

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А.В. ЛЫКОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 536.201

**КРОЛЬ Дмитрий Григорьевич**

**АСИММЕТРИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
И РЕЛАКСИРУЮЩИЕ ФАЗОВЫЕ ГРАНИЦЫ  
В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.14 - Теплофизика  
и теоретическая теплотехника

Минск 2010

## ВВЕДЕНИЕ

В современной теории теплообмена фундаментальное значение имеют явления, которым присуща нестационарность, нелинейность и отсутствие локального равновесия. Ключевая роль принадлежит научно-техническим проблемам, связанным с быстропротекающими тепловыми процессами с высокоскоростными методами получения и термообработки материалов с конструктивными методами анализа нестационарных теплофизических систем. Сложность проблемы теплопереноса в ее нелинейности: зависимость от температуры теплофизических свойств среды, присутствие заранее неизвестных подвижных границ. В различных технологических процессах физико-технических и энергетических установках такие нелинейности обуславливают широкий спектр интересных физических явлений

В данной работе перенос тепловой энергии в неподвижной среде изучается в двух аспектах: 1) рассмотрение процессов теплообмена (модель Фурье), обладающих высокой степенью нестационарности и сильными нелинейностями за счет зависимости теплофизических свойств среды от температуры; 2) изучение теплопереноса в локально-неравновесных условиях: модель Максвелла-Каттанео, получившая свое обоснование в рамках расширенной необратимой термодинамики, а также в экспериментах с тепловыми импульсами и волнами. Экспериментальными предпосылками проведенного нами исследования послужили три обстоятельства:

- асимметрия теплового потока при поверхностном нагреве двухслойной металлической пластины;

- периодические структуры, возникающие при взрывной кристаллизации аморфных пленок;

- измерения скорости фазовой границы при высокоскоростной кристаллизации глубоко переохлажденного расплава

Перечисленные аспекты проблемы теплопереноса в полной мере присутствуют в этих задачах: в задаче о контактном теплообмене в двухслойной пластине (глава 2) - нестационарность и нелинейность; в задаче о двухмерных периодических структурах (глава 3) - локальная неравновесность; в задаче о тепловом состоянии системы «расплав - кристалл» (глава 4) - нелинейность и локальная неравновесность. Выполненные теоретические исследования были инициированы интересными теплофизическими экспериментами, и это подчеркивает практическое значение научных результатов диссертации. Речь идет прежде всего, о теоретической базе для создания лабораторного физического оборудования, позволяющего моделировать энергонапряженные процессы, характерные для технологий получения и обработки материалов.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Диссертационная работа выполнялась в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» с 2000 по 2010 г. Выполненные в диссертации исследования являются составной частью НИР: 1) НИР «Нелинейные тепловые процессы при воздействии поверхностных источников энергии на материалы», Министерство образования (МО), №20001527, 2000 г.; 2) НИР «Нелинейные релаксационные процессы при тепловом воздействии на материалы и высокоскоростной кристаллизации», МО, № 20011993, 2001 г.; 3) НИР «Конвективный теплообмен, вихревая динамика и релаксационные структуры в термогидродинамических системах с сильными разрывами», МО, №20001495, 2000-2002 гг.; 4) задание «Энергия-37» «Исследование нелинейных процессов переноса массы, импульса и энергии в локально-неравновесных термогидродинамических системах», ГПОФИ «Энергия» на 2001-2005 гг., МО, № 20012104, 2001-2005 гг.; 5) НИР «Нелинейные объемные источники энергии и динамика периодических тепловых структур», МО, № 2005674, 2005-2006 гг.; 6) задание «Тепловые процессы-46» «Конвективные течения, фазовые границы и динамика неравновесных состояний в теплофизических системах с источниками энергии», ГКПНИ «Тепловые процессы» на 2006-2010 гг., МО, № 20061775, 2006-2010 гг.

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению фундаментальных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 гг., в соответствии с Перечнем, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь: «Энергообеспечение, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, энергосбережение и эффективное использование энергии; создание энерго- и ресурсоэкономичных архитектурно-конструктивных систем нового поколения: тепло- и массоперенос в сложных системах, средах и веществах».

### **Цель и задачи исследования**

*Цель работы:* построить расчетные модельные представления о нелинейных (асимметрических, гистерезисных, энтропийных) свойствах контактного теплообмена при импульсном нагреве двухслойной металлической пластины, разработать методики решения задач релаксационного теплопереноса при высокоскоростной кристаллизации нелинейных сред (аморфные пленки, глубоко переохлажденные расплавы металлов). Для достижения указанной цели в диссертации были решены следующие задачи:

1. Задача об асимметрии свойств тепловых процессов при поверхностном нагреве двухслойной металлической пластины (асимметрия появляется при перестановке слоев). Расчет гистерезисных и энтропийных параметров контактного теплообмена.

2. Задача о генерации периодических температурных полей объемным источником энергии. Определение основных типов неравновесных периодических структур и закономерностей их пространственно-временной эволюции. Феноменологическое описание экспериментальных данных о высокоскоростной кристаллизации аморфных пленок.

3. Задача о локально-неравновесных тепловых свойствах экспериментальной зависимости «переохлаждение расплава - скорость роста кристалла» для однокомпонентных систем. Построение полуэмпирических формул, описывающих теплофизические свойства переохлажденных расплава этих веществ.

*Объект исследования:* неподвижные сплошные среды, обладающие нелинейными и/или локально-неравновесными тепловыми свойствами; в качестве примеров таких сред выступают металлы, глубоко переохлажденные расплавы металлов, аморфные пленки.

*Предмет исследования:* теплоперенос при нагреве, охлаждении и высокоскоростной кристаллизации металлов и аморфных пленок.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Новые нелинейные свойства тепловых процессов (асимметрия, гистерезис, производство энтропии) при импульсном поверхностном нагреве двухслойной металлической пластины (Fe, Mo, V, W) в широком (до 700°) интервале температур, отличающиеся от известных учетом нелинейных теплофизических свойств металлов и нестационарностью источника энергии.

2. Морфологические существенно двумерные свойства (полосы, решетки, ячейки, лепестки) периодических тепловых структур, формирующихся в системе «локально-неравновесная среда - объемный источник энергии». Феноменологические соотношения для расчета времени тепловой релаксации и оценки ширины полос при взрывной кристаллизации аморфных пленок германия.

3. Новая методика теплофизического истолкования экспериментальных зависимостей «переохлаждение расплава - скорость роста кристалла», опирающаяся на алгоритм единообразного расчета тепловых свойств фазовой границы кристаллизации при глубоких (до 300°) переохлаждениях. Полуэмпирические формулы для температурных зависимостей теплофизических параметров изученных веществ (Ni, Si, Ge) в ЖИДКОЙ и в твердой фазах. Эти результаты отличаются от известных проникновением в область больших переохлаждений расплава.

### **Личный вклад соискателя**

Диссертация отражает личный вклад соискателя в решение поставленной проблемы. Работы [1-A], [4-A], [10-A], [11-A], [18-A], [27-A], [32-A], [33-A], [35-A], [36-A], [42-A] выполнены лично соискателем. Работы [2-A], [3-A], [5-A]-[9-A], [14-A]-[17-A], [19-A]-[26-A], [29-A]-[31-A],

[38-A]-[41-A], [43-A]-[45-A] выполнены в соавторстве с научным руководителем профессором О.Н. Шабловским. В работах [3-A], [5-A], [14-A], [23-A], [24-A], [34-A] принимал участие И.А. Концевой, которому в [14-A] принадлежат результаты расчета в рамках параболической модели теплопроводности, а в [3-A], [5-A], [23-A], [24-A], [34-A] - результаты расчета отдельных вариантов представленных задач.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты, полученные в ходе исследований, докладывались на следующих конференциях: 6, 8 и 9-я научно-технические конференции «Физика конденсированных сред» (Гродно, ГрГУ им. Я. Купалы, 1998, 2000 и 2001); Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, ГТТУ им. П. О. Сухого, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008); Международная конференция по математическому моделированию (Херсон, ХГТУ, 2000, 2002); Школа-семинар молодых ученых под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, СПбГТУ, 2001; Калуга, 2005); Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, МЭИ, 2006); Международная научная конференция «Кинетика и механизм кристаллизации. Нанокристаллизация. Биокристаллизация» (Иваново, Ин-т химии растворов РАН, 2004, 2006); Fourth International Conference «Single crystal growth and heat @ mass transfer» (Obninsk, SSC RF IPPE, 2001); Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, Ин-т теплофизики СО РАН, 2002); VI International Congress on mathematical modelling (Nizhny Novgorod, 2004); X, XII и XIII Национальные конференции по росту кристаллов (Москва, Институт кристаллографии РАН, 2002, 2008); 6-й Международный семинар «Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении» (Астрахань, АГУ, 2006); IV научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности» (Москва, ОКБ им. И.О. Сухого, 2007); 8<sup>th</sup> Intern. Workshop on Subsecond Thermophysics (Moscow, Joint Institute for High Temperatures, 2007); XI, XII Всероссийский семинар «Моделирование неравновесных систем» (Красноярск, Ин-т вычислительной математики СО РАН, 2008, 2009); Пятый Международный междисциплинарный симпозиум «Фракталы и прикладная синергетика - 2008» (Москва, Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2008).

### **Опубликованность результатов**

По теме диссертации опубликовано 45 научных работ, в том числе: научных статей в рецензируемых журналах и книгах - 17 (около 11 а. л.), статей в сборниках и материалах научных конференций - 12, тезисов докладов научных конференций - 16 (около 6 а. л.).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, шести приложений, заключения и библиографического списка. Полный объем диссертации составляет 163 страницы. Диссертация содержит 53 рисунка, 41 таблицу (30 в основном тексте диссертации, 11 в приложениях), список использованных источников из 115 наименований на 8 страницах, список опубликованных работ по теме диссертации из 45 наименований на 6 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1 Современное состояние исследований нестационарных задач теплопереноса в нелинейных средах**

Эта глава имеет обзорный характер. В краткой форме представлено современное состояние вопроса о нестационарном тепловом воздействии на однослойную и двухслойную пластины. Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ, посвященных высокоскоростной кристаллизации. Сделан вывод о том, что теоретическое изучение релаксирующих фазовых границ кристаллизации только начинается. Основное значение для нас имеет релаксационная модель Максвелла переноса тепла в неподвижной среде, которая состоит из уравнения для теплового потока и уравнения баланса энергии

$$\mathbf{q} + \gamma \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = -\lambda \text{grad}T, \quad c \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \mathbf{q} = q_0. \quad (1)$$

Здесь и далее приняты обозначения:  $T$  – температура;  $\mathbf{q}$  – вектор удельного теплового потока;  $q_0$  – мощность внутренних источников энергии;  $c = \rho c_p$  – объемная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  – время релаксации теплового потока;  $t$  – время;  $x, y$  – декартовы координаты;  $w = [(\lambda / (c\gamma))]^{1/2}$  – скорость распространения тепловых возмущений. При  $\gamma \equiv 0$  получаем классическое уравнение теплопроводности. В методологическом отношении важно, что дать теплофизическое истолкование результатам экспериментов с аморфными пленками и с глубоко переохлажденными расплавами удается именно на основе модели (1) локально-неравновесного теплопереноса.

### **Глава 2 Асимметричные свойства тепловых процессов в системе «двухслойная пластина - поверхностный источник энергии»**

#### **2.1 Динамический тепловой гистерезис в однослойной пластине**

Изучены нелинейные и нестационарные свойства теплообмена в однослойной пластине. Было установлено, что в плоскости «градиент

температуры – тепловой поток» необходимым образом (при прочих равных условиях) существует петля динамического теплового гистерезиса (ДТГ), если тепловой процесс происходит в широком интервале температур, таком, что эффективным образом проявляет себя температурная зависимость  $\lambda(T)$  коэффициента теплопроводности.

## 2.2 Асимметрия теплопереноса в системе с изотермической границей

Явление асимметрии теплового потока изучалось экспериментально на двухслойных образцах при стационарных условиях [1]. Эффект выражается в неравенстве  $q_l / q_r \neq 1$ , где  $q_l$  – тепловой поток, проходящий через двухслойную пластину в направлении от первого (левого) слоя ко второму (правому);  $q_r$  – тепловой поток, проходящий через пластину от второго слоя к первому. Нами изучен более общий случай асимметрии в нелинейных и нестационарных условиях на основе одномерного параболического ( $\gamma \equiv 0$ ) уравнения теплопроводности. Правая граница двухслойной стенки изотермическая:  $T_w \equiv \text{const}$ . Тепловой поток  $q_0(t)$  характеризует поверхностный источник энергии на левой границе. Начальная температура стенки однородная по координате:  $t = 0$ ,  $T(x, 0) = T^0 \equiv \text{const}$ , причем  $T_w = T^0$ . Теплофизические свойства металлов аппроксимируются полиномами третьей степени с постоянными коэффициентами. Процесс нагрева рассматривается в интервалах температур, для которых фазовые превращения не происходят. Изучен важный на практике случай, когда нагрев осуществляется немонотонным импульсом треугольной временной формы. При обработке результатов расчетов применяем следующие безразмерные параметры, которые определяют соответственно градиент температуры, тепловой поток и производство энтропии:

$$g = \frac{h}{T^0} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad Q = \frac{q(x, t) h}{T^0 \lambda(T^0)}, \quad S = \frac{\sigma(x, t)}{\sigma^0}, \quad \sigma^0 = \sigma(T^0) / h^2.$$

Параметры асимметрии (ПА), характеризующие тепловые свойства двухслойной пластины в зоне контакта, следующие:

$$A_T^{(z)} = \frac{(T_z)_{M_1-M_2}^{\max}}{(T_z)_{M_2-M_1}^{\max}}, \quad A_q^{(z)} = \frac{(q_z)_{M_1-M_2}^{\max}}{(q_z)_{M_2-M_1}^{\max}}, \quad A_\sigma^{(z)} = \frac{F_{M_1-M_2}^{(g,S)}}{F_{M_2-M_1}^{(g,S)}}, \quad A_G^{(z)} = \frac{F_{M_1-M_2}^{(g,Q)}}{F_{M_2-M_1}^{(g,Q)}}.$$

Индексом  $z$  отмечены значения функций на границе слоев;  $h$  – толщина пластины. В качестве  $M_1$ ,  $M_2$  применяем химические символы металлов; расположение индексов  $M_1 - M_2$  и  $M_2 - M_1$  указывает на расположение металлических слоев до и после перестановки. Буквами  $F_{M_1-M_2}^{(g,S)}$ ,  $F_{M_1-M_2}^{(g,Q)}$  и т. д. обозначаем площади петель ДТГ в плоскостях

«градиент температуры – производство энтропии» и «градиент температуры – тепловой поток». Асимметричные свойства теплопереноса выражены тем сильнее, чем больше ПА отличается от единицы. Явление тепловой асимметрии продемонстрируем для двух классов нелинейных процессов: 1) в каждом слое  $d\lambda/dT < 0$ ; в качестве примера берем железо и молибден, а также железо и вольфрам; 2) в одном слое  $d\lambda/dT < 0$ , а в другом  $d\lambda/dT > 0$ ; в качестве примера берем железо и ванадий, а также вольфрам и ванадий. Практика вычислений говорит о том, что именно температурная зависимость  $\lambda(T)$  является главным фактором, влияющим на формирование пространственно-временной структуры теплового поля. Подробно изучено влияние длительности теплового импульса, влияние начальной температуры образца и влияние нелинейных свойств среды. Приведем здесь результаты одной серии расчетов: свойства перестановки металлов, наполняющих слои разной толщины (толщины слоев не переставляются).

Система Fe–Mo. В зоне контакта отчетливо выражена асимметрия температуры и теплового потока (таблица 1). Основные свойства теплообмена заключаются в следующем: 1) чем больше  $h_2/h_1$  отличается от 1, тем сильнее проявляется асимметрия теплового потока на правой границе (см.  $A_q^{(w)}$ ); 2) зависимость  $A_q^{(z)}$  от  $h_2/h_1$  имеет два участка монотонного роста и участок насыщения («полочка») между ними,  $h_2/h_1 \in (0,53, 1,85)$ ; 3) по мере роста толщины второго слоя асимметрия производства энтропии уменьшается (см.  $A_G^{(z)}$ ), хотя и остается значительной; асимметрия ДТГ меняется вслед за изменением  $h_2/h_1$ :  $A_G^{(z)} < 1$  при  $h_2/h_1 < 1$ ,  $A_G^{(z)} > 1$  при  $h_2/h_1 > 1$ .

Система Fe–V. Отчетливо видна асимметрия теплового потока на правой границе, причем зависимость  $A_q^{(w)}$  от  $h_2/h_1$  немонотонная, имеет минимум. Поведение  $A_T^{(0)}$  отличается здесь тем, что с ростом  $h_2/h_1$  асимметрия температуры ослабевает. Асимметрия гистерезисных процессов: при  $h_2/h_1 < 1$  имеем  $A_G^{(z)} > 1$ ,  $A_G^{(z)} > 1$ ; при  $h_2/h_1 > 1$  имеем  $A_G^{(z)} < 1$ ,  $A_G^{(z)} < 1$ . Сделан важный вывод о том, что тепловое взаимодействие металлов испытывает значительное влияние конкуренции знаков производных  $(d\lambda/dT)_{M_1} < 0$ ,  $(d\lambda/dT)_{M_2} > 0$ . Это имеет такие последствия, как значительное усиление асимметрии теплового потока на правой изотермической границе, появление немонотонной зависимости ПА от отношения толщин слоев, существенные количественные различия значений ПА от их аналогов в системе с одинаковыми знаками производных  $(d\lambda/dT)_{M_1} < 0$ ,  $(d\lambda/dT)_{M_2} < 0$ .



Таблица 1 – Влияние перестановки металлов на ПА при фиксированных в каждом варианте толщинах слоев

$h_1 \cdot 10^2$ , м	$h_2/h_1$	Система Fe–Mo					Система Fe–V				
		$A_T^{(0)}$	$A_T^{(z)}$	$A_q^{(z)}$	$A_\sigma^{(z)}$	$A_G^{(z)}$	$A_T^{(0)}$	$A_T^{(z)}$	$A_q^{(z)}$	$A_\sigma^{(z)}$	$A_G^{(z)}$
0.85	0.176	1,164	0,828	0,536	0,002	0,355	0,799	1,144	1,0215	5,354	6,1269
0.65	0.538	1,171	0,765	0,648	0,043	0,465	0,8107	1,153	0,7535	0,967	1,5433
0.50	1,000	1,174	0,770	0,626	0,097	0,990	0,8155	1,112	0,7164	0,517	0,8157
0.35	1,857	1,168	0,792	0,644	0,189	1,863	0,8214	1,078	0,6621	0,362	0,6170
0.15	5,667	1,093	0,830	0,802	0,450	3,792	0,909	1,076	0,6623	0,321	0,5300

### 2.3 Асимметрия теплопереноса в системе с теплоизолированной границей

Детально изучено влияние основных параметров воздействия для систем Fe–Mo и Fe–V, а также Fe–W и W–V. Основное внимание обращается на качественные и количественные отличия от задачи с изотермической правой стенкой.

#### 2.4 Термоциклическое воздействие на двухслойную пластину

Рассматриваются два типа асимметрии. К асимметрии 1-го типа мы относим явления, связанные с перестановкой слоев (см. п. 2.2). Свойства асимметрии-1 изучены для двух серий расчетов: 1) выполняется перестановка металлов, наполняющих слои разной толщины (толщины слоев не переставляются); 2) перестановка толщин слоев вместе с наполняющими их металлами. Понятие об асимметрии 2-го типа введем для ситуации, когда металлы не переставляются, а толщины слоев зафиксированы. В этом случае асимметрия обусловлена последовательностью термических воздействий, а именно: в одном случае это «нагрев – охлаждение», в другом – «охлаждение – нагрев». Зависимость  $T_0(t)$  взята в виде, характерном для термоциклирования:  $T_0(t) = T^0 + \Theta \sin(mt) > 0$ ;  $\Theta, m = \text{const}$ . В режиме «нагрев – охлаждение» берем  $\Theta > 0$ , и параметры процесса отмечаем двойным нижним индексом  $+-$ ; в режиме «охлаждение – нагрев» берем  $\Theta < 0$ , и применяем индекс  $-+$ . ПА-1 такие же, как в п. 2.2. Параметры асимметрии 2-го типа (ПА-2) следующие:

$$B_q^{(z)} = \frac{(q_z)_{+-}^{\max}}{(q_z)_{-+}^{\max}}, \quad \bar{B}_q^{(z)} = \frac{(q_z)_{+-}^{\min}}{(q_z)_{-+}^{\min}}, \quad B_\sigma^{(z)} = \frac{F_{+-}^{(g,S)}}{F_{-+}^{(g,S)}}, \quad B_G^{(z)} = \frac{F_{+-}^{(g,Q)}}{F_{-+}^{(g,Q)}}.$$

Рассматриваем два варианта: 1) в каждом слое  $d\lambda/dT < 0$ ; в качестве примера берем железо и молибден; 2) в одном слое  $d\lambda/dT < 0$ , а в другом  $d\lambda/dT > 0$ ; в качестве примера берем железо и ванадий. Отметим здесь немонотонность параметров  $B_q^{(0)}, \bar{B}_q^{(0)}, B_q^{(z)}, B_\sigma^{(z)}$  по аргументу  $h_1/h_2$ . Существенно, что асимметрия-2 для энтропийных и гистерезисных процессов чутко реагирует на перестановку слоев металлов. По

отношению к температуре асимметрия-2 практически отсутствует:  
 $B_T^{(\varepsilon)} \cong 1,0$ ;  $\bar{B}_T^{(\varepsilon)} \cong 1,0$ ;  $B_T^{(w)} \cong 1,0$ ;  $\bar{B}_T^{(w)} \cong 1,0$ .

Основной практический интерес представляет ярко выраженная асимметрия-1 температуры и теплового потока в зоне контакта. Асимметрия-2 характерна в основном для энтропийных и гистерезисных процессов. Ведущие факторы влияния на асимметрию контактного теплообмена: температурная зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda(T)$ ; знаки производных  $(d\lambda/dT)_{M_1}$ ,  $(d\lambda/dT)_{M_2}$ ; отношение толщин слоев  $h_1/h_2$ . Формирование теплового состояния контакта происходит в течение первого периода термоциклирования; последующие периодические воздействия не дают существенных количественных и качественных изменений в поведении ПА-1 и ПА-2. Основное содержание главы 2 отражено в статьях [1-A], [3-A]–[8-A], [10-A], [11-A].

### **Глава 3 Формирование и эволюция периодических температурных полей в системе «локально-неравновесная среда – объемный источник энергии»**

Цель данной главы: 1) изучить генерацию двухмерных периодических тепловых полей в системе «локально-неравновесная среда – источник энергии»; 2) определить основные типы двухмерных периодических структур; 3) изучить динамические свойства тепловых полей в их зависимости от колебательно-релаксационных режимов в системе «среда – источник энергии»; 4) дать феноменологическое описание локально-неравновесного теплопереноса при взрывной кристаллизации аморфных пленок германия. В задаче о взрывной кристаллизации аморфных пленок физические предпосылки применения модели локально-неравновесного теплопереноса состоят в следующем: 1) фронт кристаллизации движется скачкообразно, с периодическими остановками. Это означает, что модуль ускорения  $|dN/dt|$  изменяется в широком диапазоне; например, при  $N \sim 8$  м/с,  $|dN/dt| \sim N/\gamma \sim 4 \cdot 10^8$  м/с<sup>2</sup>; 2) в закристаллизовавшейся области появляются лепестковые и чешуйчатые структуры; возможны варианты, когда внешние структурные формы взрывной кристаллизации аналогичны кругам на воде, распространяющимся от брошенного в нее камня. В известных в литературе экспериментальных работах [2] высказано предположение о волновой природе взрывной (ударной) кристаллизации. Объективная трудность при теоретическом исследовании взрывной кристаллизации заключается в том, что экспериментальные работы по этой проблеме имеют, в основном, качественный характер.

#### **3.1 Генерация периодических тепловых полей объемным источником энергии**

Проведено исследование свойств нелинейного объемного источника энергии  $q_v = q_v(T)$ , который возбуждает одномерные автомодельные

периодические по  $z = x + bt$  тепловые поля. Для параболической и гиперболической моделей теплопереноса выполнен сравнительный анализ поведения функции источника  $q_v(T)$ .

### 3.2 Двухмерные периодические тепловые структуры

Изучаются двухмерные плоские нестационарные тепловые поля. Выполнены две основные серии расчетов: 1) на плоскости декартовых координат  $(x, y)$ ; 2) в полярных координатах  $(r, \varphi)$ . Теплофизические свойства среды считаем постоянными:  $\lambda, c, \gamma = \text{const}$ . Объемный источник энергии линейно зависит от температуры:  $q_v = q_v^0 + q_v^1 T$ ;  $q_v^0, q_v^1 = \text{const}$ ;  $q_v^0 < 0$ ,  $q_v^1 > 0$ . Важным параметром процесса служит температура  $T_0^0 = -q_v^0 / q_v^1 > 0$ , при которой  $q_v(T_0^0) = 0$ . Изотерму  $T(x, y, t) = T_0^0$  будем называть нейтральной, поскольку при  $0 < T < T_0^0$  идет теплоотдача, а при  $T > T_0^0$  происходит тепловыделение. Изотерму  $T = T' < T_0^0$  для наглядности называем «холодной»; этот же термин применяем для температурной области, где  $q_v(T) < 0$ . Для изотермы  $T = T'' > T_0^0$  и температурной области, где  $q_v(T) > 0$ , применяем термин «горячий». Тепловое поле в образующейся твердой фазе изучаем между двумя изотермами,  $T \in [T_w, T_c]$ . Горячая изотерма  $T = T_c$  ассоциируется с фазовой границей, холодная изотерма  $T = T_w$  характерна для подложки. Устанавливающееся в ходе релаксационного процесса ( $t \rightarrow \infty$ ) стационарное температурное поле  $T_0(x, y)$  определяется одним из трех видов аналитических решений, для которых характерна аддитивная, мультипликативная либо «ребристая» двухмерность. Рассмотрены два основных варианта эволюции теплового поля во времени: аperiodический процесс (АП); затухающие периодические колебания (ПП). Двухмерные свойства теплового поля характеризуем параметром двухмерности  $\Delta$ . Структуру пространственно-периодических тепловых полей иллюстрируем на плоскости  $(x, y)$  построением семейств изотерм. Накопленный нами опыт вычислений позволяет утверждать, что существуют три основных варианта: 1) полоса (дорожка) изотерм, включающая в себя замкнутые изотермы (в гидродинамике такие изолинии носят название «кошачьи глаза»); 2) ячеистая структура, состоящая только из замкнутых изотерм; 3) решетчатая структура, состоящая из сомкнувшихся друг с другом ячеек и/или полос. Кроме того, наблюдаются смешанные варианты, которые являются комбинацией перечисленных трех типов. В наиболее сложных случаях такие комбинации дают мозаичную структуру. Важным элементом структуры периодических тепловых полей являются линии остановки и линии неподвижности изотерм.

Периодические остановки изотерм говорят о резких изменениях скорости фазовой границы и служат причиной образования пространственно-периодических структур при переходе аморфной пленки в устойчивое кристаллическое состояние. Линия остановки изотермы – это линия на плоскости  $(x, y)$ , на которой скорость перемещения изотермы равна нулю:  $N_i(x, y, t_r) = 0$ . Линия неподвижности изотермы – это линия, на которой условие остановки выполнено в каждый момент времени:  $N_i(x, y, t \geq 0) = 0$ . Выполненные расчеты сопровождаются подробными иллюстрациями, которые демонстрируют морфологические свойства формирующихся периодических структур. Полученные результаты качественно соответствуют известным экспериментальным наблюдениям (рисунок 1).

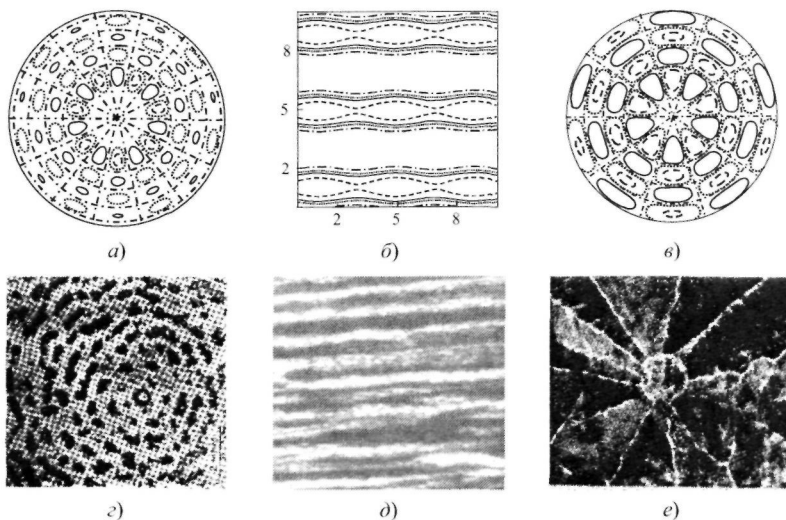


Рисунок 1 – Полосчатые и лепестковые структуры:  
 а, б, в – расчетные; г [2], д [3], е [4] – экспериментальные

### 3.3 Фазовая граница взрывной кристаллизации аморфной пленки германия

Дана феноменологическая оценка времени тепловой релаксации при взрывной кристаллизации аморфных пленок германия. Оценка основана на обработке экспериментальных результатов работы [2]. Эти опыты проводились при различных толщинах  $\delta$  аморфной пленки германия, напыленной на кварцевую пластину. Авторами этих измерений получены экспериментальные и теоретические данные (таблица 2) о характерной ширине полос, сформировавшихся в кристаллической фазе.

Таблица 2 – Экспериментальные и теоретические данные о характерной ширине полосы в кристаллической фазе

$T_w$ , К	$\lambda_j$ , Вт/(м·град)	$\gamma_j \cdot 10^8$ , с	$w_j$ , м/с	$N$ , м/с	$\Phi_{\text{эксп}} \cdot 10^6$ , м [2]	$\Phi_{\text{теор}} \cdot 10^6$ , м [2]	$\Phi \cdot 10^6$ , м
736	17,178	2,675	17,548	8,883	–	4,0	2,085
738	17,174	2,641	17,654	8,880	–	2,3	2,072
740	17,170	2,610	17,756	8,875	6,0	1,1	2,059
750	17,152	2,474	18,222	8,824	–	1,8	2,003
751	17,151	2,462	18,265	8,817	5,9	–	1,998
768	17,134	2,302	18,866	8,622	4,8	–	1,928
770	17,132	2,288	18,922	8,592	5,2	–	1,923

В диссертации предложен полуэмпирический способ расчета тепловых свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК), учитывающий релаксацию теплового потока, а также нелинейность теплофизических свойств германия (кристаллическая фаза) и кварца. Алгоритм основан на аналитическом описании полосчатых структур и кинетическом законе Френкеля-Вильсона. Некоторые результаты расчетов представлены в таблице 2.

Установлено, что расчеты в режиме незатухающих колебаний дают нижнюю границу значений  $\Phi$  характерной ширины полосы в кристаллической фазе. Время релаксации теплового потока в системе «пленка - подложка» обладает сильной физической нелинейностью по отношению к двум параметрам процесса: толщина пленки, температура подложки. Производство энтропии как функция скорости ФГК имеет минимум во всех обработанных экспериментальных точках. Характерная ширина полосы существующим образом зависит от колебательно-релаксационных свойств ФГК. Основное содержание главы 3 отражено в статьях [12-А]-[14-А], [16-А], [17-А].

#### **Глава 4 Локально-неравновесные фазовые границы кристаллизации**

Рассматриваются процессы высокоскоростной кристаллизации материала, при которых основную роль играют условия взаимодействия на границе раздела фаз и локально-неравновесный теплоперенос. Цель данной главы: 1) численно-аналитическое изучение теплофизических особенностей колебательной и ангармонической составляющих скорости ФГК; 2) теоретическое изучение локально-неравновесных тепловых свойств зависимости «переохлаждение - скорость роста»; 3) построение полуэмпирических функций, описывающих теплофизические свойства чистых переохлажденных расплавов никеля, меди и германия; 4) определение кинетических свойств фронта кристаллизации.

В данной задаче физические предпосылки применения модели локально-неравновесного теплопереноса состоят в следующем: 1) большое

ускорение ФГК ( $\sim 1 \cdot 10^8$  м/с<sup>2</sup>), благодаря которому высокая скорость ( $\sim 40$  м/с) достигается за малое время; 2) высокий градиент температуры, обусловленный глубоким переохлаждением расплава и, как следствие, большая скорость  $\partial q / \partial t$  изменения теплового потока; 3) необходимость объяснения с единой позиции нелинейных закономерностей поведения экспериментальной кривой  $N = F(\Delta T)$  в широких температурных областях (докритической и закритической).

Исходным пунктом полуэмпирического алгоритма являются экспериментальная зависимость  $N = F(\Delta T)$  скорости роста кристалла от переохлаждения расплава. Теплофизическая модель содержит, в частности, условия динамической совместности (закон сохранения энергии и баланс тепловых потоков на ФГК), кинетический закон нормального роста, а также условия теплообмена с внешней средой.

#### **4.1 Эволюционные свойства релаксирующих фазовых границ**

Условия динамической совместности и условия термодинамической устойчивости на ФГК  $x = x_j(t)$  имеют вид:

$$(q_j - q_*)N = (V_j - V_*); \quad q_j - q_* = N(u_j - u_*) - L(N + \gamma dN/dt); \quad (2)$$

$$w_*^2 < N^2 < (V_* - V_j)/(u_* - u_j) < w_j^2 \quad \text{либо} \quad w_j^2 < N^2 < (V_* - V_j)/(u_* - u_j) < w_*^2; \quad (3)$$

$$u(T) = \int_0^T c(T) dT, \quad V = \int_0^T \frac{\lambda(T)}{\gamma(T)} dT = \int_0^u w^2(u) du, \quad w^2 = \lambda/(c\gamma), \quad N = dx_j/dt > 0,$$

где «звездочкой» отмечены параметры расплава перед ФГК, индекс  $j$  указывает, что значение функции определено на левой стороне сильного разрыва, в твердой фазе;  $L$  – теплота фазового перехода единицы объема вещества. Первая цепочка неравенств в (3) характеризует сильный разрыв при одинаковом направлении выпуклости функции  $V(u)$  по обе стороны ФГК (знакопостоянная выпуклость). Вторая цепочка в (3) относится к знакопеременной выпуклости функции состояния  $V(u)$ . Нужно подчеркнуть, что именно учет зависимости  $w^2 = w^2(u)$  делает задачу о выборе устойчивой ФГК однозначно разрешимой.

#### **4.2 Тепловые свойства фронта кристаллизации однокомпонентного чистого переохлажденного расплава**

В работах [5]–[7] приведены результаты экспериментальных измерений зависимости скорости роста  $N$  кристалла от переохлаждения  $\Delta T$  расплава для никеля, меди и германия. Например, для никеля были достигнуты значения:  $\Delta T = 320^\circ$ ,  $N = 70$  м/с. Принципиальным обстоятельством является существование критического переохлаждения  $\Delta \bar{T}$ :

в окрестности  $\Delta T = \Delta \bar{T}$  при малых изменениях  $\Delta T$  происходит резкое изменение скорости  $N$ . Нами разработан полуэмпирический способ теплофизического истолкования экспериментальных зависимостей  $N = N(\Delta T)$  для однокомпонентных систем. Расчеты выполнены при докритических и закритических переохлаждениях. Выбор термодинамически допустимой скорости роста основан на анализе нелинейных свойств функции состояния системы  $V = V(u)$ . Итогом обработки экспериментов являются аналитические зависимости  $c = c(T)$  и  $G(T) = \lambda(T)/\gamma(T)$  для расплава (докритическая и закритическая температурные области) и для кристаллической фазы (левая окрестность  $T = T_c$ ). Например, объемная теплоемкость расплава представлена в виде непрерывной трехзвенной линии: первые два звена относятся к докритической области, третье – к закритической. В твердой фазе  $c(T)$  – двухзвенная линия. Время  $\gamma = \gamma(T)$  релаксации теплового потока является эффективным параметром согласования теории с опытом. Существенно, что для фазового перехода в докритической области функция состояния  $V(u)$  имеет знакопеременную нелинейность, а в закритической области – знакопостоянную. Производство энтропии на фазовой границе рассматривается как функция скачка теплового потока:  $\omega = \omega(k) > 0$ ,  $k = \{q\}$ . Расчеты показали, что для Ni, Cu и Ge в каждой обработанной экспериментальной точке эта функция имеет максимум:  $d\omega/dk|_{(\Delta T, N)} = 0$ ,  $d^2\omega/dk^2|_{(\Delta T, N)} < 0$ . Некоторые результаты обработки опытов по кристаллизации никеля приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты обработки опытов по кристаллизации никеля

$N$ , м/с	$\Delta T$ , град	$N_0$ , м/с	$k \cdot 10^{-10}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\omega \cdot 10^{-7}$ , Вт/(м <sup>2</sup> · град)	$w_j$ , м/с	$w_*$ , м/с
Докритическая область $0 \leq \Delta T \leq \Delta \bar{T}$						
2,53	57,7	1,93	2,861	3,333	0,209	12,65
6,63	98,2	2,71	3,381	10,091	0,268	12,49
13,55	136,3	3,58	3,498	44,340	0,305	12,34
15,00	145,4	3,77	3,536	106,250	0,316	12,30
Закритическая область $\Delta T > \Delta \bar{T}$						
29,35	166,0	5,235	2,724	195,71	9,5704	1,1155
39,25	208,2	6,146	2,324	288,66	9,570	0,9369
46,71	242,6	6,845	2,089	362,07	9,5698	0,8376
61,38	312,7	8,223	1,724	510,45	9,5694	0,6994

### **4.3 Кинетические свойства фазовой границы кристаллизации**

Проведено численное моделирование задачи о распространении ФГК. Представлены результаты расчета нестационарных, энтропийных и кинетических свойств ФГК для никеля, меди и германия. Выполнен расчет параметров локально-неравновесного теплового состояния твердой фазы. Определены кинетические свойства ФГК. Например, для никеля аппроксимирующая зависимость кинетического коэффициента роста  $\mu = \mu_0 + \mu_1 \cdot \Delta T + \mu_2 \cdot \Delta T^2$ , м/(К·с) от переохлаждения  $\Delta T$  имеет вид: для докритической области  $\mu_0 = -1238,44$ ;  $\mu_1 = 53,1365$ ;  $\mu_2 = -0,17663$ ; для закритической области  $\mu_0 = -1,4313$ ;  $\mu_1 = 0,06652$ ;  $\mu_2 = -2,954 \cdot 10^{-6}$ . Представленный алгоритм позволяет рассчитать кинетические и энтропийные свойства ФГК в каждой экспериментальной точке измерений ( $\Delta T, N$ ). Основное содержание главы 4 отражено в статьях [2-А], [9-А], [15-А].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. На основе численных экспериментов выявлены закономерности асимметрии теплового потока в двухслойной металлической пластине при воздействии на нее нестационарного поверхностного источника энергии. Тепловое взаимодействие металлов существенным образом зависит от знаков производных  $d\lambda/dT$  в каждом слое. Асимметричные свойства теплового потока в зоне контакта и на правой изотермической границе двухслойного образца детерминированы нелинейными теплофизическими свойствами  $\lambda(T)$  и  $\lambda(T)/c(T)$  металлов. Отношение толщин слоев  $h_2/h_1$  принципиальным образом влияет на асимметрию процесса. Контактный теплообмен на границе двух металлических слоев при термоциклическом воздействии обладает асимметричными свойствами двух типов: асимметрия-1 при перестановке слоев; асимметрия-2 при изменении очередности «нагрев – охлаждение» [1-А], [3-А]–[8-А], [10-А], [11-А].

2. Установлено, что в теплофизической системе «локально-неравновесная среда – знакопеременный источник энергии» семейства изотерм  $T(x, y, t) = \text{const}$  образуют три основных типа периодических структур: полосы, ячейки, решетки. Их динамические свойства существенно зависят от степени нестационарности процесса (быстрый, медленный) и от режима затухания (апериодический, периодический). Эволюция периодических структур сопровождается не только многовариантностью переходов от одного типа периодичности к другому, но и разнообразием комбинаций основных типов. Выполнен феноменологический расчет времени релаксации теплового потока при



высокоскоростной кристаллизации аморфных пленок германия [12-A]-[14-A], [16-A], [17-A].

3. Предложен способ обработки опытных данных о корреляции «переохлаждение расплава - скорость роста кристалла» для однокомпонентных систем. Обнаружено, что функция состояния теплофизической системы «расплав - кристалл» имеет знакопеременную нелинейность при докритическом переохлаждении и знакопостоянную - в закритической области. Построены полуэмпирические температурные зависимости для теплофизических свойств изученных веществ в твердой фазе и при глубоких переохлаждениях. Установлены зависимости  $d(T)$  кинетического коэффициента роста от переохлаждения расплава в докритической и закритической областях [2-A], [9-A], [15-A].

#### ***Рекомендации по практическому использованию результатов***

Научная значимость работы состоит в получении теоретическими методами новых физических знаний о нагреве, охлаждении и кристаллизации металлов. Выполнено обобщение результатов серии расчетов для двухслойной металлической пластины, дающее возможность прогнозировать в широком интервале температур тепловое состояние металлов в зоне контакта. Предложен алгоритм, позволяющий расчетным путем установить типы двумерных периодических структур. Результаты исследования являются базовыми при теплофизической интерпретации экспериментальных наблюдений периодических структур, возникающих при взрывной кристаллизации аморфных пленок. Построен алгоритм обработки экспериментальной информации о скорости движения фазовой границы в системе «расплав - кристалл». Рекомендованы формулы расчета теплофизических свойств Ni, Cu, Ge в кристаллической фазе и в глубоко переохлажденном состоянии. Расчетные зависимости и рекомендации диссертационной работы могут быть практически использованы при тепловом проектировании различных физико-энергетических и электронных устройств, в материаловедении больших интегральных схем, в технологии получения быстрозакаленных материалов.

Результаты работы использовались на РУП «Гомельский завод пусковых двигателей» для теоретического и экспериментального исследования образцов при высокоинтенсивном нагреве и внедрены в учебный процесс учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого».

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gogol, W. Eksperymentaln badania efektu asymetrii przewodzenia w ukladach dwuskładnikowych / W. Gogol // Archiwum termodynamiki. - 1984. - Vol. 5, № 3-4. - P. 289-311.
2. Александров, Л.Н. Кинетика кристаллизации и перекристаллизации полупроводниковых пленок / Л.Н. Александров. - Новосибирск: Наука, 1985. - 224 с.
3. Grigoropoulos, C. Explosive crystallization in the presence of melting / C. Grigoropoulos, [et. al.] // Physical Review B. - 2006. - Vol. 73. - P. 184125-1-184125-15.
4. Дендритная кристаллизация аморфных пленок железа / В.Г. Мягков [и др.] // Изв. РАН. Сер. физическая. - 1995. - Т. 59, № 2. - С. 152-156.
5. Herlach, D.M. Direct measurements of crystal growth velocities in undercooled melts / D.M. Herlach // Materials Science and Engineering. - 1994.-A179/A180.-P. 147-152.
6. Battersby, S.E. Microstructural evolution and growth velocity-undercooling relationships in the systems Cu, Cu-0 and Cu-Sn at high undercooling / S.E. Battersby, R.F. Cochrane, A.M. Mullis // Journal of Materials Science. - 2000. - Vol. 35. - P. 1365-1373.
7. Battersby, S.E. Growth velocity-undercooling relationships and microstructural evolution in undercooled Ge and dilute Ge-Fe alloys / S.E. Battersby, R.F. Cochrane, A.M. Mullis // Journal of Materials Science. - 1999. - Vol. 34. - P. 2049-2056.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Статьи в рецензируемых журналах и книгах**

- 1-А. Шабловский, О.Н. Численное решение нелинейных задач нестационарного нагрева материалов / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения: сб. науч. тр. / Ин-т математики НАН Украины; редкол.: А.М. Самойленко [и др.]. - Киев, 1998. - С. 234-237.
- 2-А. Кроль, Д.Г. Численное моделирование тепловых процессов на фазовой границе высокоскоростной кристаллизации / Д.Г. Кроль // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2000. - № 3. - С. 117-122.
- 3-А. Шабловский, О.Н. Нестационарные свойства поверхностного нагрева металлов / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль, И.А. Концевой // Вестн. Запорож. гос. ун-та. - 2002. -№ 1. - С. 148-152.

4-А. Кроль, Д.Г. Нестационарные тепловые процессы при поверхностном нагреве двухслойных пластин / Д.Г. Кроль // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2002. - № 3-4. - С. 146-150.

5-А. Кроль, Д.Г. Квазистационарная стабилизация поверхностного нагрева металлов / Д.Г. Кроль, И.А. Концевой // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2002. - № 3-4. - С. 141-145.

6-А. Шабловский, О.Н. Динамические свойства контактного теплообмена в двухслойной металлической пластине / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Материалы, технологии, инструменты. - 2004. - Т. 9, № 4. - С. 9-14.

7-А. Шабловский, О.Н. Асимметричные свойства тепловых процессов при поверхностном нагреве двухслойной металлической пластины / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Прикл. физика. - 2005. - № 1, - С. 31-38.

8-А. Шабловский, О.Н. Нелинейные тепловые процессы при импульсном нагреве двухслойной металлической пластины / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. - 2005. - № 2. - С. 56-62.

9-А. Шабловский, О.Н. Тепловые свойства фронта кристаллизации однокомпонентного чистого переохлажденного расплава / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Расплавы. - 2005. - № 4. - С. 69-81.

10-А. Кроль, Д.Г. Исследование основных параметров влияния на асимметрию теплопереноса в двухслойной металлической пластине / Д.Г. Кроль // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2005. - № 3. - С. 40-46.

11-А. Кроль, Д.Г. Нелинейная асимметрия контактного теплообмена в двухслойной системе / Д.Г. Кроль // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундам. науки. - 2007. - № 3. - С. 113-118.

12-А. Шабловский, О.Н. Локально-неравновесные периодические тепловые поля в системе «среда - источник энергии» / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундам. науки. - 2008. - № 9. - С. 134-140.

13-А. Шабловский, О.Н. Формирование периодических тепловых структур при взрывной кристаллизации аморфных пленок / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Тепловые процессы в технике. - 2009. - № 5. - С. 178-182.

14-А. Шабловский, О.Н. К вопросу о генерации периодических температурных полей объемными источниками энергии / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль, И.А. Концевой // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2006. - № 2. - С. 73-81.

15-А. Шабловский, О.Н. Расчет кинетических параметров фронта кристаллизации глубоко переохлажденного расплава / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Материалы, технологии, инструменты. - 2007. - Т. 12, № 1. - С. 5-10.

16-А. Шабловский, О.Н. Неклассические закономерности воздействия объемного источника энергии на материал с «тепловой памятью» / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // *Материалы, технологии, инструменты*. - 2008. - Т. 13, № 3. - С. 22-26.

17-А. Шабловский, О.Н. Формирование лепестковых конфигураций при взрывной кристаллизации аморфных пленок / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // *Материалы, технологии, инструменты*. - 2009. - Т. 14, № 2. - С. 27-33.

#### **Статьи в сборниках и материалах конференций**

18-А. Кроль, Д.Г. Нестационарные задачи теплопроводности с источниками энергии переменной мощности / Д.Г. Кроль // *Современные проблемы машиноведения: материалы науч.-техн. конф.*, Гомель, 1-3 июля 1998 г.: в 2 т. / ГПИ; редкол.: А.С. Шагинян [и др.]. - Гомель, 1998. - Т. 2. - С. 58-59.

19-А. Шабловский, О.Н. Затухающий аperiodический тепловой режим на фазовой границе высокоскоростной кристаллизации / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // *Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч.-техн. конф.*, Гомель, 5-7 июля 2000 г.: в 2 т. / ГГТУ им. П.О. Сухого; редкол.: А.С. Шагинян [и др.]. - Гомель, 2000. - Т. 2. - С. 82-85.

20-А. Шабловский, О.Н. Эволюционные свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации. / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // *Математическое моделирование в образовании, науке и промышленности: сб. науч. тр. / С.-Петербург. отд.-ние МАН ВШ; под ред. А.Н. Хомченко [и др.]. - СПб., 2000. - С. 198-201.*

21-А. Шабловский, О.Н. Тепловые процессы при фазовом переходе в локально-неравновесных условиях / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // *Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках: тр. XIII Школы-семинара молодых ученых под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева, Санкт-Петербург, 20-25 мая 2001 г.: в 2 т. / Нац. ком. РАН по тепло- и массообмену, МЭИ; редкол.: А.И. Леонтьев [и др.]. - М.: Изд-во МЭИ, 2001. - Т. 2. - С. 260-263.*

22-А. Shablovsky, O.N. Locally - nonequilibrium heat processes at high-speed crystallization / O.N. Shablovsky, D.G. Kroll // *Single crystal growth and heat @ mass transfer: Proceedings of the Fourth International Conference, Obninsk, Russia, 24-28 September 2001.: in 4 volumes / SSC RF IPPE; edit. V.P. Ginkin [et al.]. - Obninsk, 2001. - Vol. 3. - С 756-763.*

23-А. Шабловский, О.Н. Импульсный нагрев металла в широком интервале температур / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль, И.А. Концевой // *Машиностроение: сб. науч. тр. / под. ред. И.П. Филонова. - Минск: УП «Технопринт». -2002. - Вып. 18. - С. 516-520.*

24-А. Кроль, Д.Г. Квазистационарная стабилизация поверхностного нагрева металлов / Д.Г. Кроль, И.А. Концевой // Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 4-6 июля 2002 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. - Гомель, 2002.- С. 62-63.

25-А. Шабловский, О.Н. Асимметричные свойства термоциклического воздействия на двухслойную пластину / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: тр. XV Школы-семинара молодых ученых под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева, Калуга, 23-27 мая 2005 г.: в 2 т. / Нац. ком. РАН по тепло- и массообмену, МЭИ; редкол.: А.И. Леонтьев [и др.]. - М: Изд-во МЭИ, 2005. - Т. 2. - С. 375-379.

26-А. Шабловский, О.Н. Формирование и эволюция неравновесных периодических тепловых структур / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 23-27 окт. 2006 г.: в 8 т. / Нац. ком. РАН по тепло- и массообмену, МЭИ. - М.: Изд-во МЭИ, 2006. - Т. 7. - С. 362-365.

27-А. Кроль, Д.Г. Асимметрия контактного теплообмена при импульсном тепловом нагружении двухслойной пластины / Д.Г. Кроль // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности: тез. докл. IV Науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 24-26 окт. 2007 г. / Компания «Сухой», МАИ. - М.: Изд-во МАИ, 2007. - С. 141-145.

28-А. Шабловский, О.Н. Динамика периодических тепловых структур при взрывной кристаллизации аморфных пленок / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // ФиПС-08 «Прикладная синергетика в нанотехнологиях»: тр. пятого междунар. междисциплинар. семинара, Москва, 17-20 нояб. 2008 г. / Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; редкол.: Ю.В. Цветкова [и др.]. - М., 2008. - С. 284-288.

29-А. Шабловский, О.Н. Генерирование и разрушение неравновесных периодических тепловых полей / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Моделирование неравновесных систем: материалы XII Всерос. семинара, Красноярск, 9-11 окт. 2009 г. / ИВМ СО РАН; редкол.: В.В. Слабко [и др.]. - Красноярск, 2009. - С. 195-199.

#### **Тезисы докладов конференций**

30-А. Шабловский, О.Н. Нестационарные тепловые процессы при высокоскоростной обработке материалов резанием / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Тезисы докладов 52-й международной научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БГПА, Минск, 21-24 нояб. 1997 г.: в 7 ч. / БГПА. - Минск, 1997. - 4.6. - С. 175.

31-А. Шабловский, О.Н. Расчет нестационарных температурных воздействий в задачах интенсивных теплотехнологий / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. науч.-техн. конф., Могилев, 25-27 марта 1998 г. / Могилев, технол. ин-т; редкол.: Т.С. Хасаншин [и др.]. - Могилев, 1998. - С. 259.

32-А. Кроль, Д.Г. Теплофизическое моделирование лазерного нагрева металлов / Д.Г. Кроль // Физика конденсированных сред: тез. докл. VI Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гродно, 22-24 мая 1998 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы; редкол.: В.А. Лиопо [и др.]. - Гродно, 1998. - С. 99.

33-А. Кроль, Д.Г. Нелинейные тепловые колебания при высокоскоростной кристаллизации материалов / Д.Г. Кроль // Физика конденсированных сред: тез. докл. VI Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гродно, 3-5 мая 2000 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы; редкол.: В.А. Лиопо [и др.]. - Гродно, 2000. - С. 193-195.

34-А. Кроль, Д.Г. Исследование тепловых процессов при высокоинтенсивном нагреве пластин / Д.Г. Кроль, И. А. Концевой // Физика конденсированных сред: тез. докл. IX Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гродно, 2-4 мая 2001 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы; редкол.: В.А. Лиопо [и др.]. - Гродно, 2001. - С. 168-169.

35-А. Кроль, Д.Г. Моделирование тепловых процессов при высокоскоростной кристаллизации материалов / Д.Г. Кроль // Физика конденсированных сред: тез. докл. IX Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гродно, 2-4 мая 2001 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы; редкол.: В.А. Лиопо [и др.]. - Гродно, 2001. - С. 166-167.

36-А. Кроль, Д.Г. Воздействие поверхностного источника энергии на двухслойную пластину / Д.Г. Кроль // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: тез. докл. VIII Всерос. конф. молодых ученых, Новосибирск, 23-26 апр. 2002 г. / Ин-т теплофизики СО РАН; редкол.: В.Е. Накоряков [и др.]. - Новосибирск, 2002. - С. 148-149.

37-А. Шабловский, О.Н. Нелинейные тепловые процессы при импульсном нагреве двухслойной металлической пластины / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. V науч.-техн. конф., Гомель, 1-2 июля 2004 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. - Гомель, 2004. - С. 62.

38-А. Шабловский, О.Н. Тепловые свойства фронта затвердевания переохлажденного расплава / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // X Национальная конференция по росту кристаллов: тез. докл. науч. конф., Москва, 15-19 сент. 2002 г. / Ин-т кристаллографии РАН. - М., 2002. - С. 451.

39-А. Шабловский, О.Н. Теплофизическая интерпретация измерений скорости роста кристалла в переохлажденном расплаве / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Кинетика и механизм кристаллизации:

тез. докл. III Междунар. науч. конф., Иваново, 12-14 окт. 2004 г. / Ин-т химии растворов РАН. - Иваново, Россия, 2006. - С. 123.

40-A. Shablovsky, O.N Asymmetry of thermal processes: entropy and hysteresis propertieess / O.N. Shablovsky, D.G. Kroll // VI International Congress on mathematical modelling: Book of abstracts, Nizhny Novgorod, Russia, 20-26 September 2004 / University of Nizhny Novgorod, Council in Mathematical Modelling of the Russian Academy of Sciences. - Nizhny Novgorod, 2004.-P. 216.

41-А. Шабловский, О.Н. Энтропийные свойства фронта кристаллизации глубоко переохлажденного расплава / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Кинетика и механизм кристаллизации. Нанокристаллизация. Биокристаллизация: тез. докл. IV Междунар. науч. конф., Иваново, 19-22 сент. 2006 г. / Ин-т химии растворов РАН. - Иваново, Россия, 2006.-С. 123.

42-А. Кроль, Д.Г. Исследование периодических тепловых полей в среде с объемным источником энергии / Д.Г. Кроль // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VI науч.-техн. конф., Гомель, 19-20 окт. 2006 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. - Гомель, 2006.-С. 82-83.

43-A. Shablovsky, O.N Thermal Locally - Nonequilibrium Properties of an Undercooled Melt / O.N. Shablovsky, D.G. Kroll // 8<sup>th</sup> International Workshop on Subsecond Thermophysics: Book of abstracts, Moscow, Russia, 26-28 September 2007 / Russian Academy of Sciences Joint Institute for High Temperatures; edit. V. Fortov. - Moscow, 2007. - P. 60.

44-А. Шабловский, О.Н. Инверсия знака объемного источника энергии в локально-неравновесной среде / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Моделирование неравновесных систем: материалы XI Всерос. семинара, Красноярск, 26-28 сент. 2008 г. / Ин-т вычисл. моделирования СО РАН. - Красноярск, 2008. - С. 212-213.

45-А. Шабловский, О.Н. Формирование периодических структур при взрывной кристаллизации аморфных пленок / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // XIII Национальная конференция по росту кристаллов: тез. докл. науч. конф., Москва, 17-21 нояб. 2008 г. / Ин-т кристаллографии РАН. - М., 2008.-С. 161.

## РЭЗЮМЕ

Кроль Дзмітрый Рыгоравіч

### **Асіметрыя цеплавых працэсаў і рэлаксіруючыя фазавыя межы ў нелінейных асяроддзях**

**Ключавыя словы:** тэмпература, цеплавы паток, час рэлаксацыі цеплавога патоку, цеплаправоднасць, цеплаемістасць, вытворчасць энтрапіі, крыніца энергіі, асіметрыя, гістарэзіс, перыядычныя структуры, пераахладжэнне, фазавая мяжа, крышталізацыя.

**Мэта працы:** пастроіць разліковыя мадэльныя ўяўленні пра нелінейныя (асіметрычных, гістерэзісных, энтрапійных) уласцівасці кантактнага цеплаабмену пры імпульсным нагрэве двухслаёвай металічнай пласціны, распрацаваць метадыкі рашэння задач рэлаксацыйнага цеплапераносу пры высакахуткаснай крышталізацыі нелінейных асяроддзяў (аморфныя пленкі, глыбока пераахладжаныя расплавы металаў).

**Метад даследавання:** тэарэтычныя мадэлі сучаснай цеплафізікі (мадэль Фур'е, мадэль Максвела-Каттанео); метады лікавага мадэлявання цеплапераносу.

#### **Атрыманы наступныя найбольш важныя новыя навуковыя вынікі**

Выяўлены заканамернасці асіметрыі цеплавога патоку ў двухслаёвай металічнай пласціне пры ўздзеянні на яе нестацыянарнай павярхоўнай крыніцы энергіі. Практычную цікавасць уяўляе яркая выяўленая асіметрыя тэмпературы і цеплавога патоку ў зоне кантакту.

Устаноўлена, што ў цеплафізічнай сістэме «лакальна-нераўнаважнае асяроддзе - знакапераменная крыніца энергіі» сямейства ізатэрмаў утварае тры асноўных тыпа перыядычных структур: палосы, ячэйкі, рашоткі. Вынікі даследавання з'яўляюцца базавымі пры цеплафізічнай інтэрпрэтацыі эксперыментальных назіранняў перыядычнай крышталізацыі (выбухная крышталізацыя аморфных пленак).

Прапанаваны спосаб апрацоўкі эксперыментальных дадзеных пра карэляцыю «пераахладжэнне расплаву - хуткасць росту крышталя» для аднакампанентных сістэм. Пабудаваны паўэмпірычныя тэмпературныя залежнасці для цеплафізічных уласцівасцяў вывучаных рэчываў у цвёрдай фазе і пры глыбокіх пераахладжэннях. Усталяваны залежнасці кінэтычнага каэфіцыента росту ад пераахладжэння расплаву ў закрытычнай і закрытычнай галінах.

**Галіна ужывання:** імпульснае цеплавое ўздзеянне на матэрыялы; высокахуткасная крышталізацыя.



## РЕЗЮМЕ

Кроль Дмитрий Григорьевич

### **Асимметрия тепловых процессов и релаксирующие фазовые границы в нелинейных средах**

**Ключевые слова:** температура, тепловой поток, время релаксации теплового потока, теплопроводность, теплоемкость, производство энтропии, источник энергии, асимметрия, гистерезис, периодические структуры, переохлаждение, фазовая граница, кристаллизация.

**Цель работы:** построить расчетные модельные представления о нелинейных (асимметрических, гистерезисных, энтропийных) свойствах контактного теплообмена при импульсном нагреве двухслойной металлической пластины, разработать методики решения задач релаксационного теплопереноса при высокоскоростной кристаллизации нелинейных сред (аморфные пленки, глубоко переохлажденные расплавы металлов).

**Метод исследования:** теоретические модели современной теплофизики (модель Фурье, модель Максвелла-Каттанео); методы численного моделирования теплопереноса.

#### **Получены следующие наиболее важные новые научные результаты**

Выявлены закономерности асимметрии теплового потока в двухслойной металлической пластине при воздействии на нее нестационарного поверхностного источника энергии. Практический интерес представляет ярко выраженная асимметрия температуры и теплового потока в зоне контакта.

Установлено, что в теплофизической системе «локально-неравновесная среда - знакопеременный источник энергии» семейства изотерм  $T(x,y,t) = \text{const}$  образуют три основных типа периодических структур: полосы, ячейки, решетки. Результаты исследования являются базовыми при теплофизической интерпретации экспериментальных наблюдений взрывной кристаллизации аморфных пленок.

Предложен способ обработки экспериментальных данных о корреляции «переохлаждение расплава - скорость роста кристалла» для однокомпонентных систем. Построены полуэмпирические температурные зависимости для теплофизических свойств изученных веществ в твердой фазе и при глубоких переохлаждениях. Установлены зависимости кинетического коэффициента роста от переохлаждения расплава в докритической и закритической областях.

**Область применения:** импульсное тепловое воздействие на материалы; высокоскоростная кристаллизация.

## SUMMARY

**Kroll** Dmitry Grigorievich

### **Asymmetry of heat processes and relaxing phase boundaries in nonlinear media**

**Key words:** temperature, heat flux, relaxation time of the heat flux, heat conductivity, heat capacity, entropy production, energy source, asymmetry, hysteresis, periodical structures, overcooling, phase boundary, crystallization.

**Purposes of the work:** constructing calculative models for nonlinearities asymmetric, hysteresis-like, and entropical features of contact heat exchange at impulse heating of bimetallic plate; creating paths for solving problems on relaxing heat transfer at high-speed crystallization in non-linear media (amorphous films, deep over-cooled metal melts).

**Method of study:** modern models of theoretical thermophysics (Fourier model, Maxwell-Cattaneo model); heat transfer modeling methods.

#### **The following new results are obtained**

Asymmetry of the heat flux in a two-layer metal plate under non-stationary surface energy source is described. Special practical value has the dramatic asymmetry of temperature and that of heat flux in the contact zone.

In the system «locally-nonequilibrium medium - alternating energy source» isotherms  $T(x, y, t) = \text{const}$  form following types of periodic structures: stripes, cells, lattices. The results obtained form the foundation for the thermophysical interpretation of periodical crystallization in amorphous films.

Experimental data on correlation «melt overcooling - crystal growth velocity» for unicomponent systems are analyzed. Semiempirical temperature dependences for thermophysical properties of Ni, Cu and Ge are proposed both for solid phase and for deep overcoolings. Dependences of the growth coefficient on the melt overcooling are found for pre-critical and trans-critical regions.

**Practical applications area:** impulse thermal processing of materials; high-speed crystallization.

Научное издание

**КРОЛЬ Дмитрий Григорьевич**

**АСИММЕТРИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
И РЕЛАКСИРУЮЩИЕ ФАЗОВЫЕ ГРАНИЦЫ  
В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.14- Теплофизика  
и теоретическая теплотехника

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 30.03.10.

Формат 60x84/<sub>16</sub> Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,58.

Тираж 90 экз. Заказ № 1117/20.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.