов нагрева зоны пайки - струей газа и инфракрасного нагрева. Предложены и реализованы специализированные методические приемы расчета температурных режимов печатных узлов при пайке. Сформулированы уточненные

математические модели рассматриваемых процессов теплопереноса и разработано программное обеспечение для ЭВМ, позволяющее проводить расчеты в широком практическом диапазоне изменения определяющих параметров. Изучены эффекты влияния на температурные режимы печатных узлов различных теплофизических и технологических факторов. Выполнен анализ взаимосвязи важнейших режимных параметров изучаемых технологических процессов.

Ключові слова : температурні режими, математичне моделювання, поверхневий монтаж, печатні вузли, електронні компоненти.

Подписано к печати 23.10.1995г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист,1,0.Уч.-пзд.лист 1,0.
Тираж 100. Заказ 433.

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

ccc cc 87

446422

№ 33 353
АВ 33.353

интенсивности и скорости реакции
предложено проводить исследование в
различных условиях температуры и
параметров. Ключевые слова: кинетика
и термодинамика реакции, кинетика
и термодинамика реакции, кинетика
и термодинамика реакции, кинетика
и термодинамика реакции.

Ключевые слова: температурный режим, кинетика
и термодинамика реакции, кинетика
и термодинамика реакции.

Депозитный сертификат № 33.353, дата депозита 03/04/10
Судья Депозитария Тел. +7(495) 797-1070, факс +7(495) 797-1070
Цена 100 руб. НДС 433

Политграф, ул. Я. Яковлева электродинамика № 1/1
125057, Моск-37, индекс 125057, ДС.