

ҚАРАҒАНДЫ  
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
**ХАБАРШЫСЫ**  
**ВЕСТНИК**  
КАРАГАНДИНСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 0142-0843

**ФИЗИКА** сериясы  
**№ 2(70)/2013**  
Серия **ФИЗИКА**

Сәуір–мамыр–маусым  
1996 жылдан бастап шығады  
Жылына 4 рет шығады

Апрель–май–июнь  
Издается с 1996 года  
Выходит 4 раза в год

Собственник РГП

**Қарагандинский государственный университет  
имени академика Е.А.Букетова**

Бас редакторы — Главный редактор

**Е.К.КУБЕЕВ,**

**академик МАН ВШ, д-р юрид. наук, профессор**

*Зам. главного редактора*

Х.Б.Омаров, д-р техн. наук

*Ответственный секретарь*

Г.Ю.Аманбаева, д-р филол. наук

*Серияның редакция алқасы — Редакционная коллегия серии*

К.К.Кусаинов,  
Т.А.Кокетайтеги,  
Н.Х.Ибраев,  
А.О.Саулебеков,  
К.М.Арынгазин,  
И.В.Брейдо,  
С.Д.Джуманов,  
М.М.Кидибаев,  
З.Ж.Жанабаев,  
Г.В.Климушева,  
С.А.Кумеков,  
В.М.Лисицын,  
И.А.Огородников,  
Г.И.Пилипенко,  
С.В.Плотников,  
А.Ж.Турмухамбетов,  
К.Ш.Шункеев,  
Л.В.Чиркова,

редактор д-р техн. наук;  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р пед. наук;  
д-р техн. наук;  
д-р физ.-мат. наук (Узбекистан);  
д-р физ.-мат. наук (Кыргызстан);  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р физ.-мат. наук (Украина);  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р физ.-мат. наук (Россия);  
д-р физ.-мат. наук (Россия);  
д-р физ.-мат. наук (Россия);  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р физ.-мат. наук;  
д-р физ.-мат. наук;  
ответственный секретарь  
канд. техн. наук, доцент

Редакторы *Ж.Т.Нұрмұханова*  
Редактор *И.Д.Рожнова*  
Техн. редактор *Д.Н.Муртазина*

Издательство Карагандинского  
государственного университета  
им. Е.А.Букетова  
100012, г. Караганда,  
ул. Гоголя, 38,  
тел., факс: (7212) 51-38-20  
e-mail: [izd\\_kargu@mail.ru](mailto:izd_kargu@mail.ru)

Басуға 26.06.2013 ж. қол қойылды.  
Пішімі 60×84 1/8.  
Офсеттік қағазы.  
Көлемі 10,25 б.т.  
Таралымы 300 дана.  
Бағасы келісім бойынша.  
Тапсырыс № 933.

Подписано в печать 26.06.2013 г.  
Формат 60×84 1/8.  
Бумага офсетная.  
Объем 10,25 п.л. Тираж 300 экз.  
Цена договорная. Заказ № 933.

Отпечатано в типографии  
издательства КарГУ  
им. Е.А.Букетова

*Адрес редакции:* 100028, г. Караганда, ул. Университетская, 28

Тел.: (7212) 77-03-69 (внутр. 1026); факс: (7212) 77-03-84.

E-mail: [vestnick\\_kargu@ksu.kz](mailto:vestnick_kargu@ksu.kz). Сайт: <http://www.ksu.kz>

© Карагандинский государственный университет, 2013

Зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство № 13111–Ж от 23.10.2012 г.

## МАЗМҰНЫ

### КОНДЕНСАЦИЯЛАҢҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

<i>Селиверстова Е.В., Ыбыраев Н.Х., Сейсенбаева Г.С.</i> Миристинат родамин 6 Ж және кумарин 7 молекуласы арасындағы индуктивті-резонанстық энергия алмасулары.....	4
<i>Старостенков М.Д., Обидина О.В., Захаров П.В., Маркидонов А.В., Дёмина И.А., Попова Г.В.</i> Ni-Al, Ni-Fe және Pt-Al биметалдар бөлімі шегіндегі атомдар кешенінің кооперативті жылжуы.....	11

### ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

<i>Құсайынов Қ., Жуандықова Г.А., Ахмадиев Б.А., Шуюшбаева Н.Н., Қужуханова Ж.А.</i> Жылу сорғыларындағы жылу сорғыш элементтерін орналастыру үшін ұнғыларды бұрғылаудың электрогидроимпульстік технологиясын жасау.....	20
--	----

### ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

<i>Антощенко В.С., Францев Ю.В., Жарекешев И.Х., Лаврищев О.А.</i> Концентраторлық күн элементтері негізінде жасалған жылу-фотоэлектрлік түрлендіргіш.....	26
<i>Исмайылов Ж.Т., Колесников В.А., Закиев Д.М.</i> Ақпараттық-өлшеуіш жүйенің әмбебап таратқышының құрылымдық сұлбесін жасау.....	32
<i>Колесников В.А., Юров В.М., Исмайылов Ж.Т.</i> Ақпараттық-өлшеуіш жүйелерінің технологиялық мұрасы.....	38
<i>Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н., Юров В.М., Гученко С.А.</i> Микроқаттылыққа және көпфазалы жамылғылардың трибологиялық қасиеттеріне термиялық өңдеудің әсері.....	48
<i>Самоделькина С.В., Таткеева Г.Г., Оразғалиев Г.Ш., Эйрих В.И., Мехтиев А.Д., Югай В.В.</i> Телекоммуникациялық жүйені басқару және ақпаратты беру үрдістеріне қабылдамаудың әсері.....	58

### АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАЛАРЫ

<i>Үмбетов Ә.Ү., Садықова Б.С.</i> Лазерлік өлшегіш құралдар.....	65
---	----

### ФИЗИКАНЫҢ ӘДІСТЕМЕСІ

<i>Арынгазин Қ.М., Мусенова Э.К., Сейсембекова Т.Е.</i> Геометриялық ойлардың нанотехнологиядағы ролі.....	70
--	----

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

<i>Селиверстова Е.В., Ибраев Н.Х., Сейсенбаева Г.С.</i> Индуктивно-резонансный перенос энергии между молекулами кумарина 7 и миристината родамина 6 Ж.....	4
<i>Старостенков М.Д., Обидина О.В., Захаров П.В., Маркидонов А.В., Дёмина И.А., Попова Г.В.</i> Кооперативные смещения комплексов атомов на границе раздела биметаллов Ni-Al, Ni-Fe и Pt-Al.....	11

### ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

<i>Құсайынов Қ., Жуандықова Г.А., Ахмадиев Б.А., Шуюшбаева Н.Н., Қужуханова Ж.А.</i> Разработка электрогидроимпульсной технологии бурения скважин для установки теплосъемных элементов тепловых насосов.....	20
--	----

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

<i>Антощенко В.С., Францев Ю.В., Жарекешев И.Х., Лаврищев О.А.</i> Концентраторный тепло-фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии.....	26
<i>Исмаилов Ж.Т., Колесников В.А., Закиев Д.М.</i> Разработка структурной схемы универсального передатчика информационно-измерительной системы.....	32
<i>Колесников В.А., Юров В.М., Исмаилов Ж.Т.</i> Технологическая наследственность информационно-измерительных систем.....	38
<i>Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н., Юров В.М., Гученко С.А.</i> Влияние термической обработки на микротвердость и трибологические свойства многофазных покрытий.....	48
<i>Самоделькина С.В., Таткеева Г.Г., Оразғалиев Г.Ш., Эйрих В.И., Мехтиев А.Д., Югай В.В.</i> Влияние отказов на процессы управления телекоммуникационной системой и передачи информации в ней.....	58

### ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

<i>Үмбетов А.Ү., Садықова Б.С.</i> Лазерные измерительные устройства.....	65
---	----

### МЕТОДИКА ФИЗИКИ

<i>Арынгазин К.М., Мусенова Э.К., Сейсембекова Т.Е.</i> Роль геометрических идей в нанотехнологии.....	70
--	----

---

<i>Ермаганбетов Қ.Т., Чиркова Л.В., Аринова Е.Т.</i> «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» оқу бағдарламасының пәндерінде дәстүрлі емес дәрістерді қолдану ..	75	<i>Ermaganbetov K.T., Chirkova L.V., Arinova E.T.</i> Use of nonconventional lectures in disciplines of the specialty «Radio engineering, electronics and telecommunications».....	75
АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР .....	81	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	81

---

# КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535.37

Е.В.Селиверстова, Н.Х.Ибраев, Г.С.Сейсенбаева

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова, Институт молекулярной нанофотоники  
(E-mail: genia\_sv@mail.ru)*

## **Индуктивно-резонансный перенос энергии между молекулами кумарина 7 и миристината родамина 6 Ж**

Исследован перенос энергии электронного возбуждения от молекул кумарина 7 к молекулам миристината родамина 6 Ж. Показано, что безызлучательный процесс переноса энергии осуществляется по индуктивно-резонансному механизму. Рассчитаны интегралы перекрытия и критические радиусы переноса энергии. Выяснено, что экспериментальные условия являются оптимальными для переноса энергии от молекул донора к молекулам акцептора. Полученные данные могут быть использованы для увеличения сбора световой энергии и улучшения преобразования солнечной энергии в электрическую фотовольтаическими ячейками, сенсibilизированными органическими красителями.

*Ключевые слова:* индуктивно-резонансный перенос энергии, органические красители, растворы, спектрально-люминесцентные свойства

### *Введение*

Изучение протекания механизмов фотопроцессов в системах на основе органических молекул и понимание механизмов трансформации энергии электронного возбуждения в них открывают большие перспективы для современного материаловедения, физики наноразмерных и молекулярных структур, гетерогенного катализа, фотоактивированных реакций. Результаты таких исследований важны и для моделирования фотобиологических процессов. Процессы релаксации и трансформации энергии электронного возбуждения в молекулярных системах на основе молекул красителей играют главенствующую роль в функционировании природных и искусственных светособирающих антенн.

Весьма универсальная проблема — перенос энергии электронного возбуждения, лежащий в основе этих процессов, поскольку он является промежуточным между актом возбуждения электронов и теми конечными процессами, в которых энергия возбужденных электронов используется [1, 2].

В последнее время проблема протекания межмолекулярного безызлучательного переноса энергии приобрела особенную актуальность в связи с перспективностью применения данного процесса в фотовольтаических ячейках, сенсibilизированных органическими красителями. В нескольких работах было показано, что использование индуктивно-резонансного переноса энергии позволяет увеличить характеристики ячейки до 45 % [3, 4].

В настоящей статье приведены результаты исследования переноса энергии электронного возбуждения между молекулами органических красителей кумариновой и ксантеновой групп. Выбор указанных красителей обусловлен тем, что класс кумариновых и ксантеновых красителей широко применяется для получения активных сред в лазерах и солнечных ячейках в качестве сенсibilизаторов.

### *Экспериментальная часть*

В качестве донора энергии электронного возбуждения был выбран кумарин 7, а в качестве акцептора — новый краситель ксантеновой группы — миристинат родамина 6 Ж (родамин).

Химические структуры исследуемых соединений приведены на рисунке 1.

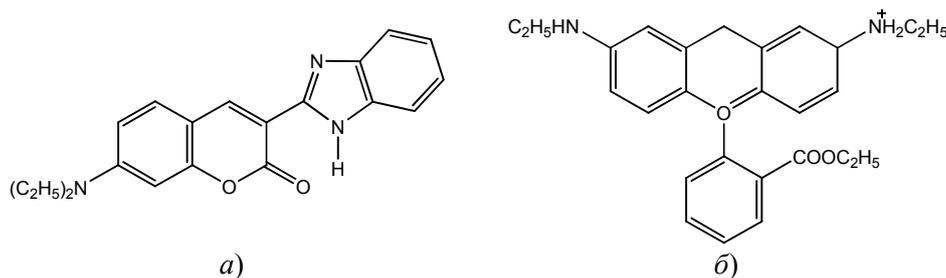


Рисунок 1. Структурные формулы кумарина 7 (а) и метиленового роданина 6 Ж (б)

Красители были синтезированы в Научном центре «НИОПИК» (Москва, Россия) и использованы без дополнительной очистки. В качестве растворителя выбран этанол, очищенный перегонкой.

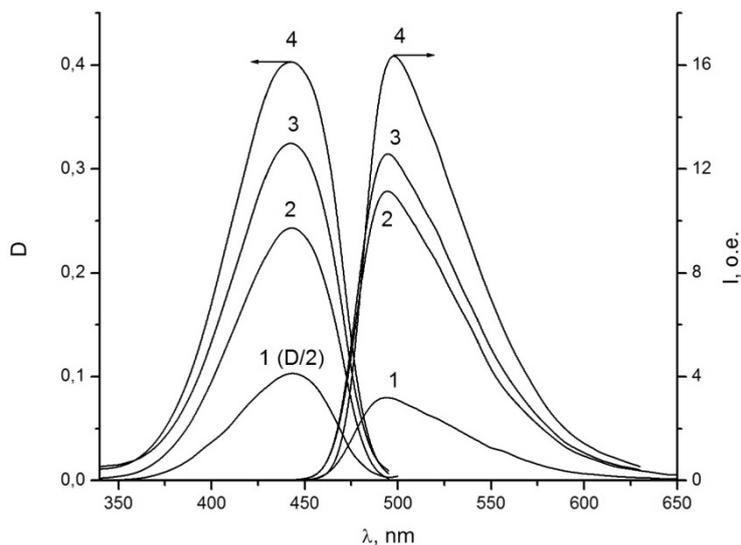
Были приготовлены растворы молекул в этаноле с концентрацией от  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Спектры поглощения и флуоресценции растворов красителей измерялись на спектрометре СМ2203.

#### Результаты и их обсуждение

Известно, что форма и положение полос поглощения и флуоресценции красителей существенным образом зависят не только от особенностей строения его молекул, но и от условий микроокружения, в которых находятся эти молекулы [5, 6].

С целью определения оптимальных условий для осуществления переноса энергии электронного возбуждения были исследованы спектрально-люминесцентные свойства красителей в растворах различной концентрации.

На рисунке 2 приведены спектры поглощения и флуоресценции кумарина 7 в этаноле. Возбуждение флуоресценции производилось на длине волны 420 нм. Регистрация спектров возбуждения осуществлялась на двух длинах волн — 495 и 550 нм.



(Этанол,  $\lambda_{\text{воб}} = 420$  нм); 1, 1' —  $10^{-6}$ ; 2, 2' —  $5 \cdot 10^{-6}$ ; 3, 3' —  $10^{-5}$ ; 4, 4' —  $5 \cdot 10^{-5}$  моль/л

Рисунок 2. Спектры поглощения (1–4) и флуоресценции (1'–4') кумарина 7 в растворе

Как видно из рисунка, максимум полосы поглощения при  $C = 10^{-6}$  моль/л приходится на 445 нм. С увеличением концентрации молекул красителя заметных сдвигов максимума спектров поглощения не происходит. Однако наблюдается уширение полос поглощения. Максимум спектра флуоресценции раствора с минимальной концентрацией красителя приходится на 491 нм. С ростом концентрации молекул люминофора происходит сдвиг полос флуоресценции в длинноволновую область, при-

мерно на 10 нм. Наилучшей излучательной способностью обладает раствор с концентрацией молекул кумарина 7  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Однако, как показали данные спектров возбуждения флуоресценции, при данной концентрации в спектре наблюдается появление второй полосы с максимумом около 472 нм (рис. 3), тогда как для остальных растворов спектры возбуждения полностью совпадают со спектрами поглощения. Данная полоса возбуждения может быть приписана молекулярным агрегатам [7]. Спектральные характеристики растворов кумарина 7 приведены в таблице 1.

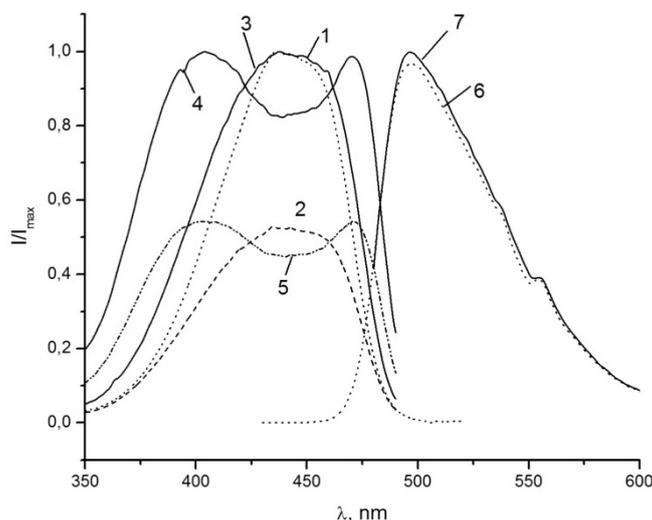


Рисунок 3. Нормированные спектры поглощения (1) и возбуждения флуоресценции (3, 4 —  $\lambda_{\text{рег}} = 495$  нм; 2, 5 —  $\lambda_{\text{рег}} = 550$  нм) и флуоресценции (6 —  $\lambda_{\text{в}} = 420$  нм; 7 —  $\lambda_{\text{в}} = 475$  нм) раствора кумарина 7 при концентрациях  $10^{-5}$  моль/л (кривые 2, 3) и  $5 \cdot 10^{-5}$  моль/л (кривые 1, 4–7)

Т а б л и ц а 1

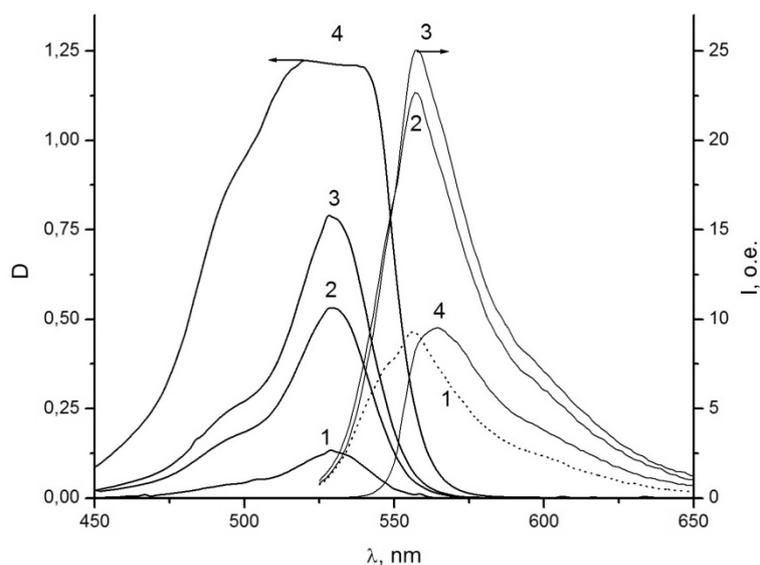
**Спектральные характеристики растворов кумарина 7**

Концентрация красителя, моль/л	$\lambda_{\text{abs}}$ , нм	$\lambda_{1/2\text{abs}}$ , нм	$\lambda_{\text{фл}}$ , нм $\lambda_{\text{в}} = 420$	$\lambda_{\text{фл}}$ , нм $\lambda_{\text{в}} = 460$	$\lambda_{1/2\text{ф}}$ , нм
$10^{-6}$	444	62	493		65
$5 \cdot 10^{-6}$	444	65	495	495	65
$10^{-5}$	445	65	497	495	65
$5 \cdot 10^{-5}$	440–453	67	500	497	61

На рисунке 4 представлены спектры поглощения и флуоресценции растворов миристината родамина 6 Ж.

Максимум полосы поглощения раствора с концентрацией молекул красителя, равной  $10^{-6}$  моль/л, расположен при 530 нм. Рост числа молекул люминофора в растворе не приводит к заметному уширению или сдвигу спектров поглощения, вплоть до концентрации  $5 \cdot 10^{-5}$  моль/л. При указанной концентрации наблюдается широкая полоса с максимумом около 520–540 нм, полуширина которой почти вдвое выше, чем у остальных спектров поглощения. Спектральные характеристики растворов красителя представлены в таблице 2.

Фотовозбуждение образцов осуществлялось двумя длинами волн — 515 и 490 нм. В полученных спектрах флуоресценции (рис. 4) проявляются отчетливые полосы с максимумом при 556 нм. При увеличении числа молекул красителя происходит батохромный сдвиг максимума интенсивности спектра флуоресценции до  $\lambda_{\text{макс}} = 564$  нм для  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л. При возбуждении растворов в коротковолновой полосе поглощения значительных изменений формы и положения полос флуоресценции зарегистрировано не было.



$I, I' — 10^{-6}$ ;  $2, 2' — 5 \cdot 10^{-6}$ ;  $3, 3' — 10^{-5}$ ;  $4, 4' — 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л

Рисунок 4. Спектры поглощения (1–4) и флуоресценции (1'–4',  $\lambda_{\text{в}} = 515$  нм) растворов миристината родамина 6 Ж

Т а б л и ц а 2

#### Спектральные характеристики растворов миристината родамина 6 Ж

Концентрация красителя, моль/л	$\lambda_{\text{abs}}$ , нм	$\lambda_{\text{abs}}$ , плечо, нм	$\lambda_{1/2\text{abs}}$ , нм	$\lambda_{\text{фл}}$ , нм $\lambda_{\text{в}} = 515$		$\lambda_{\text{фл}}$ , нм $\lambda_{\text{в}} = 490$		$\lambda_{1/2\text{ф}}$ , нм
$10^{-6}$	530	500–505	32	556	600	556	600	36
$5 \cdot 10^{-6}$	530	500–505	32	558	600	557	600	35
$10^{-5}$	530	500–505	33	558	600	557	600	34
$5 \cdot 10^{-5}$	520–540	495–500	66	564	600	567	600	38

Максимальной интенсивностью флуоресценции обладает раствор с концентрацией молекул красителя, равной  $10^{-5}$  моль/л при  $\lambda_{\text{в}} = 515$  нм. Тушение интенсивности флуоресценции с увеличением числа молекул в растворе объясняется тем, что энергия возбуждения захватывается нелюминесцирующими агрегатами молекул красителя [7], наличие которых подтверждается тем, что спектр поглощения раствора с концентрацией родамина  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л сильно уширен и гипсохромно сдвинут относительно полос поглощения раствора с  $C = 10^{-6}$  моль/л.

Используя полученные данные о влиянии концентрации молекул красителей в растворах на их спектрально-люминесцентные свойства, было проведено исследование безызлучательного процесса переноса энергии электронного возбуждения в растворе.

Концентрация молекул донора оставалась постоянной и составляла  $10^{-5}$  моль/л. Концентрация молекул акцептора варьировалась от  $10^{-7}$  до  $10^{-5}$  моль/л. Содержание молекул кумарина 7 во всех растворах контролировалось по оптической плотности в максимуме полосы поглощения и было одинаковым. Фотовозбуждение образцов проводилось в полосе поглощения донора на длине волны, равной 420 нм.

Известно, что условием эффективной передачи энергии электронного возбуждения служит [8]: а) наличие перекрытия спектров поглощения акцептора и спектра флуоресценции донора энергии; б) высокие значения квантового выхода флуоресценции донора и коэффициента экстинкции акцептора; в) небольшое значение интеграла перекрытия между собственными спектрами поглощения и флуоресценции донора и акцептора для обеспечения дезактивации энергии по излучательному каналу.

На рисунке 5 представлены нормированные спектры поглощения и флуоресценции донора и акцептора электронной энергии. Из рисунка видно, что максимумы спектров флуоресценции кумарина 7 и миристината родамина 6 Ж расположены на расстоянии 60 нм, что позволяет идентифицировать их отдельно. Условие наличия перекрытия спектров флуоресценции донора и поглощения акцептора

также соблюдается. Относительный квантовый выход флуоресценции донора равен 0,7, а коэффициент экстинкции акцептора —  $8 \cdot 10^4$  моль<sup>-1</sup> л см<sup>-1</sup>.

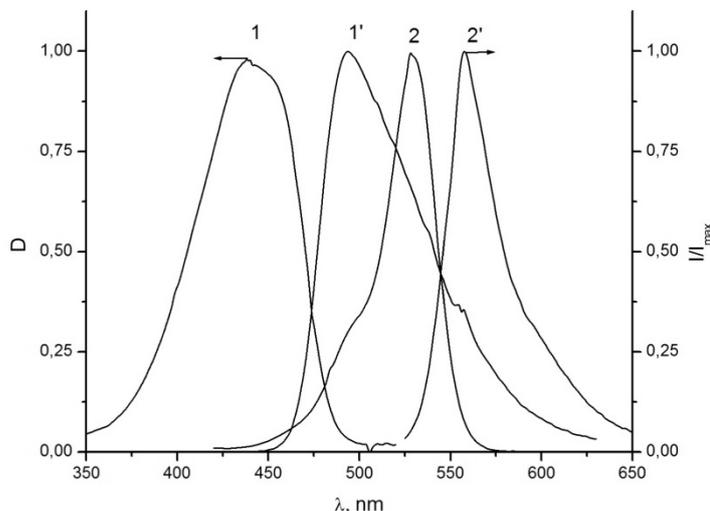


Рисунок 5. Нормированные спектры поглощения (1, 2) и флуоресценции (1', 2') растворов донора (1, 1') и акцептора (2, 2'),  $C = 10^{-5}$  моль/л

Зависимость интенсивности свечения в максимуме спектра флуоресценции донора и акцептора в зависимости от концентрации молекул миристината родамина 6 Ж представлены на рисунке 6.

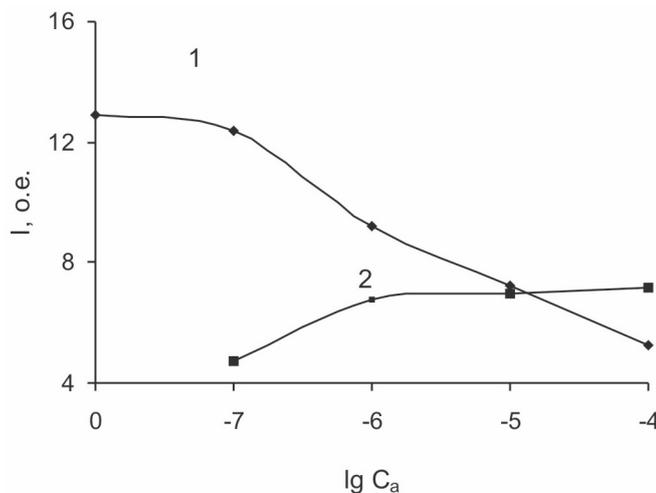
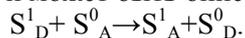


Рисунок 6. Зависимость интенсивности флуоресценции донора (1) и акцептора (2) в зависимости от концентрации последнего

Из рисунка видно, что с увеличением концентрации молекул акцептора в растворе интенсивность флуоресценции молекул донора тушится. В длинноволновой части спектра наблюдается возникновение флуоресценции, спектрально совпадающей с полосой флуоресценции акцептора. Поскольку при возбуждении молекул акцептора длиной волны 390 нм заметной флуоресценции зарегистрировано не было, появление указанной выше длинноволновой полосы свечения следует отнести к сенсibilизованной флуоресценции молекул акцептора. Сенсibilизованная флуоресценция является результатом переноса энергии электронного возбуждения от молекул кумарина к молекулами родаминового красителя. Так как спектры флуоресценции донора и акцептора имеют значительное перекрытие, а расстояние между молекулами в растворе не способствует перекрыванию электронных оболочек молекул (обменно-резонансные взаимодействия), то перенос энергии осуществляется по индуктивно-резонансному механизму и может быть описан схемой [1]



Эффективность переноса энергии электронного возбуждения может быть охарактеризована критическим расстоянием  $R_0$  — расстоянием между молекулами донора и акцептора, на котором вероятность переноса равна вероятности спонтанной дезактивации. Это расстояние можно вычислить по формуле Ферстера [1]:

$$R_0^6 = \frac{9000 \ln 10 \Phi^2 q_{0D}}{128 \pi^5 n^4 N} \int I_D^H(\nu) \varepsilon_A(\nu) \nu^{-4} d\nu,$$

где  $\Phi$  — ориентационный фактор;  $q_{0D}$  — квантовый выход возбужденного состояния донора в отсутствие тушителя;  $n$  — показатель преломления среды на частоте переноса энергии;  $I_D^H(\nu)$  и  $\varepsilon_A(\nu)$  — нормированные спектр излучения донора и поглощения акцептора соответственно,  $N$  — число Авогадро. Вторая часть выражения представляет собой интеграл перекрытия.

На основании данного выражения были определены интегралы перекрытия спектров поглощения и флуоресценции донора и акцептора, а также флуоресценции донора и флуоресценции акцептора (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Рассчитанные значения интегралов перекрытия и  $R_0$ 

Раствор	Интеграл перекрытия, $M^{-1} \text{ см}^3$	$R_0$ , Å	$C_0$ , моль/л
Донор	$5,8 \cdot 10^{-12}$	94,2	4
Акцептор	$7,4 \cdot 10^{-14}$	48	8
Донор+акцептор	$2,4 \cdot 10^{-13}$	55,3	7

На основании рассчитанных значений критического радиуса переноса энергии можно оценить значение критической концентрации, при которой вероятность переноса энергии равна 50%, по следующей формуле [9]:

$$C_0 = \frac{3}{4\pi} \left( \frac{1}{NR_0^3} \right).$$

Рассчитанные значения критических концентраций представлены в таблице 3.

Из рассчитанных данных видно, что в исследуемых растворах концентрация донорных и акцепторных молекул меньше рассчитанных критических значений. А это значит, что большая часть энергии возбуждения, поглощаемая молекулой донора, будет трансформироваться в излучение или безызлучательно передаваться молекуле акцептора.

#### Заключение

Таким образом, в данной работе проведено исследование спектрально-люминесцентных свойств молекул органических красителей и подобраны условия для осуществления переноса энергии электронного возбуждения между молекулами кумаринового и ксантенового красителей. Показано, что безызлучательный процесс переноса энергии осуществляется по индуктивно-резонансному механизму. Рассчитаны интегралы перекрытия и критические радиусы переноса энергии. Выяснено, что экспериментальные условия являются оптимальными для переноса энергии от молекул донора к молекулам акцептора. Полученные данные могут быть использованы для увеличения сбора световой энергии и улучшения преобразования солнечной энергии в электрическую фотовольтаическими ячейками, сенсублизованными органическими красителями.

*Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № 1197/ГФ).*

#### Список литературы

- 1 Ермолаев В.Л., Бодунов Е.Н., Свешникова Е.В., Шахвердов Т.А. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. — Л.: Наука, 1977. — 311 с.
- 2 Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. — М.: Наука, 1978. — 384 с.

- 3 Bailey Sh.T., Lokey G.E., Hanes M.S. et al. Optimized excitation energy transfer in a three-dye luminescent solar concentrator // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2007. — Vol. 91. — P. 67–75.
- 4 Guo M., Diao P., Ren Y.-J., Meng F. et al. Photoelectrochemical studies of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> co-sensitized by novel cyanine dyes // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2005. — Vol. 88. — P. 23–35.
- 5 Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей. — Л.: Наука, 1967. — 616 с.
- 6 Бахшиев Л.Н. Спектроскопия межмолекулярных взаимодействий. — М.: Наука, 1979. — 343 с.
- 7 Южаков В.И. Агрегация молекул красителей и ее влияние на спектрально-люминесцентные свойства красителей // *Успехи химии*. — 1992. — Т. 61. — С. 1114–1141.
- 8 Паркер С. Фотолуминесценция растворов. — М.: Мир, 1972. — 510 с.
- 9 Jankowski D., Bojarski P., Kwieket P. et al. Donor-acceptor nonradiative energy transfer mediated by surface plasmons on ultrathin metallic films // *Chemical Physics*. — 2010. — Vol. 373. — P. 238–242.

Е.В.Селиверстова, Н.Х.Ыбыраев, Г.С.Сейсенбаева

## Миристинат родамин 6 Ж және кумарин 7 молекуласы арасындағы индуктивті-резонанстық энергия алмасулары

Кумарин 7 молекуласынан миристинат родамин 6 Ж молекуласына дейін электронды қозудың энергия алмасулары зерттелді. Сәуле шығармайтын үдерістің энергия алмасуы индуктивті-резонанстық механизм бойынша орындалатыны көрсетілген. Энергия алмасуының критикалық радиусы және бөгеу интегралы есептелді. Донор молекуласынан акцептор молекуласына энергия алмастыру үшін эксперименталды шарттар оңтайлы болып табылатыны анықталды. Алынған нәтижелер сенсibiliзденген органикалық бояғыш пен күн энергиясын электрлікке түрлендірілген фотовольтаикалық ұяшықтармен жинау және жарық энергиясының жиынтығын ұлғайту үшін қолданылуы мүмкін.

Ye.V.Seliverstova, N.Kh.Ibrayev, G.S.Seysenbayeva

## Inductive-resonant energy transfer between molecules of Coumarine 7 and Myristate Rhodamine 6 G

Electron excitation energy transfer between molecules Coumarine 7 and Myristate Rhodamine 6 G is studied. It is shown, that nonradiative energy transfer occur via inductive-resonance mechanism. The overlap integrals and the critical radius of energy transfer are calculated. It was found that the experimental conditions are optimal for the transfer of energy from donor molecules to acceptor molecules. The obtained data can be used to increase the collection of light energy and improve the conversion of solar energy into electrical energy by photovoltaic cells sensitized with organic dyes.

### References

- 1 Ermolayev V.L., Bodunov E.N., Svshnikova E.B., Shakhveredov T.A. *Nonradiative electron excitation energy transfer*, Leningrad: Nauka, 1977, 311 p.
- 2 Agranovich V.M., Galanin M.D. *Electron excitation energy transfer in condensed matters*, Moscow: Nauka, 1978, 384 p.
- 3 Bailey Sh.T., Lokey G.E., Hanes M.S. et al. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, vol. 91, p. 67–75.
- 4 Guo M., Diao P., Ren Y.-J., Meng F. et al. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, vol. 88, p. 23–35.
- 5 Terenin A.N. *Photonics of dye molecules*, Leningrad: Nauka, 1967, 616 p.
- 6 Bakhshiyev L.N. *Spectroscopy of intermolecular interactions*, Moscow: Nauka, 1979, 343 p.
- 7 Yuzhakov V.I. *Uspekhi Khimii* [Russian Chemical Rev.], 1992, vol. 61, p. 1114–1141.
- 8 Parker S. *Photoluminescence of solutions*, Moscow: Mir, 1972, 510 p.
- 9 Jankowski D., Bojarski P., Kwieket P. et al. *Chemical Physics*, 2010, vol. 373, p. 238–242.

М.Д.Старостенков<sup>1</sup>, О.В.Обидина<sup>2</sup>, П.В.Захаров<sup>1</sup>, А.В.Маркидонов<sup>3</sup>,  
И.А.Дёмина<sup>4</sup>, Г.В.Попова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова, Барнаул, Россия;

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь;

<sup>3</sup>Новокузнецкий филиал Томского университета, Россия;

<sup>4</sup>Восточно-Казахстанский государственный университет им. С.Аманжолова,  
Усть-Каменогорск (E-mail: irdyomina@mail.ru)

## Кооперативные смещения комплексов атомов на границе раздела биметаллов Ni-Al, Ni-Fe и Pt-Al

В статье с помощью метода молекулярной динамики исследовано кооперативное смещение комплексов атомов, происходящих по областям, имеющим свободный объём (границы раздела фаз и зерен). В качестве объектов исследования были выбраны биметаллы с различными эффективными размерами атомов и массами компонент. Было показано, что скорость кооперативных смещений зависит от концентрации носителей свободного объема, их расположения по отношению к дислокациям несоответствия, отношения эффективных размеров атомов и эффективных масс компонент.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование; точечные дефекты; дислокации; межузельные атомы; смещение атомов; эффективный размер атомов, межзеренные границы.

### Введение

Многие физические свойства твёрдого тела зависят от числа и строения межзеренных границ, поэтому исследования процессов, происходящих на границе зерен, обусловлены необходимостью объяснить и по возможности влиять на те или иные физико-механические свойства металлов и сплавов. В связи с открытием таких явлений, как эффект «малых доз» [1] и эффект дальнего действия [2] актуальными становятся исследования механизмов переноса дефектов внутри кристалла.

Единая теория, объясняющая эффект дальнего действия, в настоящее время отсутствует. Как правило, модели и механизмы, объясняющие природу эффекта дальнего действия, базируются на предположении о непосредственном переносе тех или иных дефектов, генерируемых в поверхностном слое в более глубокие слои материала.

Ряд авторов, объясняя эффекты дальнего действия, обращают внимание на генерацию упругих или акустических волн при различных видах энергетического воздействия на материал [3–10]. Волны атомных смещений возникают в процессе релаксации кристаллических структур, содержащих точечные дефекты. В [5, 6] показано, что они являются инициаторами высокоскоростных кооперативных атомных смещений, приводящих к аннигиляции точечных дефектов.

Авторы ряда работ предполагают наличие кооперативной природы эффекта дальнего действия [11, 12] и развитие самоорганизационных процессов в кристалле, приводящее к изменению дислокационной структуры и формированию нанокластеров в материале [13, 14].

Для изучения кооперативных явлений в твёрдом теле широко используется метод компьютерного моделирования, позволяющий проследить развитие явлений, протекающих с высокой скоростью, что практически невозможно сделать в реальном эксперименте. В данной работе использовался метод молекулярной динамики, основанный на решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения Ньютона для системы атомов. Метод молекулярной динамики, по сравнению с другими методами компьютерного моделирования, обладает несколькими важными преимуществами. Он позволяет решать задачи, касающиеся проблем структурно-энергетических трансформаций как в кристаллических, так и в некристаллических материалах, деформации и аморфизации атомных систем в условиях температурно-силовых воздействий.

В данной работе компьютерный эксперимент выполнялся в двумерном приближении. Простые двумерные модели с использованием метода молекулярной динамики позволяют изучить основные закономерности протекания релаксационных процессов в единичном слое атомов. Для исследования выбиралась наиболее плотноупакованная плоскость кристаллической структуры. Такая двумерная

структура является наиболее стабильной, и миграция атомов происходит преимущественно в плотноупакованных слоях. Двумерные модели хорошо себя зарекомендовали при исследовании самодиффузии в металлах и механизмов диффузии по границам зерен [15], стабильности межфазных границ в композиционных материалах [16], бездиффузионного механизма массопереноса [5, 6] и многих других задач. Преимуществами двумерных моделей являются наглядность, относительно высокая скорость счёта, относительно большой объём исследуемой структуры и возможность более детального исследования механизмов структурных превращений по сравнению с трехмерными моделями.

#### *Метод компьютерного моделирования*

В данной работе проводился компьютерный эксперимент по методу молекулярной динамики с использованием программы [17] и рассматривался механизм поведения атомов вблизи границы раздела биметаллов Ni-Al, Ni-Fe и Pt-Al при внедрении атомов в межузельное пространство компоненты биметалла или образовании вакансий на границе раздела.

Начальная конфигурация расчетной ячейки создавалась в соответствии с [18]. Граница в биметалле проходила через середину ячейки, которая представляла собой плоскость (111). Для расчетной ячейки вдоль оси  $x$  (направление  $\langle 110 \rangle$ ) задавались периодические граничные условия, а вдоль оси  $y$  (направление  $\langle 112 \rangle$ ) — свободные. Число атомов в расчетной ячейке варьировалось от 3240 до 8000, в зависимости от условий эксперимента. Начальная температура ячейки составляла 0 К.

Граница раздела расчетной ячейки подвергалась процедуре релаксации, в результате которой граничные атомы занимали равновесные положения. В течение процесса релаксации наблюдалось увеличение температуры ячейки до нескольких градусов Кельвина. Время релаксации расчетной ячейки составляло 100 пс, а охлаждения — 10 пс. После релаксации из-за различия постоянных решеток в ячейке формировалась граница с характерными вершинными дислокациями несоответствия, которые приведены на рисунке 1.

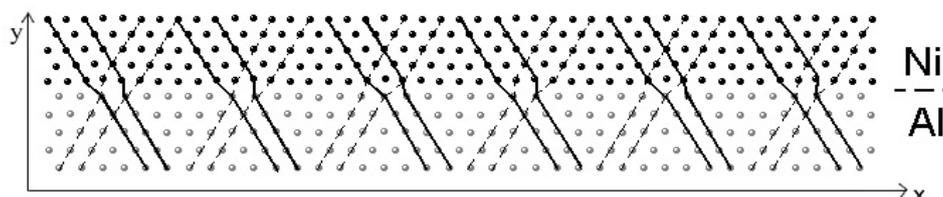


Рисунок 1. Граница раздела биметалла Ni-Al с выделенными дислокациями несоответствия

Более наглядно показать вершинные дислокации несоответствия позволяет визуализатор плотноупакованных атомных рядов. Он представляет собой линии, которые соединяют атомы в одном или нескольких плотноупакованных направлениях. Визуализатор атомных смещений является наиболее оптимальным при демонстрации механизма коллективных атомных смещений. Например, при внедрении атома вблизи границы биметалла происходят направленные атомные смещения в сторону ближайшей вершинной дислокации несоответствия [19]. В рамках проводимых исследований комплексы атомов различной конфигурации внедрялись в межузельное пространство решетки на различных расстояниях от границы биметалла. При этом количество атомов в комплексе варьировалось от 1 до 7. После внедрения комплекса межузельных атомов осуществлялась релаксация ячейки до момента вытеснения атомов комплекса в соседний металл. В процессе релаксации происходил импульсный разогрев ячейки, температура которого зависела от количества внедряемых межузельных атомов.

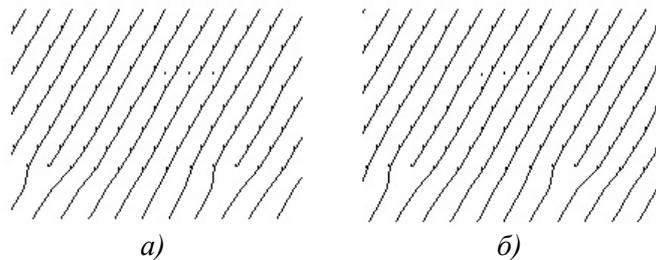
Известно, что после запуска программы атомы начинают смещаться спустя некоторое время, которое тратится на процесс первоначальной активации эстафетных атомных смещений. В ходе исследований определялась скорость кооперативных смещений без учета времени на активацию процесса.

#### *Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение*

В [19] было установлено, что внедрение атомов в межузельное пространство никеля биметалла Ni-Al приводит к направленному смещению атомов вдоль направления плотной упаковки до пересечения плотноупакованного ряда с границей раздела металлов и вытеснению атома из крайнего ряда

в кристаллическую решетку соседнего металла, при этом смещение атомов происходит в сторону ближайшей дислокации несоответствия. В результате подобного рода эстафетных атомных смещений происходит переползание дислокации на одно межатомное расстояние в глубь решетки Al. Скорость эстафетных атомных смещений зависит от места внедрения атома и удаленности от дислокации несоответствия.

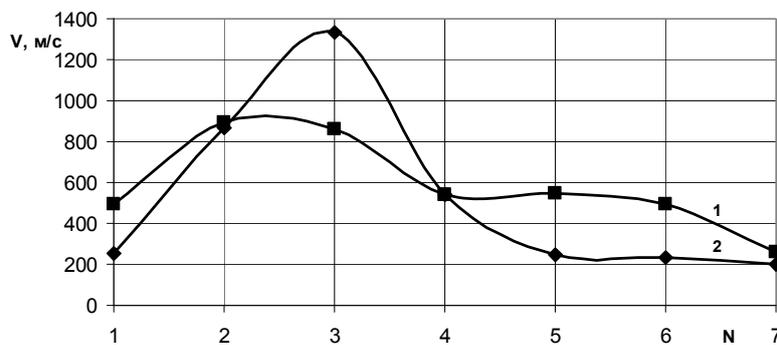
В рамках представленной работы была исследована скорость кооперативных смещений при внедрении комплекса атомов Ni в межузельное пространство никеля вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  на 5-м атомном ряду от границы биметалла Ni-Al. Межузельные атомы Ni внедрялись в плотноупакованные ряды между дислокациями несоответствия (рис. 2 а) и в область дислокации несоответствия (рис. 2 б).



а — межузельные атомы внедрены в ряды между дислокациями несоответствия;  
б — межузельные атомы внедрены вблизи экстраплоскости дислокации несоответствия

Рисунок 2. Внедрение атомов Ni в межузельное пространство никеля биметалла Ni-Al

На рисунке 3 приведены зависимости скорости кооперативных смещений от количества межузельных атомов, внедренных в ряды между дислокациями несоответствия (рис. 2 а) и вблизи экстраплоскости дислокации несоответствия (рис. 2 б). Вид траектории движения комплекса межузельных атомов зависит от количества атомов в комплексе и его расположения по отношению к дислокациям несоответствия. В зависимости от вида траектории различается и время, которое требуется для вытеснения атомов в соседний металл. В случае прямолинейной траектории данный процесс происходит быстрее по сравнению с траекторией, имеющей ломаный характер.



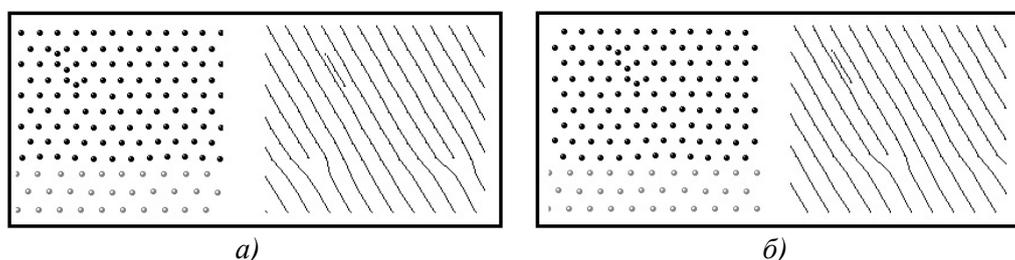
1 — межузельные атомы внедрены в ряды между дислокациями несоответствия (рис. 2 а);  
2 — межузельные атомы внедрены вблизи экстраплоскости дислокации несоответствия (рис. 2 б)

Рисунок 3. Зависимость скорости кооперативных смещений от количества атомов Ni, внедренных в межузельное пространство решетки никеля (комплекс межузельных атомов внедрялся вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  на пяти межатомных расстояниях от границы раздела биметалла)

Как видно из рисунка 3, скорость кооперативных смещений зависит от количества межузельных атомов, образующих комплекс, а также от расположения этого комплекса по отношению к дислокациям несоответствия. При внедрении межузельных атомов вблизи экстраплоскости дислокации несоответствия скорость кооперативных смещений ниже, чем при внедрении их между экстраплоскостями дислокаций несоответствия. Исключением является случай внедрения комплекса, состоящего из

трех межузельных атомов, расположенного вблизи экстраплоскости дислокации несоответствия (рис. 2 б). При данном способе внедрения скорость кооперативных смещений комплекса атомов составляет 1330 м/с и объясняется прямолинейной траекторией смещения атомов.

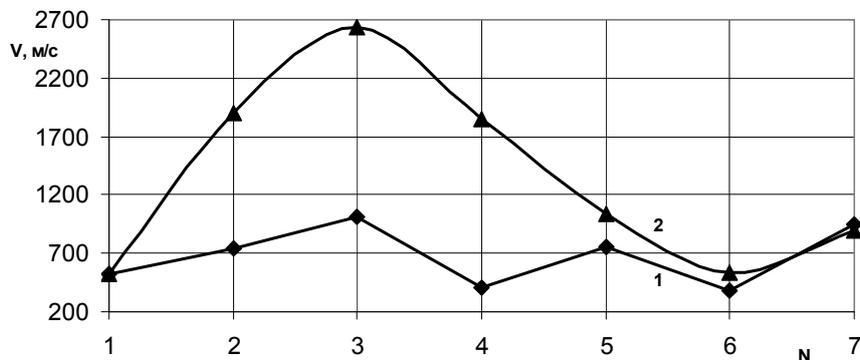
Исследуем скорость кооперативных смещений при внедрении межузельных атомов в плотноупакованный ряд под углом  $120^\circ$  к границе биметалла Ni-Al между экстраплоскостями дислокаций несоответствия (рис. 4 а) и вдоль экстраплоскости дислокации несоответствия (рис. 4 б).



а — межузельные атомы внедрены в плотноупакованный ряд между экстраплоскостями дислокаций несоответствия; б — межузельные атомы внедрены вдоль экстраплоскости дислокации несоответствия

Рисунок 4. Конфигурация ячейки Ni-Al при внедрении комплекса межузельных атомов в плотноупакованный ряд под углом  $120^\circ$

На рисунке 5 изображена зависимость скорости кооперативных смещений от количества межузельных атомов, внедренных в плотноупакованный ряд под углом  $120^\circ$ . Наибольшая скорость кооперативных смещений (2630 м/с) соответствует комплексу, состоящему из трех атомов, расположенных вдоль экстраплоскости дислокации несоответствия под углом  $120^\circ$ . Следует отметить, что данная скорость кооперативных смещений комплекса атомов составляет 55% скорости звука в никеле.



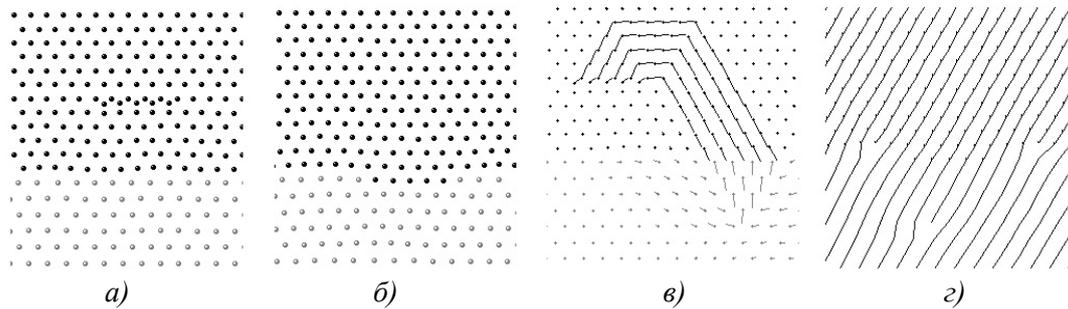
1 — межузельные атомы внедрены в плотноупакованный ряд между экстраплоскостями дислокаций несоответствия (рис. 4 а); 2 — межузельные атомы внедрены вдоль экстраплоскости дислокации несоответствия (рис. 4 б)

Рисунок 5. Зависимость скорости кооперативных смещений от количества атомов Ni, внедренных в межузельное пространство решетки никеля под углом  $120^\circ$  к границе биметалла

Анализируя скорость кооперативных смещений (рис. 3 и 5), можно сделать вывод о ее зависимости от количества внедряемых межузельных атомов и пространственного расположения по отношению к экстраплоскости дислокаций несоответствия.

В результате проведения серии компьютерных экспериментов было установлено, что внедрение комплекса межузельных атомов как вдоль направления  $\langle 110 \rangle$ , так и под углом  $120^\circ$  приводит к эстафетному смещению атомов вдоль направления плотной упаковки до пересечения плотноупакованного ряда с границей металлов и вытеснению атомов из крайнего ряда в кристаллическую решетку соседнего металла. В результате подобного рода эстафетных смещений дислокация несоответствия пе-

реползает в глубь Al. На рисунке 6 представлены кооперативные смещения комплекса, состоящего из 5 межузельных атомов, внедренных на пяти межатомных расстояниях от границы биметалла.



*a* — начальное положение атомов; *б* — результат релаксации границы биметалла; *в* — кооперативные атомные смещения в процессе релаксации ячейки; *г* — визуализация атомных рядов, экстраплоскость дислокации несоответствия смещена на пять межатомных расстояний

Рисунок 6. Внедрение 5 межузельных атомов вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  на пяти межатомных расстояниях от границы биметалла Ni-Al

В результате релаксации ячейки дислокация несоответствия переползла на 5 атомных расстояний в глубь решетки Al. При этом смещение атомов происходит в сторону ближайшей дислокации несоответствия. Таким образом, осуществляется своеобразная аннигиляция дефектов к более выгодному энергетическому состоянию системы.

При внедрении межузельных атомов, отстоящих друг от друга на два межатомных расстояния, также выявлено кооперативное смещение в сторону одной из дислокаций на границе биметалла. Если внедряется свыше 5 атомов, то возможно разделение их на 2 группы и смещение к двум различным дислокациям несоответствия [20]. Такое кооперативное поведение наблюдалось при внедрении межузельных атомов не далее 10 межатомных расстояний от границы биметалла Ni-Al.

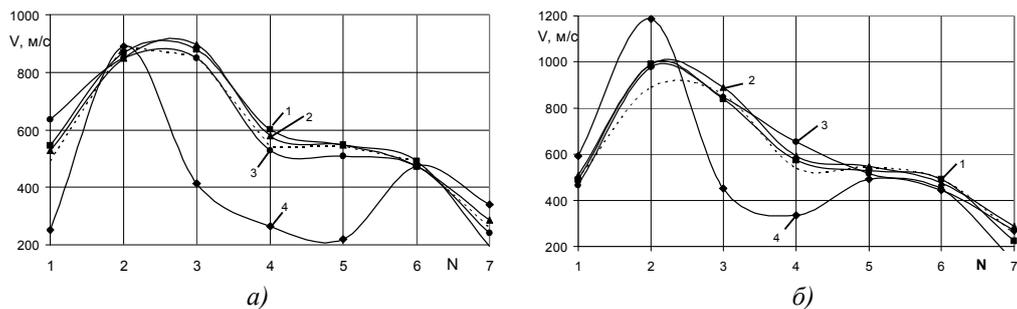
Исследование произвольного расположения комплексов межузельных атомов показало, что в данном случае также наблюдаются эстафетные смещения, но на это затрачивается больше времени. При этом на начальном этапе релаксации структуры смещения атомов могут происходить не только вдоль плотноупакованных направлений. Наблюдаются кольцевые смещения атомов, которые могут быть обусловлены эстафетными смещениями атомов в процессе релаксации ячейки [20].

Следует отметить, что кольцевой механизм перемещения атомов в данном случае реализовывался при более низких температурах по сравнению с бездефектными кристаллами. Для идеального кристалла чистого никеля кольцевые перемещения атомов были обнаружены только при температуре 1700K [21], а в рамках данного компьютерного эксперимента температура ячейки составляла  $\sim 210$ К.

Таким образом, характер атомных смещений зависит от числа межузельных атомов. При этом расстояние, на которое происходит переползание дислокации, соответствует межатомному расстоянию, пропорциональному числу внедренных межузельных атомов.

Исследуем влияние дополнительного свободного объема на процессы, происходящие на границе биметалла Ni-Al. В качестве носителей свободного объема выберем вакансии, которые будут располагаться на границе биметалла. Количество образуемых вакансий варьировалось от 1 до 4. Исследовалась зависимость скорости кооперативных смещений от количества атомов, внедряемых в межузельное пространство никеля на 5-м атомном ряду (согласно рис. 2 *a*) при введении вакансий на границе биметалла. Данные зависимости приведены на рисунке 7.

Анализируя зависимости, приведенные на рисунке 7, можно сделать вывод о том, что не во всех случаях введение дополнительного свободного объема ведет к увеличению скорости кооперативных смещений. Это, прежде всего, связано с тем, что в расчетной ячейке инициируются дополнительные смещения атомов, тем самым время вытеснения атомов в соседний металл увеличивается.



*a* — вакансии образованы со стороны никеля; *б* — вакансии образованы со стороны алюминия

Рисунок 7. Зависимость скорости кооперативных смещений от количества атомов Ni, внедренных в межузельное пространство решетки никеля при наличии вакансий на границе биметалла (номер кривой соответствует количеству образованных вакансий; штриховой кривой соответствует скорость кооперативных смещений в отсутствие вакансий)

Исследуем процессы, происходящие на границе биметалла Ni-Fe, у которого различие эффективных атомных радиусов Ni и Fe меньше, чем у биметалла Ni-Al. На рисунке 8 приведена граница биметалла Ni-Fe, показанная через визуализатор плотноупакованных рядов, с характерными вершинными дислокациями несоответствия, которых в 2 раза меньше по сравнению с биметаллом Ni-Al.

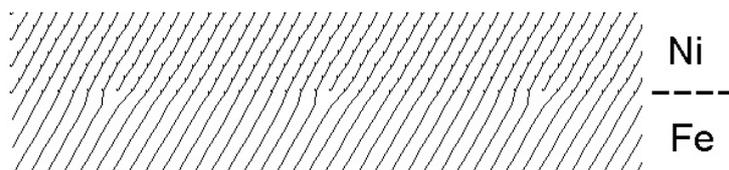
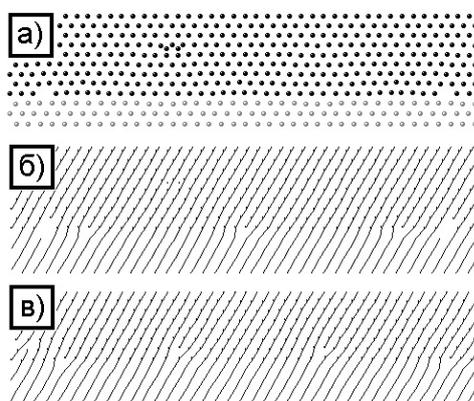


Рисунок 8. Граница биметалла Ni-Fe, показанная через визуализатор плотноупакованных рядов

Атомы Ni внедрялись в межузельное пространство никеля вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  на 5-м атомном ряду от границы раздела биметалла Ni-Fe. Количество атомов варьировалось от 1 до 7. Время релаксации составляло 50 пс, а начальная температура ячейки — 0К.

После релаксации вытеснения атомов из крайнего ряда в соседний металл не происходило, даже при нагреве расчетной ячейки. В зависимости от траектории движения межузельных атомов наблюдалось образование дислокационной петли либо на границе раздела биметалла, либо в решетке никеля.

При введении дополнительного свободного объема, т.е. вакансий на границе раздела биметалла, наблюдалось переползание дислокаций несоответствия в глубь решетки никеля. На рисунке 9 приведена начальная конфигурация ячейки (рис. 9 *a* и *б*) и после релаксации (рис. 9 *в*), показанная через визуализатор плотноупакованных рядов.

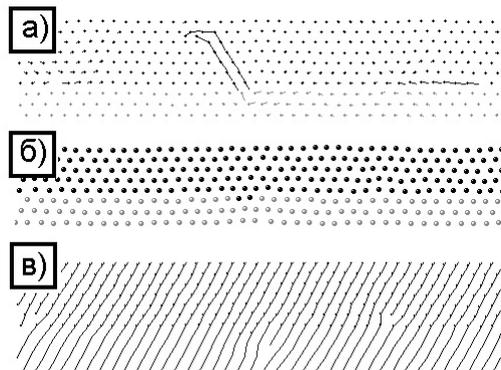


*a* — расчетная ячейка с двумя межузельными атомами Ni и двумя вакансиями на границе раздела биметалла;  
*б* — расчетная ячейка, показанная через визуализатор плотноупакованных рядов;  
*в* — ячейка после релаксации в течение 50 пс

Рисунок 9. Ячейка биметалла Ni-Fe при внедрении двух атомов Ni в межузельное пространство решетки никеля

При нагреве ячейки с вакансиями на границе раздела биметалла до 300К в отдельных случаях становится возможным вытеснение атомов в соседний металл и переползание дислокации несоответствия в глубь Fe. На рисунке 10 приведен пример релаксационного процесса расчетной ячейки, конфигурация которой изображена на рисунке 9 *a*, при нагреве ее до 300К.

Таким образом, введение дополнительного свободного объема и нагрев ячейки до 300 К обеспечивают возможность вытеснения атомов Ni в соседний металл и переползание дислокации несоответствия в глубь Fe. Однако данный процесс происходит гораздо медленнее, чем в биметалле Ni-Al. Это обусловлено различием эффективных атомных радиусов компонентов, входящих в биметалл, отношение которых определяет плотность распределения дислокаций несоответствия на границе биметалла.



*a* — смещения в процессе релаксации ячейки; *б* — результат релаксации ячейки;  
*в* — визуализация атомных рядов

Рисунок 10. Конфигурация ячейки биметалла Ni-Fe при нагреве ее до 300К после релаксации в течение 50 пс

Рассмотрим процессы, происходящие на границе биметалла, у которого массы атомов компонентов существенно различны, на примере биметалла Pt-Al. На рисунке 11 приведена конфигурация ячейки Pt-Al, показанная с помощью визуализатора плотноупакованных рядов. Начальная температура расчетной ячейки составляла 0К.

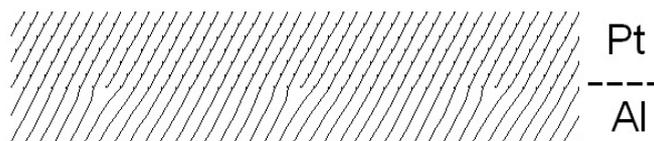
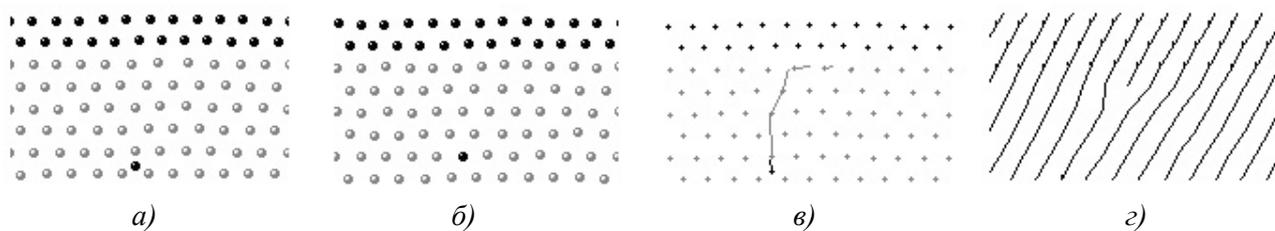


Рисунок 11. Граница раздела биметалла Pt-Al, показанная с помощью визуализатора плотноупакованных рядов

Один атом Pt или Al внедрялся в межузельное пространство платины на 5 атомном ряду от границы раздела биметалла. После релаксации ячейки в течение 50 пс наблюдалось появление ступеньки на границе раздела, при этом дислокация несоответствия переползала в глубь Al. При увеличении количества внедряемых атомов, в процессе релаксации, помимо образования ступеньки и точечных дефектов замещения на границе раздела биметалла, наблюдается образование вакансий в решетке платины.

При внедрении атома Al в межузельное пространство алюминия на 5-м атомном ряду от границы раздела биметалла в результате релаксации ячейки происходит смещение атомов к границе биметалла, при этом дислокация несоответствия переползает в глубь Al.

На рисунке 12 приведен результат релаксации границы биметалла при внедрении атома Pt в межузельное пространство Al. Внедренный атом инициирует смещение атомов Al к границе биметалла к ближайшей дислокации несоответствия, которая при этом переползает на одно межатомное расстояние в глубь Al.



*a* — начальное положение атомов; *б* — результаты релаксации границы биметалла; *в* — атомные смещения в процессе релаксации ячейки; *г* — визуализация атомных рядов

Рисунок 12. Релаксация расчетной ячейки Pt-Al при внедрении атома Pt в межузельное пространство Al на 5-м атомном ряду

Следует отметить, что на развитие и скорость кооперативных смещений влияет соотношение эффективных масс и эффективных размеров атомов. В таблице приведены данные соотношения для рассматриваемых биметаллов Ni-Al, Ni-Fe и Pt-Al [22].

Т а б л и ц а

**Физические характеристики биметаллов**

Тип биметалла	Отношение эффективных размеров атомов	Отношение эффективных масс компонент
Ni-Al	0,87	2,2
Ni-Fe	0,90	1,05
Pt-Al	0,97	7,23

Отношение эффективных размеров атомов тяжелой решетки к эффективному размеру атомов легкой решетки определяет плотность распределения вершинных дислокаций несоответствия вдоль границы биметалла. При внедрении атома в одноименную часть компонента биметалла с наибольшей эффективной массой скорость кооперативных смещений больше, чем больше отношение эффективных масс компонент.

*Заключение*

Таким образом, скорость кооперативных смещений зависит от количества межузельных атомов и их расположения по отношению к дислокациям несоответствия, от наличия вакансий на границе раздела биметалла, а также от компонент биметалла, т.е. отношения эффективных размеров атомов и эффективных масс компонент. При этом скорость кооперативных смещений может составлять до 55% скорости звука в материале. При внедрении комплекса атомов расстояние, на которое происходит переползание дислокации, соответствует межатомному расстоянию, пропорциональному числу внедренных межузельных атомов.

References

- 1 Mamontov A.P., Chernov I.P. *Small dose effect of ionizing radiation*, Moscow: Energoatomizdat, 2001, 286 p.
- 2 Didenko A.N., Sharkeev Yu.P., Kozlov E.V. et al. *The effects of long-range interaction in ion-implanted metallic materials*, Tomsk: Publishing House NTL, 2004, 328 p.
- 3 Starostenkov M.D., Kholodova N.B., Kondratenko M.B. et al. *Initiation of relaxation waves of displacement near point defects in fcc metals. I. Displacement wave near single vacancies* // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science), 2008, vol. 5, № 4, p. 117–120.
- 4 Starostenkov M.D., Kholodova N.B., Kondratenko M.B. et al. *Initiation of relaxation waves of displacement near point defects in fcc metals. II. Displacement wave near interstitial atoms* // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science), 2009, vol. 6, № 1, p. 105–107.
- 5 Starostenkov M.D., Markidonov A.V., Tichonova T.A. et al. *High-speed mass transfer in nickel two-dimensional crystal in the presence of dislocation loops with various local density* // Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya (Steel in Translation), 2009, № 6, p. 57–60.
- 6 Starostenkov M.D., Markidonov A.V., Tichonova T.A. et al. *High-speed mass transfer in crystal aluminium containing chains of vacancies and interstitials atoms* // Russian Physics Journal, 2009, vol. 52, № 9–2, p. 139–145.

- 7 Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Markidonov A.V. et al. *Waves generated by recombination of Frenkel pairs in the two-dimensional model metal lattices and their impact on the drift of point defects aggregates* // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science), 2009, vol. 6, № 2, p. 8–13.
- 8 Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Abidzina V.V. *Vacancies aggregations initiated by post-cascade shock waves* // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science), 2012, vol. 9, № 4, p. 548–555.
- 9 Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Tichonova T.A. et al. *Mechanisms of transformation the crowdions aggregates at passage of a longitudinal wave* // Nelineynyiy mir, 2011, vol. 9, № 12, p. 826–835.
- 10 Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Barchuk A.A. et al. *Features of the dynamics crowdions in crystals with the lattice at various power influences* // Khimicheskaja fizika i mezoskopija, 2012, vol. 14, № 1, p. 46–53.
- 11 Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. *Long-range effect and collective processes in metals* // Vestnik NNGU, Ser. Fiz. Tverd. Tela, 2003, vol. 1 (6), p. 173–182.
- 12 Khmelevskaya V.S., Antoshina I.A., Kordo M.N. *Effect of long-range action in materials of different nature* // The Physics of Metals and Metallography, 2007, vol. 103, №6, p. 652–656.
- 13 Tereshko I.V., Abidzina V.V., Elkin I.E. et al. *Formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation* // Surface and Coatings Technology, 2007, vol. 201, p. 8552–8556.
- 14 Tereshko I., Abidzina V., Tereshko A. et al. *Nanostructural evolution of steel and titanium alloys exposed to glow discharge* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B., 2007, vol. 261, p. 678–681.
- 15 Rakitin R.Y., Poletaev G.M., Aksenov M.S. et al. *Investigation of the diffusion mechanism along grain inclination boundary in fcc metals* // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science), 2005, vol. 2, № 2, p. 124–129.
- 16 Starostenkov M.D., Popova G.V., Poletaev G.M. et al. *Temperature ranges of phase-boundary stability in two-dimensional Ni<sub>3</sub>Al-Ni composite* // Izvestiya VUZ. Chernaya Metallurgiya (Steel in Translation), 2006, № 6, p. 24–27.
- 17 Poletaev G.M. *Molecular dynamics simulations of structural and energy transformation in two-dimensional metals and alloys (MD2)*. Certificate № 2008610486 of 25.01.2008.
- 18 Poletaev G.M. *Research of mutual diffusion processes in two-dimensional system Ni-Al: Candidate's Dissertation in Physical and Mathematical Sciences*, Barnaul, 2002, 186 p.
- 19 Starostenkov M.D., Zacharov P.V., Medvedev N.N. *Crowdion interaction with bimetallic Ni-Al boundary in 2D-model composite* // Letters on Materials, 2011, № 4, p. 238–240.
- 20 Zacharov P.V., Starostenkov M.D., Medvedev N.N. et al. *Cooperative behavior of interstitial atoms in the field of misfit dislocation at the interface of bimetallic Ni-Al* // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science), 2012, vol. 9, № 4, p. 431–435.
- 21 Kholodova N.B. *Point defects and their role in the disordering process of 2-dimensional intermetallic Ni<sub>3</sub>Al: Candidate's Dissertation in Physical and Mathematical Sciences*, Barnaul, 2007, 233 p.
- 22 Zacharov P.V. *Cooperative effect under interaction of dynamic and topological solitons with defects in various model crystal lattices based on the fcc structure: Candidate's Dissertation in Physical and Mathematical Sciences*, Barnaul, 2012, 165 p.

М.Д.Старостенков, О.В.Обидина, П.В.Захаров, А.В.Маркидонов,  
И.А.Дёмина, Г.В.Попова

### **Ni-Al, Ni-Fe және Pt-Al биметалдар бөлімі шегіндегі атомдар кешенінің кооперативті жылжуы**

Молекулярлық динамика әдісінің көмегімен бос көлемді аумақтардағы атомдар кешенінің кооперативті жылжуы зерттелді. Зерттеу объектісі ретінде әр түрлі әсерлі өлшемдегі атомдары мен салмақ құрауыштары бар биметалдар таңдалды. Кооперативті жылжу жылдамдығы бос көлемді тасымалдаушының тұнбасына, олардың сәйкессіздік дислокацияға қатысты орналасуына, әсерлі және әсерлі салмақ құрауыштарының қатынасына тәуелді екендігі көрсетілген.

M.D.Starostenkov, O.V.Obidina, P.V.Zakharov, A.V.Markidonov,  
I.A.Dyomina, G.V.Popova

### **Cooperative displacements of atom complexes at the interface of bimetallic Ni-Al, Ni-Fe and Pt-Al**

Cooperative displacement of atom complexes that takes place along areas having free volume (interphase and grain boundaries) was observed using molecular dynamics method. Bimetals with various effective dimensions of atoms and masses of the components were chosen as objects for the investigation. It was shown that the rate of cooperative displacements depends on concentration of free volume carriers, their location against misfit dislocations, the ratio of effective dimensions of atoms and masses of the components.

---

# ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 621.7

К.Кусаиынов, Г.А.Жуандыкова, Б.А.Ахмадиев, Н.Н.Шуюшбаева, Ж.А.Кужуханова

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: nn\_shuish@mail.ru)*

## **Разработка электрогидроимпульсной технологии бурения скважин для установки теплосъемных элементов тепловых насосов**

Целью исследования является разработка научно-практических основ внедрения энергосберегающих теплонасосных технологий для тепло- и хладоснабжения жилых, общественных и производственных помещений на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Одним из эффективных методов получения тепла и грунтовых вод в теплонасосных технологиях является использование скважин для укрепления теплообменных элементов, получаемых путем бурения. Принципиально новым инновационным способом создания скважин является электрогидравлическое бурение. При электрогидравлическом бурении электрическая энергия непосредственно в забое переходит в механическую энергию ударных волн, которые способны разрушать горные породы. В данной работе описаны результаты исследования электрогидроимпульсного воздействия на твердые и сверхтвердые горные минералы.

*Ключевые слова:* теплонасос, теплообменник, скважина, электрогидравлическое бурение.

Одним из энергоэффективных методов является получение тепловой энергии с использованием теплонасосной технологии, которая дает возможность с целью энергосбережения использовать: грунтовую теплоту, подземные воды, водоёмы, природные водные потоки и т.д. [1]. Экологический эффект от использования этой технологии состоит в том, что она позволяет полностью избежать местных выбросов парниковых газов, образующихся при сжигании топлива. Поэтому замена старых котлов, использующих газ или жидкое топливо, на системы, в основе действия которых лежит тепловой насос, ставится приоритетной и актуальной задачей. Ее решение позволит не только сократить потребление ископаемого топлива, но и значительно снизить выбросы в атмосферу диоксида углерода.

Тепловые насосы — это компактные, экономичные и экологически чистые системы отопления, позволяющие получать тепло для горячего водоснабжения и отопления коттеджей за счет использования тепла низкопотенциального источника путем переноса его к теплоносителю с более высокой температурой.

К преимуществам тепловых насосов можно отнести экономичность: для передачи в систему отопления 1 кВт·час тепловой энергии установке необходимо затратить всего 0,2–0,35 кВт·час электроэнергии. Так как преобразование тепловой энергии в электрическую на крупных электростанциях происходит с КПД до 50%, эффективность использования топлива при применении тепловых насосов повышается. Еще одним преимуществом тепловых насосов является возможность переключения с режима отопления зимой на режим кондиционирования летом, просто вместо радиаторов к внешнему коллектору подключаются фен-койлы, или системы «холодный потолок».

Основным теплообменным элементом системы сбора низкопотенциального тепла грунта являются вертикальные грунтовые теплообменники коаксиального типа, которые располагаются снаружи по периметру здания. Эти теплообменники установлены в скважинах глубиной от 32 до 35 м каждая, устроенных вблизи строения [2].

В настоящее время имеется много видов бурильных установок, которые широко используются на территории Казахстана [3, 4].

Широко применяемые ныне механические шнековые технологии бурения скважин более эффективны в условиях мягкого грунта, при отсутствии твердых пород и каменных плит. Бурение на глубину до 25 метров, при диаметре скважины до полуметра, при наличии указанных выше препятствий может быть затруднительным.

Электрогидравлическое бурение является принципиально новым способом и еще не нашло промышленного применения. Задача исследования и практического внедрения данной технологии на сегодняшний день остается актуальной.

Уникальным преимуществом данной новой технологии являются:

- возможность проведения работ в условиях ограниченного пространственного объема (построенные здания, крытые помещения, подвалы и т.п.), что является практически невозможным при использовании традиционных методов бурения вследствие громоздкости оборудования;
- долговременная надежная работа за счет отсутствия трущихся и изнашивающихся частей установки;
- простота в эксплуатации и обслуживании, что обеспечивается применением в качестве активной части широкодоступного кабеля — электрода, — являющегося расходным материалом;
- малое энергопотребление и экологическая чистота проведения работ.

Данная технология по сравнению с традиционными позволяет более эффективно и в краткие сроки разрушать препятствия в виде твердых пород при бурении скважин теплообменников путем воздействия ударными волнами при высоковольтных разрядах в водной среде.

Электрогидравлический эффект представляет собой высоковольтный электрический разряд в жидкой среде. При формировании электрического разряда в жидкости выделение энергии происходит в течение достаточно короткого промежутка времени. Мощный высоковольтный электрический импульс с крутым передним фронтом вызывает различные физические явления, такие как появление сверхвысоких импульсных гидравлических давлений, электромагнитное излучение в широком спектре частот, вплоть до рентгеновского, кавитационные явления [5, 6]. Электрогидроимпульсные явления как физическая основа различных электротехнологий достаточно хорошо изучены [7–10].

Для формирования импульса с коротким передним фронтом напряжения, прикладываемого к разрядному промежутку в жидкости, использовали разрядный промежуток в газе — газовый разрядник, а для формирования определенной энергии импульса — накопительный электрический конденсатор. Нами были разработаны и практически реализованы электрогидравлическая установка и рабочая ячейка для бурения (рис. 1).

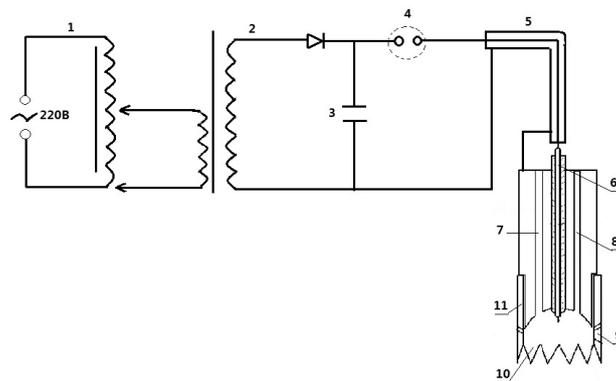


Рисунок 1. Схема электрогидравлической установки и электрогидравлического бора

Установка состоит из источника питания (1), высоковольтного генератора (2), импульсного конденсатора (3), разрядника (4), коаксиального кабеля – электрода (5) и электрогидравлического бора, имеющего в своей конструкции центральный электрод (6), (7) и (8) — каналы для подачи промывочной жидкости, (9) — отверстие в коронке бора для выхода газов, (10) — зубцы коронки, (11) — коронка бора.

Внешний вид электрогидравлического бура показан на фотографии (рис. 2).



Рисунок 2. Внешний вид электрогидравлического бура

Установка работает следующим образом. Импульсный конденсатор (3) заряжается от высоковольтного генератора (2), питаемого из регулируемого источника тока (1). При достижении заданного напряжения происходит пробой разрядника (4), и вся запасенная энергия в конденсаторе через кабель — электрод передается в рабочий промежуток электрогидравлического бура. Происходит импульсный электрический разряд в жидкости, являющийся источником мощных механических ударных волн, которые, отражаясь от коронки бура, сфокусированно воздействуют на обрабатываемую горную породу, тем самым разрушают ее на мелкие куски.

В результате экспериментального исследования определены оптимальные значения времени и количества искровых разрядов при электрогидравлическом бурении камней, определено время, при котором в процессе бурения происходит разрушение камней и твердых горных пород.

Объектами электрогидроимпульсной обработки являлись твердые горные породы в виде природных камней. Природный камень — весьма разнообразный по своей структуре материал, нередко сложенный из различных минералов, часто в процессе образования и последующего залегания в земной коре подвергающийся значительным напряжениям [11]. В эксперименте были использованы природные камни, твердость которых составляет 5–6 единиц по шкале Мооса.

Фотографии образцов обрабатываемых природных камней приведены на рисунке 3.



Рисунок 3. Фотографии образцов природных камней

В результате интенсивной электрогидроимпульсной обработки природных камней указанные образцы были разрушены на мелкие куски (см. фотографии на рис. 4).

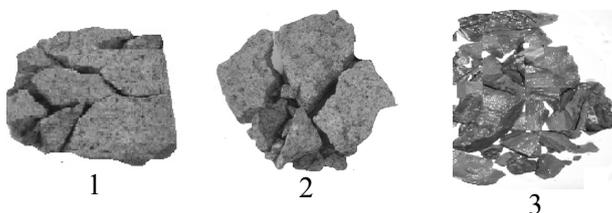


Рисунок 4. Фотографии образцов природных камней после электрогидроимпульсной обработки

При проведении экспериментов электрофизические параметры установки изменялись в следующих пределах:

$$U_{\text{выс}} = 20 \div 35 \text{ кВ,}$$
$$C_{\text{кон}} = 1 \text{ мкФ,}$$

$$l_{\text{разряд}} = 7 \div 12 \text{ мм},$$

$$L_{\text{раб}} = 25 \div 35 \text{ мм}.$$

При этом энергия разряда в рабочем промежутке изменялась:

$$E = 250 \div 620 \text{ Дж}$$

В экспериментах обрабатываемые природные камни имели среднюю толщину от 42 мм до 80 мм.

Эксперименты проводились следующим образом. На поверхности камня, находящегося в баке с водой, устанавливался электрогидравлический бур. После включения установки определялось количество разрядов до процесса разрушения.

Полученный график зависимости количества разрядов от толщины камня при разных значениях энергии представлен на рисунке 5 (а и б).

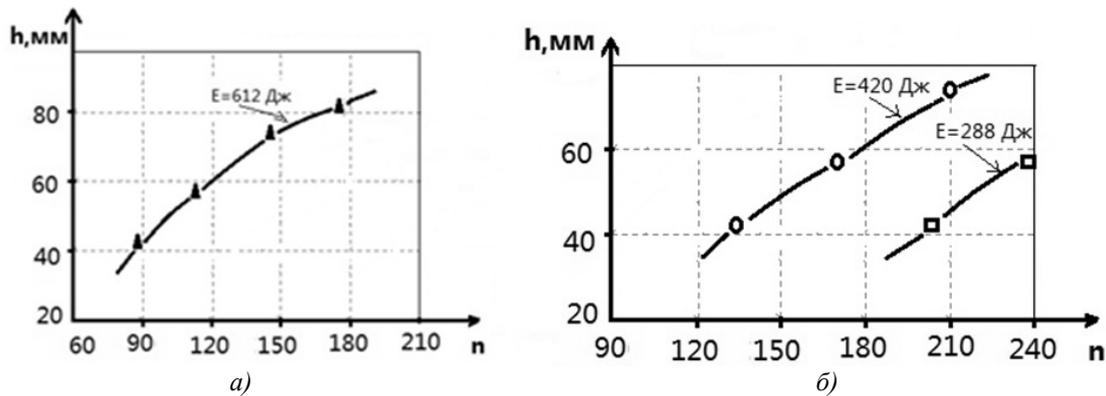


Рисунок 5. График зависимости процесса разрушения камня заданной толщины от качества электрогидравлических импульсов

Видно, что при энергии разряда порядка 288 Джоулей возможно разрушение камня до толщины 55–60 мм. Количество импульсов составляет 230 имп, с увеличением энергии разряда толщины разрушаемых камней возрастает, при этом количество импульсов, необходимых для разрушения, уменьшается. Например, при энергии разряда порядка 612 Дж возможно разрушение камней толщиной 80 мм, при этом требуется меньшее количество импульсов — порядка 170 имп.

На основании экспериментальных исследований установлены границы электрофизических параметров метода, где начинается интенсивное разрушение твердых горных пород — природных камней.

Установлены количественные зависимости, характеризующие начало процесса разрушения пород разной толщины, в зависимости от количества и энергии разрядов.

Опытными работами доказана возможность достижения более высокой скорости бурения, чем на традиционно используемых установках. Электроимпульсное разрушение является бездолотным. Оно не требует специального прижатия электродов к забою со значительным усилием, а потому износ электродов при электрогидроимпульсном бурении сравнительно мал.

### Список литературы

- 1 Энергетическая стратегия Республики Казахстан на период 2004–2015. — Астана.
- 2 Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли для теплообеспечения здания. — Теплоэнергетика. — 1994. — № 2. — С. 31–35.
- 3 Бондарь Е.С., Калугин П.В. Тепловой насос — энергетически эффективная составляющая систем кондиционирования воздуха // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», 2008. — № 5.
- 4 Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы. — М.: Энергоиздат, 1982. — С. 224.
- 5 Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. — М.: Машгиз, 1955. — С. 51.
- 6 Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. — Л.: Машиностроение, 1986. — С. 253.

7 Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Нусупбеков Б.Р., Турдыбеков К.М., Кужуханова Ж.А. Разработка электрогидроимпульсной технологии создания теплообменников для использования теплоты грунта на малых глубинах. Промышленная теплотехника // Международный научно-прикладной журнал. — 2012. — Т. 34. — № 7. — С. 32–33.

8 Кусаиынов К., Nusupbekov B.R., Shaimerdenova G.M., Bulkairova G.A. Electroimpulse Grinding And Reduction Of Natural Minerals. Eurasian Physical Technical Journal. 2009. — Vol. 6. — № 2 (12). — P. 60–64.

9 Кусаиынов К., Байкенов М.И., Нусупбеков Б.Р., Сатыбалдин А.Ж. Влияние электрогидроимпульсного воздействия на физико-химические свойства высоковязкого углеводородного сырья. Химия и химическая технология: Материалы I-й междунар. Российско-Казахстанской конф. (26–29 апр. 2011 г.) / НИТПУ. — Томск, 2011. — С. 534–537.

10 Кусаиынов К., Нусупбеков Б.Р., Шаймерденова Г.М., Булкайрова Г.А. Влияния электрофизических параметров электрогидроимпульсной установки на степень очистки насосно-компрессорных труб // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. — 2011. — № 2 (13). — С. 53–56.

11 The Mohs Mineral Hardness Scale. By Andrew Alden. About.com: Geology. Электронный ресурс, 2010

Қ.Құсайынов, Г.А.Жуандықова, Б.А.Ахмадиев, Н.Н.Шуюшбаева, Ж.А.Кужуханова

## **Жылу сорғыларындағы жылу сорғыш элементтерін орналастыру үшін ұңғыларды бұрғылаудың электрогидроимпульстік технологиясын жасау**

Зерттеу мақсаты болып дәстүрлі емес және жанартылған энергетика көздерін пайдаланып, қоғамдық және өндіріс орындарын, тұрғын үйлерді жылу және суытумен қамтамасыз етуде энергия үнемдегіш жылу сорғылары технологиясын ендірудің ғылыми-практикалық негіздерін жасау табылады. Жылу сорғылары технологиясы негізінде жер қойнауынан алынатын жылу мен жер асты суларын пайдаланудағы ең тиімді әдістердің бірі — бұрғылау арқылы жылуалмастырғыш элементтерін бекітуге арналған ұңғымаларды қолдану болып есептеледі. Ұңғымаларды жасауда электрогидравликалық бұрғылау әдісі жаңа инновациялық әдіс болып саналады. Бұл кезде электр энергиясы бұрғылайтын жерде тікелей соққы толқындарының механикалық энергиясын айналып, тау жыныстарын бұзуға қабілеттілікке ие болады. Мақалада қатты және өте қатты тау минералдарына электрогидроимпульстік ықпалды зерттеу нәтижелері келтірілген.

K.Kussaiynov, G.A.Zhuandykova, B.A.Akhmadiyev, N.N.Shuyushbayeva, Zh.A.Kuzhukhanova

## **Development of electro-hydraulic pulse technology of drilling wells for installation of heat exchange elements of heat pumps**

The aim of the study is to develop scientific and practical principles of implementation of energy saving heat pump technology for heat and cold supply to residential, public and industrial premises on the basis of alternative and renewable sources of energy. One of the effective methods to generate heat from groundwater by means of heat pump technology is the use of wells for consolidation of heat exchange elements produced by drilling. Fundamentally new innovative method of making wells is electro-hydraulic drilling. When electro-hydraulic drilling electrical energy directly in the bottomhole transforms into mechanical energy of shock waves that can break up rocks. This paper describes the results of studies of the impact of electro-hydraulic pulse on hard and superhard rock minerals.

### References

- 1 *Energy Strategy of the Republic of Kazakhstan for 2004–2015*, Astana.
- 2 Vasiliyev G.P. *Use of low-grade heat of the ground of surface layers of the Earth for heat and cold supply in buildings*. Heat and power engineering, (2), 1994, p. 31–35.
- 3 Bondar Ye.S., Kalugin P.V. *Heat pump as an energy efficient component of air conditioning systems*. Electronic journal of energy service company «Ecosystems», 2008 (5).
- 4 Ray D., McMichael D. *Heat pumps*. Energoizdat, 1982, 224 p.
- 5 Yutkin L.A. *Electro-hydraulic effect*. Mashgiz, 1955, p. 51.
- 6 Yutkin L.A. *Electro-hydraulic effect and its application in industry*, L.: Mashinostroenie, 1986, p. 253.
- 7 Kusaïynov K., Sakipova S.Ye., Nusupbekov B.R., Turdybekov K.M., Kuzhuhanova J.A. *Electric hydro-pulse development technology of heat exchangers production for using ground heat at shallow depths*. Industrial Heat Engineering. — International Scientific and Applied Journal, 2012, vol. 34, (7), p. 32–33.
- 8 Kusaïynov K., Nusupbekov B.R., Shaimerdenova G.M., Bulkairova G.A. *Electroimpulse Grinding And Reduction Of Natural Minerals*. Eurasian Physical Technical Journal, 2009, vol. 6, № 2 (12), p. 60–64.

9 Kusaiynov K. Baikenov M.I., Nusupbekov B.R., Satybaldin A.J. *Influence electrohydroimpulse impact on the physical and chemical properties of highly viscous hydrocarbons*. Chemistry and Chemical Engineering: Materials I-th International Conference of the Russian-Kazakhstan. (26–29 April 2011) / NITPU., Tomsk, 2011, p. 534–537.

10 Kusaiynov K. Nusupbekov B.R., Shaimerdenova G.M., Bulkairova G.A. *Influence of electrical parameters electrohydropulse installation purification tubing*. Vestnik Almaty University of Energy and Communications, 2011, № 2 (13), p. 53–56.

11 The Mohs Mineral Hardness Scale. By Andrew Alden. About.com: Geology. Electronic resource, 2010.

УДК 535.215, 621.472, 535.8, 53.06, 620.91

В.С.Антощенко, Ю.В.Францев, И.Х.Жарекешев, О.А.Лаврищев

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы (E-mail: isa2020@mail.ru)*

### **Концентраторный тепло-фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии**

В статье представлены методы оптимизации и повышения эффективности работы теплового фотовольтаического преобразователя (ТФЭП). В основе ТФЭП лежит использование концентрированной солнечной радиации. Предложенная гибридная система независимо преобразует как видимый солнечный свет, так и тепловую радиацию. Исходя из затрат определена себестоимость единичной системы как функция степени концентрации. Рассчитана эффективность концентраторного ТФЭП для процессов передачи тепла и преобразования энергии.

*Ключевые слова:* фотоэлектричество, преобразование солнечной энергии, солнечные элементы, технология фотоприемников, фотопреобразователи, термоколлекторы, возобновляемые источники.

#### *Введение*

По мере того, как глобальные изменения климата становятся очевидными и мировые резервы нефти, по-видимому, подходят к пределу своего пикового производства, все больше необходимым и актуальным становится решение проблем совершенствования новых типов энергоснабжения. Помимо увеличения эффективности использования традиционных видов энергопотребления, развитие альтернативных источников является насущной задачей сегодняшнего дня. В особенности играют важную роль в этом процессе разработка и внедрение в экономику *возобновляемых источников энергии*. Наиболее перспективной и многообещающей технологией для преобразования энергии возобновляемыми источниками представляется прямое использование солнечной радиации. Фотовольтаические элементы «конвертируют» свет солнца непосредственно в электричество, в то время как солнечные коллекторы производят тепло.

Концентраторные (или концентрированные) системы предлагают возможность увеличения электрического выхода из фотовольтаических элементов (или фотоэлементов, сокращенно ФЭ). Высокая концентрация солнечного излучения достигается за счет рефлектирования или фокусирования радиации на сравнительно небольшом участке, где располагается ФЭ. Например, с помощью отражения (рефлектирования) можно добиться степени концентрации солнечного света в десятки и сотни раз на малой площади поверхности ФЭ, со стороны которой падает световое излучение. Ключевая идея при этом заключается в том, что материалы для создания рефлектора значительно дешевле (из расчета на единицу площади), чем цена относительно дорогих фотоэлементов, основу которых зачастую составляют различные дорогостоящие полупроводниковые (и зачастую высокотехнологичные) компоненты. Исходя из теории, замещение всей площади, занимаемой ФЭ только материалом рефлектора, позволит производить электричество от солнечной радиации по более низким и, следовательно, более конкурентоспособным ценам.

Однако следует иметь в виду, что с увеличением концентрации падающего на систему солнечного излучения нарастает потребность в эффективном охлаждении фотоэлементов. Это необходимо для того, чтобы удерживать умеренную температуру (не допуская перегрева) и, тем самым, обеспе-

чить нормальный режим функционирования ФЭ. В результате вынужденного понижения температуры можно добиться дополнительного выигрыша в энергии, отводимой от системы в форме тепла. Эта «энергодобавка» достигается за счет использования воздуха, воды или другого теплоносителя в качестве охлаждающего агента.

### *Фотоэлектрические преобразователи*

Общеизвестно, что фотоэлектрическое преобразование солнечной радиации представляет собой одно из перспективных направлений развития альтернативной энергетики. В основе этого преобразования лежит фундаментальное квантовое явление — фотоэффект, суть которого заключается в том, что световая энергия Солнца прямым образом преобразуется в электрическую энергию. Электронный прибор, работающий на основе фотоэффекта, принято называть фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП). На роль и применение ФЭП в промышленности впервые указывал А.Ф.Иоффе еще в 1932 г. [1].

Ключевой компонентой фотоэлектрического преобразователя является полупроводниковый солнечный элемент, в котором под воздействием электромагнитного излучения генерируются носители заряда. Фактически происходит пространственное разделение электронно-дырочных пар за счет электрического поля запирающего слоя p-n-перехода. В результате создается фототок, т.е. генерируется электрическая энергия. КПД полупроводниковых фотоэлектрических генераторов на практике варьируется от 15 до 20 % и может достигать 35–40 %, в зависимости от материала и его чистоты [2].

Следует отметить, что ФЭП обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими традиционными преобразователями энергии. Этими преимуществами являются бесшумность, минимум воздействия на окружающую среду, низкий уровень эксплуатационных расходов и др. За счет компактности и удобства логистики ФЭП-генераторы могут быть инсталлированы в непосредственной близости от конечного потребителя малой энергии, что, в свою очередь, значительно облегчает и, как следствие, экономит транспортировку электроэнергии от источника до удаленного потребителя.

Территория Казахстана обладает большим потенциалом для использования солнечной энергии с помощью возобновляемых источников. Это связано с благоприятными климатическими условиями республики (высокая среднегодовая продолжительность солнечного сияния, безоблачное состояние атмосферы). Несмотря на это, устройства солнечной энергетики, в частности фотоэлектрические генераторы, не находят в настоящее время достаточно широкого применения в РК. Это происходит по разным причинам, главной из которых выступает сравнительно высокая стоимость ФЭП. Рынок фотоэлектрических батарей и солнечных коллекторов в Казахстане начал формироваться только в последние годы. Различные отечественные и производимые за рубежом фотоэлектрические преобразователи варьируют по цене от 6 до 15 US\$ за один ватт пиковой мощности.

### *Гибридные ТФЭП*

Одним из путей повышения эффективности возобновляемых источников и дальнейшего снижения себестоимости их производства является использование так называемых концентраторных гибридных систем, сочетающих в себе преимущества фотоэлектрических систем и тепловых коллекторов [3]. Фактически *гибридность* означает совмещение фотоэлектрического и теплового преобразования солнечной энергии в одном устройстве, которое принято называть тепло- фотоэлектрическим преобразователем, сокращенно ТФЭП. В настоящей статье предлагаются разработка и создание экономически эффективных тепло-фотоэлектрических преобразователей с концентрированием солнечной энергии почти в десять раз.

Комбинация фотоэлектрического преобразователя и теплового солнечного коллектора в одном устройстве, генерирующем как электрическую, так и тепловую энергию, в зарубежной литературе получила название систем типа CPVT (concentrated photovoltaic thermal systems). Эти системы конвертируют солнечную радиацию по двум различным частям спектра солнечного излучения: видимой и инфракрасной. Видимая часть спектра, соответствующая ширине запрещенной зоны полупроводника (1.4 эВ для GaAs и 1.1 эВ для кремния), используется для преобразования светового потока в фототок, в то время как инфракрасная часть спектра (<0.8 эВ) служит для прямого нагрева жидкого агента в первом контуре теплообменника.



Рисунок 1. Опытный образец-прототип концентраторной гибридной тепло-фотоэлектрической системы ТФЭП с пиковой мощностью 45 Вт с солнечной концентрацией  $C = 8$ . Приведена конструкция с двумя солнечными элементами

На рисунке 1 изображена комбинированная конструкция разработанной нами гибридной системы, в которой фотоэлектрический и тепловой компоненты преобразования пространственно разделены и используются функционально независимо друг от друга. Однако оба компонента объединены на одной общей несущей конструкции. Понятно, что такая комбинация в единичном устройстве приводит к почти двойной экономии денежных затрат и трудовых ресурсов для создания полной (гибридной) установки. Кроме того, один и тот же локальный потребитель использует как тепловую, так и электрическую энергию от одной системы.

Опытно-конструкторский образец состоит из солнечного модуля, концентратора (т.е. системы зеркал с трэккером) и системы охлаждения. Концентратор представляет собой единую систему зеркал (на рис. 1 слева), жестко смонтированных под разными углами к плоскости несущей металлической рамы. В нашем случае солнечная радиация концентрируется восьмью зеркалами, следовательно, степень концентрации равна  $C = 8$ . Двухэлементный солнечный модуль содержит два солнечных pol-Si элемента и тыльную сетку для отвода тепла, входящую в систему охлаждения. Для того чтобы на солнечный модуль постоянно падал свет, система зеркал снабжена трэккером. Последний обеспечивает точное слежение поверхности зеркального коллектора за траекторией солнца в течение светового дня.

Подчеркнем, что любой выигрыш в энергии сопровождается определенными необратимыми потерями энергии в ТФЭП. Энергетические потери связаны с:

- а) отражением солнечного излучения от поверхности кремниевого преобразователя;
- б) отражением радиации от зеркал концентратора;
- в) рассеянием электромагнитного поля на тепловых колебаниях решетки;
- г) обратным фототоком вследствие безизлучательной электронно-дырочной рекомбинации в объеме и на поверхности полупроводника;
- д) потерями фототока при движении к токосъемникам;
- е) прохождением части излучения сквозь ТФЭП без поглощения.

Уменьшение и предотвращение перечисленных выше энергетических потерь представляет собой большую задачу по оптимизации себестоимости ТФЭП. С другой стороны, устранение перечисленных факторов (а–е) потерь энергии содержит в себе значительный потенциал для дальнейшего повышения эффективности работы концентраторного гибридного тепло-фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии.

#### *Концентрирование солнечной радиации*

Вторым важным аспектом на пути повышения экономической эффективности ФЭП солнечной энергии является разработка систем *концентраторов* солнечных лучей. Концентрированный солнечный свет создается применением систем сравнительно недорогих линз (в нашем случае линз Френеля) или плоских зеркал, с тем чтобы собирать значительную солнечную энергию на сравнительно небольшой поверхности солнечных элементов. Это достигается, например, отражением природного солнечного света от поверхности различных наклоненных под определенными углами зеркал, «зай-

чик» от которых падает на одну и ту же поверхность солнечного элемента или ряда солнечных элементов. За счет такой концентрации, т.е. искусственного, в десятки раз, усиления солнечной радиации, резко уменьшается доля высокой цены полупроводниковых солнечных элементов в общей себестоимости всего устройства ТФЭП. Практика показывает, что концентраторные системы по сравнению с неконцентраторными, имеют меньшую стоимость, продолжительный период эксплуатации ФЭП [4].

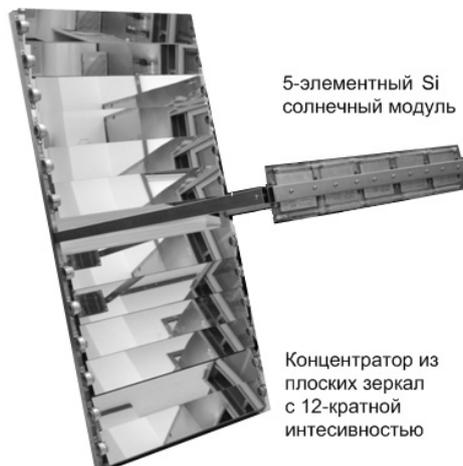


Рисунок 2. Концентраторный фотоэлектрический преобразователь на основе ансамбля плоских прямоугольных зеркал с солнечной концентрацией  $C = 12$ . Приведена конструкция с пятью солнечными элементами

Себестоимость одного ватта пиковой мощности предлагаемого в данной работе гибридного концентраторного преобразователя общей мощностью 295 Вт (из них 45 Вт электрической составляющей и 250 Вт тепловой составляющей для трехэлементной солнечной батареи) снижается до 2,00-3,00 US\$. Для сравнения, подобная себестоимость фотоэлектрических преобразователей, изготовленных за рубежом и реализуемых в дальнейшем на отечественном рынке, достигает 5,00-6,00 US\$ за ватт. Важно отметить, что снижение почти вдвое удельной цены за единицу вырабатываемой энергии является значительным преимуществом автономных комбинированных систем и свидетельствует о конкурентоспособности предлагаемого нами преобразователя на местных рынках.

На рисунке 2 представлена концентраторная тепло-фотоволтаическая система с выходной пиковой мощностью электрической составляющей в 75 Вт. В дальнейшем нами планируется создать и апробировать в натуральных условиях тепло-фотоэлектрическую систему мощностью 180 Вт фотоэлектрической составляющей.

#### *Оптимизация себестоимости ТФЭП как функции степени концентрации солнечной радиации*

Нами также были проведены исследования по оптимизации себестоимости фотоэлектрических преобразователей с концентрированием солнечной энергии. Вполне ясно, что концентрирование солнечных лучей ведет к прямому снижению общей себестоимости системы ФЭП, так как большая часть поверхности, покрытой дорогостоящим полупроводниковым материалом, фактически заменяется сравнительно дешевым материалом (зеркалами, линзами) концентратора. С увеличением степени концентрации  $C$  солнечной энергии уменьшается и цена за один ватт генерируемой энергии.

Следует отметить, что чем выше степень концентрации  $C$ , тем сложнее и дороже становится система охлаждения ФЭП. При больших степенях концентрации ( $C > 20$ ) применяемая нами система охлаждения ФЭ жидкостным агентом значительно усложняется. Кроме того, изменяются условия обеспечения необходимого температурного режима солнечных элементов, что, в свою очередь, приводит к усложнению всей системы и повышению эффективной себестоимости ТФЭП.

Усложняется и тем самым дорожает конструкция самого трекера, отслеживающего траекторию Солнца, стоимостная часть которого является преобладающей в общей цене системы. Другие факторы также приводят к повышению себестоимости системы фотоэлектрического преобразователя при

больших степенях концентрации. К этим факторам относятся: а) удорожание технологии производства; б) большое количество применяемых конструкционных материалов; с) увеличение массы всей системы. Исходя из этого становится невыгодным с экономической точки зрения дальнейшее наращивание степени концентрации.

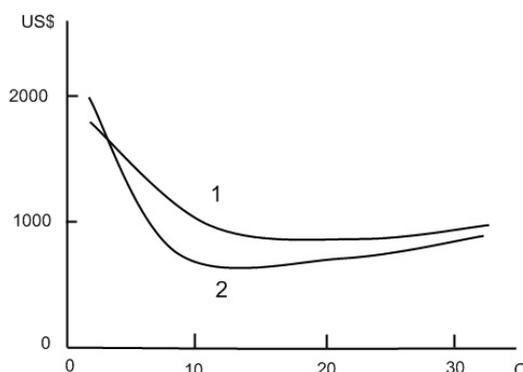


Рисунок 3. Цена в US долларах концентраторного фотоэлектрического преобразователя в зависимости от степени солнечной концентрации  $C$ . Кривая 1 соответствует параболо-цилиндрической форме концентратора. Кривая 2 рассчитана для ансамбля плоских прямоугольных зеркал, число которых равно концентрации  $C$

Вполне логично предположить, что существует определенное оптимальное значение степени концентрации солнечной энергии  $C$ , при котором концентраторный фотоэлектрический преобразователь имеет минимальную себестоимость. Экспериментальные измерения, проведенные нами при различных концентрациях  $C$ , показали, что наиболее оптимальное значение, при котором достигается минимум себестоимости из расчета на единицу генерируемой мощности, лежит в диапазоне  $C = 8-12$ . Соответствующие данные приведены на рисунке 3. Расчеты на основе математической модели по поиску экстремумов себестоимости как функции концентрации, проведенные в работе [5] для параболо-цилиндрических концентраторов мощностью 500 Вт, дали оптимальное значение концентрации  $C = 14,4$ . Последнее видно из кривой 1 на рисунке 3. Это теоретическое значение приемлемо согласуется с нашими экспериментальными данными [6], при этом наблюдается более низкая себестоимость плоских систем на своем оптимальном значении концентрации.

Важно отметить, что плоская геометрия концентратора с системой закрепленных на нем зеркал прямоугольной формы (см рис. 2), закрепленных на прямоугольном металлическом каркасе под различными углами, имеет явное стоимостное преимущество по сравнению с концентраторами, имеющими параболо-цилиндрическую или параболическую форму, за счет значительной дешевизны его технико-механического изготовления [7]. Оптимизированная нами разработка тепло-фотоэлектрического преобразователя с выходной мощностью в 180 Вт выражается себестоимостью около 540 US\$ при стоимости трэкера 340 US\$. Таким образом, один ватт фотоэлектрической энергии, вырабатываемой при помощи предлагаемой в работе концентраторной конструкции ТФЭП, имеет цену 3,4 US\$. Эта оценка почти в два раза ниже, чем цена для зарубежных аналогов [8].

## References

- 1 *Ioffe A.F.* Mat. of allunion conference. General plan of electrification of USSR // Moscow, vol. 10, p. 6–10.
- 2 *Williams J.R.* Solar energy: technology and applications, Ann Arbor Science. Ann Arbor (MI), 1977, 266 p.
- 3 *Antoshenko V.S., Francev Yu.V., Zharekeshev I. Kh., Lavrishev O.A., Antoshenko E.V.* Thermal photoelectric system based on concentrator solar cells // Vestnik KazNU, series physics. 2011, vol. 39, № 4, p. 3–8.
- 4 *Coventry J.S.* Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector // Sol. Energy. 2005, vol. 78, p. 211–222.
- 5 *Antoshenko V.S., Francev Yu.V., Zharekeshev I. Kh., Lavrishev O.A., Antoshenko E.V.* Autonomous sources of electric and heat energy on original thermal photovoltaic solar batteries // Izvestiya NAS RK, Series phys.-math. 2011, vol. 280, № 6, p. 37–42.
- 6 *Vardanyan R.R., Martirosyan G.A., Dallakyan V.K.* Engineering of economically efficient photoelectric converters of solar energy // Izv. NAS RA and GIUA. Series TN. 2004, vol. LVII, № 2, p. 280–286.

7 Zhao J.F., Song Y.C., Lam W.H., et al. Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system // Energy Conversion and Management, 2011, vol. 52, p. 1343–1353.

8 Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems // Solar Energy. 2007, vol. 81, p. 1117–1131.

В.С.Антощенко, Ю.В.Францев, И.Х.Жарекешев, О.А.Лаврищев

### **Концентраторлық күн элементтері негізінде жасалған жылу-фотоэлектрлік түрлендіргіш**

Мақалада фотовольтық жылылықты қайта өзгерту (ЖФҚӨ) жұмысының оңтайлығын және тиімділігін арттырудың әдістері берілген. ЖФҚӨ-дің жұмысы шоғырланған күн радиациясын пайдалануға негізделген. Ұсынылған гибридік жүйе көрініп тұрған күн сәулесімен қатар, жылу радиациясын да қайта өзгертеді. Шығындар негізінде шоғырлану деңгейінің жекеленген жүйесінің өзіндік құны анықталды. Жылу мен энергияны қайта өзгерту барысында алынатын процестер үшін концентраторлық ЖФҚӨ-дің тиімділігі есептеліп шығарылды.

V.S.Antoshchenko, Yu.V.Francev, I.Kh.Zharekeshev, O.A.Lavrishchev

### **Concentrating thermal photoelectric converter of solar energy**

This paper presents the design optimization and efficiency increase of a photovoltaic/thermal system (PV/T). The operation of the PV/T bases on the use of concentrated solar radiation. The system separately utilizes the solar visible light, as well as the infrared radiation. A thermal T-unit absorbs the infrared radiation before the visible spectral part heats the PV module. The efficiencies and price of the single PV/T system were calculated based on the radiation transfer and the energy conservation.

Ж.Т.Исмаилов, В.А.Колесников, Д.М.Закиев

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: ismailov.zharaskan@mail.ru)

## Разработка структурной схемы универсального передатчика информационно-измерительной системы

В статье представлена разработанная авторами блок-схема и алгоритм работы универсального передатчика, входящего в состав информационно-измерительной системы (ИИС), предназначенного для взвешивания сыпучих материалов на конвейерах. Отмечено, что блок-схема ИИС полностью удовлетворяет современным принципам моделирования электронных устройств и выполнена по модульной системе. Управляющей частью блок-схемы ИИС является микропроцессор, который управляется микропрограммой. Микропрограмма для процессора модуля реализована на языке программирования C/C++ в среде программирования Visual C++ и интерпретирована компилятором LabWB. Разработанная микропрограмма записывается в микроконтроллер программатором St-Link. Определено, что основным звеном информационно-измерительной системы взвешивания сыпучих материалов является АЦП, который осуществляет первичную подготовку аналогового сигнала, пропорционального весу материала, его оцифровку, последующую обработку и накопление.

*Ключевые слова:* структурная схема, информационно-измерительная система, сыпучие материалы, информационный сигнал, передатчик, микропрограмма, микроконтроллер, аналого-цифровой преобразователь, многомодульные системы, печатная плата, конвейер, контроллер, центральный процессор, самодиагностика, электронные устройства.

Информационно-измерительные системы представляют собой совокупность функционально объединенных по модульному принципу измерительных, вычислительных и других технических средств. Создание ИИС связано с решением вопросов, касающихся системы как целого: приведение к общему знаменателю по метрологическим характеристикам средств измерений (датчиков, преобразователей) независимо от вида измеряемых величин; оптимизация распределения погрешностей между различными средствами измерений; организация взаимосвязи между блоками, входящими в ИИС. Отличительными особенностями ИИС являются одновременное измерение многих параметров объекта, т.е. их многоканальность, с передачей измерительной информации в единый центр, где она проходит преобразование и обработку с целью предоставления потребителю в требуемом ему виде, либо в целях автоматического осуществления логических функций измерения, диагностики, идентификации и контроля над производственными или технологическими процессами [1].

В структурную схему ИИС обычно входит и программное устройство, воспринимающее информацию с датчиков, с последующей обработкой, и передатчик для передачи информации по различным каналам связи, в том числе и с пункта сбора данных к получателю информации. По такой структурной схеме строятся практически все ИИС, в том числе и разрабатываемый нами ИИС для конвейерных весов.

В информационно-измерительной системе, предназначенной для весоизмерительного комплекса, универсальному передатчику отводится две роли: первая, и основная, — это передача информативного сигнала, а также всех технологических и настроечных параметров от блока аналого-цифрового преобразователя АЦП к микропроцессорному блоку индикации и контроля — БЛИК-М. Вторая функция — это связь с беспроводным пультом, используемым для настройки и контроля конвейерных весов [2, 3].

Структурная схема универсального передатчика представлена на рисунке 1.

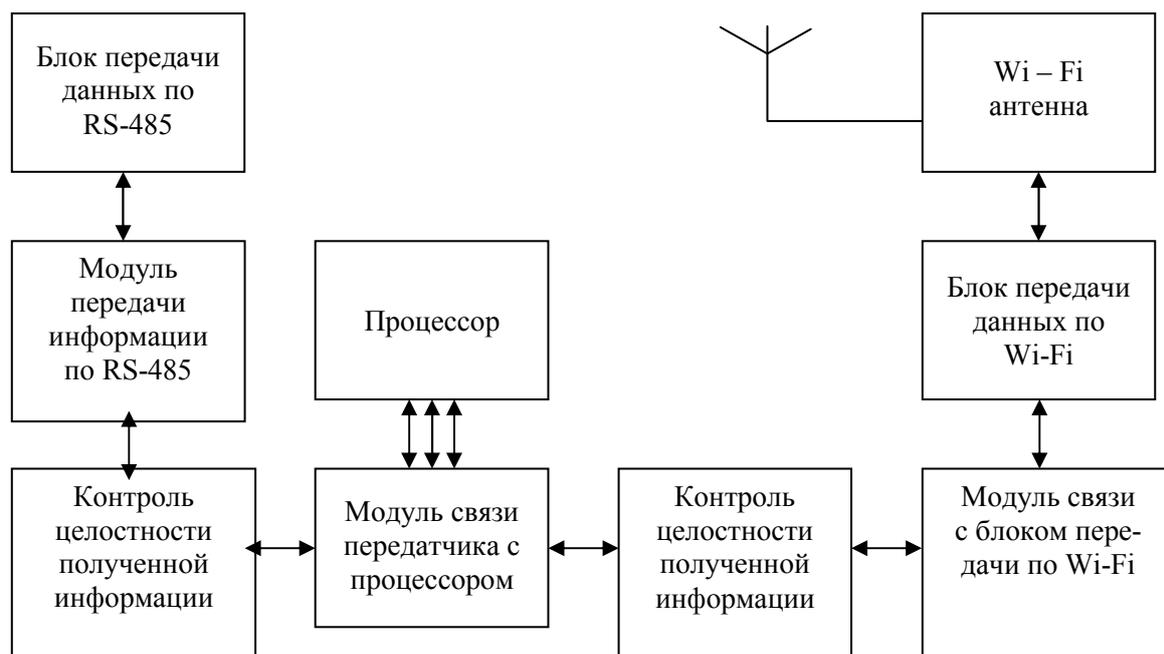


Рисунок 1. Структурная схема универсального передатчика

Из рисунка видно, что универсальный передатчик состоит из модуля связи передатчика с процессором, исполнение которого конструктивно целесообразно провести на обособленной печатной плате. Одновременно в задачу модуля входит выполнение программного контроля целостности получаемой и передаваемой информации. Модуль связан с соседними модулями физической передачи информации по протоколам RS-485 и по радиоканалу на расстояние до нескольких десятков метров. В состав передатчика также входит Wi-Fi антенна.

Микропрограмма для процессора модуля реализована на языке программирования C/C++ в среде программирования Visual C++ и интерпретирована компилятором LabVIEW. Разработанная микропрограмма записывается в микроконтроллер программатором St-Link, обладающим возможностью копирования, проверки, стирания и осуществления других операций, что особенно актуально при многократной перепрошивке в процессе экспериментирования. Блок-схема алгоритма реакции универсального передатчика на прием или передачу информации представлена на рисунке 2.

После выполнения указанного алгоритма микроконтроллер переходит в режим ожидания приема или передачи информации. В это время происходит самодиагностика модулей программ и блоков передатчика. После того, как появился признак приема или передачи информации, происходит контроль целостности информации. Если контроль целостности успешен, происходят реакция в соответствии с полученной либо переданной информацией и выставление признаков готовности к следующей работе. Если контроль целостности не проходит, выставляется признак неправильной посылки информации и посылается сообщение об ошибке.

Следующим по важности блоком для любой информационно-измерительной системы является аналого-цифровой преобразователь. В рассматриваемой ИИС для взвешивания материалов именно аналого-цифровой преобразователь осуществляет первичную подготовку аналогового сигнала, пропорционального весу материала на весах, его оцифровку и последующую обработку и накопление.



Рисунок 2. Блок-схема алгоритма реакции передатчика

АЦП выполнен в виде обособленной двусторонней печатной платы с различными интегрированными модулями на основе современного микропроцессора STM32F103RBT6. Микропрограмма аналого-цифрового преобразователя основана на теории вероятности и математической статистики, теории дискретной математики, теории уравнений в частных производных параболического типа с неклассическими краевыми условиями, методов математического моделирования, теории электронных устройств и систем [4].

Универсальный аналого-цифровой преобразователь также сконструирован по принципу модульности. Блок-схема аналого-цифрового преобразователя представлена на рисунке 3.

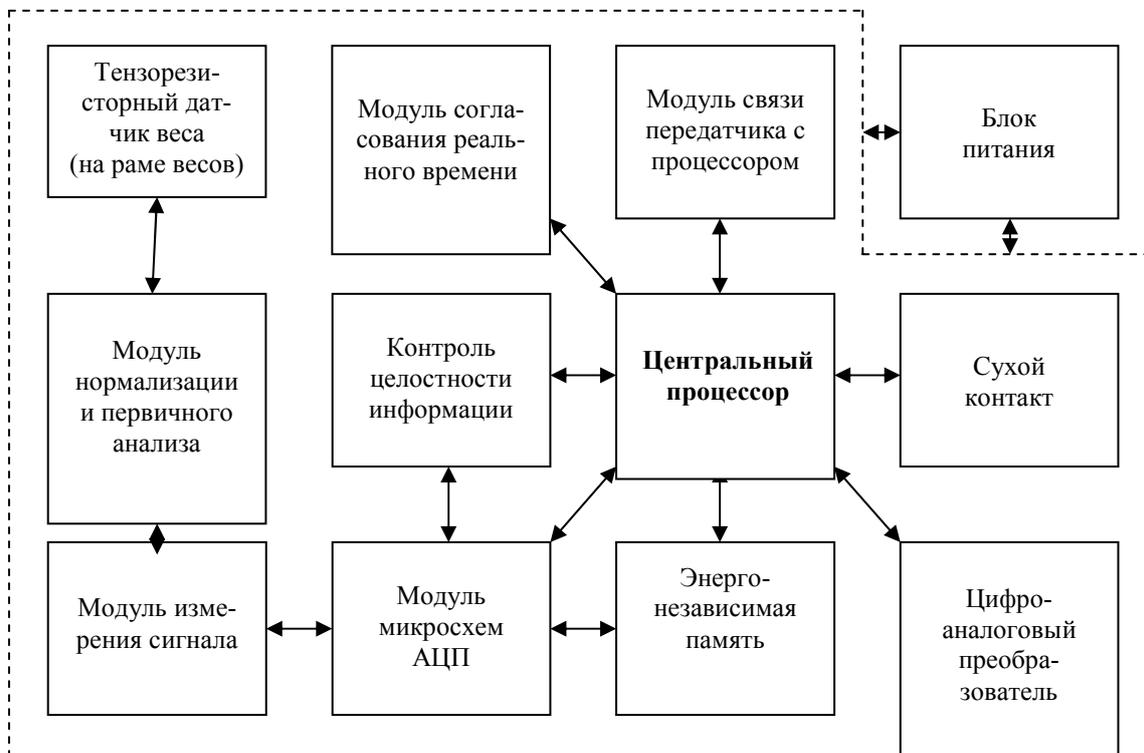


Рисунок 3. Структурная схема универсального аналого-цифрового преобразователя

Как видно из рисунка 3, универсальный аналого-цифровой преобразователь состоит из еще большего числа модулей, чем передатчик и является сложной многомодульной системой с микропрограммой в микроконтроллере, выполняющей основные функции информационно-измерительной системы взвешивания сыпучих материалов.

Блок питания конструктивно выполнен на отдельной печатной плате и обеспечивает весь спектр необходимых напряжений питания блока АЦП системы.

При подаче питания происходят инициализация портов микроконтроллера и считывание настроек из энергонезависимой памяти, после чего запускается процесс инициализации микросхем АЦП. Если от микросхем есть ответ и связь работает нормально, запускается процесс настройки микросхем АЦП. В случае отсутствия ответа от микросхем АЦП происходит повторная попытка инициализации. Если ответа все-таки нет, выставляется и передается сообщение об ошибке АЦП. После этого, при соблюдении всех условий, запускается процесс самокалибровки микросхем АЦП по такому же алгоритму, как и при инициализации. При успешной калибровке калибровочные коэффициенты записываются в энергонезависимую память и выставляется флаг готовности универсального аналого-цифрового преобразователя к работе.

Блок-схема прохождения сигналов от тензорезисторных датчиков (АЦП является двухканальным) представлена на рисунке 4.

В разрабатываемой ИИС использован параллельный тип АЦП, поскольку только АЦП данного типа снабжены сверхскоростными УВВ, имеющими время выборки порядка 0,1 нс. Применение параллельного АЦП также связано с тем, что на вход ИИС будут поступать два информационных сигнала, которые характеризуют прогиб ленты между валами.

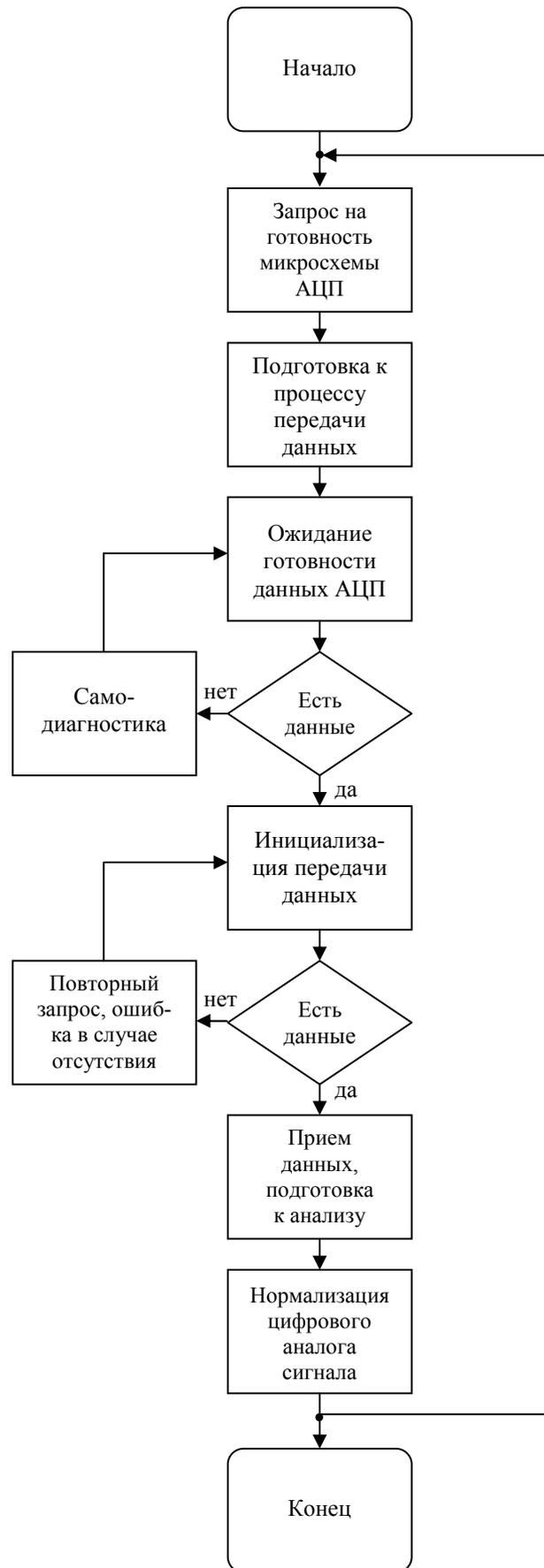


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера с АЦП

Согласно блок-схеме в процессе работы постоянно происходит опрос микросхем АЦП. Микроконтроллер инициирует передачу данных между микросхемами АЦП и ждет готовности данных. При получении флага готовности данных происходит их передача. Во время ожидания микроконтроллер осуществляет постоянную самодиагностику микропрограммы, блоков и сопряженных модулей. При ошибке процесса передачи происходит повторный запрос данных, в случае их отсутствия выставляется и передается сообщение об ошибке. После этого происходит нормализация цифрового аналога информативного сигнала с тензодатчика для последующей его обработки и анализа.

Данная статья написана на основании результатов исследований, выполняемых в рамках грантовой темы МОН РК, финансируемой по приоритету «Информационные и телекоммуникационные технологии» по теме «Разработка и внедрение в производство информационно-измерительной системы для взвешивания сыпучих материалов на конвейерах».

#### Список литературы

- 1 Ранеев Г.Г. Измерительные информационные системы. — М.: Изд-во МГОУ, 2003. — 536 с.
- 2 Кухаркин Е.С. Электрофизика информационных систем. — М.: Высш. шк., 2001. — 671 с.
- 3 Калашиников В.И., Неведов С.В., Путилин А.Б. и др. Информационно-измерительная техника и технологии. — М.: Высш. шк., 2002. — 587 с.
- 4 Ранеев Г.Г., Суротина В.А., Калашиников В.И. Информационно-измерительная техника и электроника. — М.: Издат. центр «Академия», 2006. — 512 с.

Ж.Т.Исмайылов, В.А.Колесников, Д.А.Закиев

### Ақпараттық-өлшеуіш жүйенің әмбебап таратқышының құрылымдық сұлбесін жасау

Мақала авторлары конвейерден өтетін сусымалы материалдардың салмағын өлшеуге арналған ақпараттық-өлшеуіш жүйесіне (АӨЖ) кіретін әмбебап таратқыштың жұмыс істеу алгоритмін келтірген. Зерттелген ақпараттық-өлшеуіш жүйенің блок-схемасы қазіргі электрондық құралдардың модельдеу қағидасына сай құрастырылған. АӨЖ микробағдарлама бойынша жұмыс жасайтын процессормен басқарылады. Микробағдарлама C/C++ бағдарламалау тілінде Visual C++ ортасында жазылған және LabWB компиляторы арқылы енгізілген. Құрастырылған микробағдарлама микроконтроллерге St-Link программаторы көмегімен жүзеге асқан. Ақпараттық-өлшеуіш жүйесінің негізгі тегі болып аналог-цифрлық түрлендіргіш табылды, ол өлшеніп отырған материалға пропорционал сигналды бастапқы ретті өңдеуден өткізеді, оны цифрлап, сақтайды.

Zh.T.Ismailov, V.A.Kolesnikov, D.M.Zakiyev

### Development of the structural scheme of the universal transmitter and weigh-in bulk materials on conveyor

The paper presents our developed a flow chart and the algorithm of the universal transmitter, part of the information-measuring system, designed for weighing bulk materials on conveyor belts. Block diagram of IMS fully meets modern principles modeling of electronic devices and performed on a modular system. The control part of the block diagram of IMS is the microprocessor, which is controlled by the firmware. The firmware for the processor module is implemented in the programming language C / C++ programming environment Visual C++ compiler and interpreted LabWB. Developed firmware stored in the microcontroller programmer St-Link. The basic component of information-measuring weighing bulk materials is the ADC, which provides basic training analog signal proportional to the weight of the material, its digitization, the subsequent processing and storage.

#### References

- 1 Raneyev G.G. *Measuring information systems*, Moscow: Izdatelstvo MGOU, 2003, 536 p.
- 2 Cooharkin Ye.S. *Electrophysics information systems*, Moscow: Vysshaya shkola, 2001, 671 p.
- 3 Kalashnikov V.I., Nefedov S.V., Putilin A.B. et al. *Information and measuring equipment and technology*, Moscow: Vysshaya shkola, 2002, 587 p.
- 4 Raneyev G.G., Surotina V.A., Kalashnikov V.I. *Information and measuring equipment and electronics*, Moscow: Izdatelskii centr «Academiya», 2006, 512 p.

В.А.Колесников, В.М.Юров, Ж.Т.Исмаилов

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова,  
(E-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com)*

## **Технологическая наследственность информационно-измерительных систем**

В работе обсуждаются вопросы технологической наследственности и врожденной способности информационно-измерительных систем. В рамках неравновесной термодинамики получена формула для врожденной способности информационно-измерительных систем. Полученное уравнение позволяет экспериментально определять врожденную способность системы, а также является математическим выражением известного закона Мура. Однако в отличие от обычных интерпретаций закона Мура уравнение содержит врожденную способность, что является существенным фактом. Рассмотрены вопросы жизненного цикла информационно-измерительных систем и их прогнозируемые ресурсы с использованием общих законов термодинамики.

*Ключевые слова:* информационно-измерительная система, технологическая наследственность, врожденная способность, функция отклика, термодинамика.

### *Введение*

В практике мирового приборостроения, создания информационно-измерительных систем (ИИС), машиностроения и других областей происходит постоянное ужесточение требований к качеству изделий, резко увеличиваются быстродействие, точность и другие показатели, которые, в конечном счете, определяют экономику соответствующих отраслей промышленности [1, 2].

Качество изделий в общем виде представляет собой совокупность свойств и показателей, которые определяют пригодность для удовлетворения потребностей в соответствии с их назначением. Определяется качество очень большим числом факторов, и на разных этапах развития приборостроения качественные показатели существенно различаются.

Погрешности при изготовлении датчиков, при сборке прибора, ИИС и т.д. возникают всегда. Изделий без отклонений от номинального значения показателя качества не бывает. Однако любое отклонение должно находиться в допустимых пределах–допусках. В технологии приборостроения важно не только определить количественно данное отклонение, но и установить, почему оно возникло, как это отклонение формировалось на протяжении всего технологического процесса. Информация об истории возникновения каждого отклонения важна потому, что с ее помощью можно влиять на величину отклонения и тем самым повысить показатели качества. Поэтому, например, в процессе создания ИИС, начиная с выбора датчика, процессора и т.д., возникает необходимость рассмотрения производственного процесса создания ИИС во времени. При этом появляется и понятие о технологической наследственности.

Технологическим наследованием называют явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим [3, 4]. Эти свойства могут быть как полезными, так и вредными. Сохранение же этих свойств у объектов называют технологической наследственностью. Такие термины являются достаточно емкими. С их помощью и соответствующих методик можно проследить за состоянием объекта производства в любой момент времени с учетом всех предшествующих технологических воздействий. В процессе передачи свойств важную роль играет так называемая наследственная информация. Она заключается в материале и структуре датчиков, используемых при построении ИИС, радиодеталей и т.д. Информация представляет собой большой перечень показателей качества.

Теория и методология технологической наследственности наиболее развита в машиностроении [2, 3].

В экономике употребляется термин «врожденная способность» экономической системы. Количественные изменения могут приводить к изменению одних качеств, в то время как другие могут оставаться неизменными. Качества претерпевают изменения не одновременно, причем одни чаще, другие реже, а третьи сохраняются на протяжении периода существования объекта. Последнее качество объекта определяется его врожденной способностью [5]. Сравнивая это определение с приведенным выше, видим, что они отражают суть одного и того же явления.

Изучение явлений технологической наследственности способствует повышению надежности работы реальных приборов и систем, так как позволяет установить причины явлений и условия регулирования параметров технологических процессов, в ходе которых формируются свойства этих приборов и систем.

Однако экспериментальное исследование всех стадий технологического процесса разработки и создания ИИС, как, впрочем, и любой детали в машиностроении и других областях, требует большого времени и затрат. В связи с этим стало развиваться компьютерное моделирование и проектирование [6, 7], которые также пока обладают высокой стоимостью. В настоящее время за рубежом, в частности в США, стоимость работ по автоматизации проектирования составляет более 1/3 стоимости разработки больших проектов [8], что свидетельствует о сложности и дороговизне автоматизированного проектирования. Поэтому разработка простых, но обладающих достаточной общностью аналитических моделей надолго еще останется основой исследовательской деятельности, тем более, что для компьютерного моделирования все равно необходима какая-либо математическая модель того или иного процесса [9].

В настоящей работе сделана попытка построения модели врожденной наследственности информационно-измерительных систем (ИИС).

### *Некоторые вопросы моделирования ИИС*

Говоря о технологической наследственности в общем виде, необходимо отметить, что любой объект производственного процесса находится в многообразных связях и взаимодействиях с окружающими его объектами, участвует одновременно в нескольких формах движения. Поэтому всякое состояние объекта представляет собой совокупность условий, в которых это состояние формировалось.

В классических представлениях о природных процессах, их характеристиках считается, что состояние процесса в данный момент времени не зависит от его состояния (характеристик) в какие-либо другие моменты времени. Однако в конце XIX в. было установлено, что среда, действовавшая на объект ранее, оставляет в нем соответствующий след. В. Вольтерра сформулировал это как «эффект последствия», согласно которому состояние объекта определяется не только теми силами, которые действуют на него в данный момент времени, но и историей воздействия сил, имевших место в прошлом [10]. После этого в прикладной математике широко распространилось использование уравнений с последствием, именуемых также функционально-дифференциальными уравнениями, дифференциально-разностными уравнениями, дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом и т.д. [11–16]. Уравнениями такого вида моделируют различные процессы в технике, физике, медицине, экологии и т. д. В частности, уравнения с последствием встречаются в авиационно-космической отрасли. Они используются при моделировании численности популяций и населения нашей планеты.

В общем случае информационно-измерительная система является многосвязной, с меняющимися регулярно или случайным образом параметрами. Работа такой системы может быть описана системой стохастических нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, например, в виде

$$dy_i/dt = \psi_i(y_1, y_2, \dots, y_n; t; u_1, u_2, \dots, u_m; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (1)$$

где  $(u_1, u_2, \dots, u_m) = \vec{u}$  — вектор внешних воздействий;  $(y_1, y_2, \dots, y_n) = \vec{y}$  — вектор реакций;  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = \vec{\lambda}$  — вектор параметров системы;  $(1, \dots, n)$ .

Задача аналитического исследования информационно-измерительных систем весьма сложна при полном их описании и может быть доведена до конца лишь в простейших случаях. Поэтому при аналитическом методе решения ее сразу же стремятся ограничить изучением по возможности упрощенных моделей системы [17].

Одним из способов упрощения математического описания является оценка точности стохастической системы по одной реализации, т.е. фактический переход к анализу детерминированной системы. Следующим шагом является замораживание переменных параметров, т.е. сведение нестационарной задачи к стационарной. Последнее допустимо лишь при медленном изменении параметров по сравнению со скоростью переходных процессов в системе. Однако при этих упрощениях система остается

в классе нелинейных, и все трудности, связанные с аналитическим исследованием нелинейных систем, сохраняются.

Для расширения возможностей аналитических методов применяются различные методы линеаризации — метод малых возмущений, гармонический, статистический, кусочно-линейная аппроксимация и др. Комбинированное применение методов линеаризации и замораживания коэффициентов позволяет свести задачу исследования нелинейной нестационарной системы к изучению ее математической модели, описываемой линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. В результате аналитического исследования часто удается получить решение уравнения (1), однако оно оказывается настолько сложным и громоздким, что проследить по нему зависимость показателя качества от параметров системы и изменения условий ее работы не представляется возможным.

В этих случаях довольствуются численным решением, т.е. находят значение показателя точности для какой-либо одной или ограниченного числа ситуаций. Применение ЭВМ в этом случае ограничивается реализацией программы вычисления показателя точности по заданной формуле. Этот способ аналитического исследования систем с применением ЭВМ получил название формульного метода анализа. Метод широко применяется в практике исследования радиосистем. Исследование вероятностных систем также можно проводить аналитическим и численным методами. В первом случае в результате применения теории марковских процессов возможно вычисление плотности вероятностей  $W(\Delta)$  ошибки системы путем решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова. Однако из-за математических трудностей возможности этого метода пока исчерпываются исследованием моделей систем, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями до второго порядка [18]. Сочетание теории марковских процессов и теории пространства состояний позволяет решать задачи анализа систем, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Успешно этот метод реализуется с применением ЭВМ.

Разработанные методы аналитического исследования нестационарных систем, описываемых линейными стохастическими дифференциальными уравнениями, основаны на непосредственном использовании формул, связывающих статистические характеристики входного и выходного случайных процессов [19]. Так, например, математическое ожидание реакции  $y(t)$  линейной системы

$$m_u(t_1) = \int_0^{t_1} m_u(\tau) g(t_1, \tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $m_u(t_1)$  — математическое ожидание входного процесса;  $g(t_1, \tau)$  — импульсная реакция системы (по одному из выходов) при единичном скачке на одном из входов. Связь между корреляционными функциями входного и выходного процессов в общем случае устанавливается преобразованиями Винера-Ли [20]:

$$\begin{aligned} R_{yy}(t_1, t_2) &= \int_0^\infty g(t_2, \mu) R_{yy}(t_1, \mu) d\mu, \\ R_{uu}(t_1, t_2) &= \int_0^\infty g(t_2, \tau) R_{yu}(t_1, \tau) d\tau, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R_{uu}(t_1, t_2)$ ,  $R_{yy}(t_1, t_2)$  — автокорреляционные функции процессов на входе и на выходе системы соответственно;  $R_{uy}(t_1, t_2)$ ,  $R_{yu}(t_1, t_2)$  — взаимные корреляционные функции процессов на входе и на выходе.

Приведенные соотношения можно использовать для теоретической оценки точности систем как без применения, так и с применением ЭВМ. В последнем случае необходимо воспользоваться формульным методом или располагать численными алгоритмами решения интегральных уравнений вида (3).

#### *Модель врожденной способности ИИС*

В работах [21, 22] в рамках неравновесной термодинамики нами была получена формула для функции  $\Phi$  отклика произвольной системы на внешнее воздействие. Разлагая экспоненту в знаменателе  $\Phi$  (см. [21, 22]) в ряд и пренебрегая малыми членами, в линейном приближении нетрудно получить, полагая  $\Phi = \mathcal{E}$  — эффективность ИИС:

$$\mathcal{E} = \varepsilon \ln W, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  — параметр модели;  $W$  — характеризует объем ресурсов ИИС, который пропорционален объему памяти ИИС, чувствительности сенсоров и ряду других параметров, о которых речь пойдет ниже.

В начальный момент образования системы  $W = \varepsilon$ , так что

$$\mathcal{E}_\varepsilon = \varepsilon \ln \varepsilon. \quad (5)$$

Полученное выражение и есть врожденная способность ИИС.

Обратимся к выражению (4) и сделаем несколько замечаний. Если врожденная способность ИИС ( $\sim \varepsilon$ ) мала, то увеличение ресурсов  $W$  за счет модернизации ИИС незначительно изменит ее эффективность. Это связано с логарифмической зависимостью  $\mathcal{E}$  от  $W$ . Например, увеличение ресурсов ИИС в 100 раз приводит к изменению  $\mathcal{E}$  всего лишь в  $\sim 5$  раз. Такие ИИС должны быть либо существенно реконструированы, либо ликвидированы.

Полученное уравнение позволяет экспериментально определять врожденную способность ИИС. Если в качестве эффективности ИИС взять отношение выходной сигнал / входной сигнал, то можно определить  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots$  по заданным  $W_1, W_2, \dots$  и, тем самым, врожденную способность ИИС. Таким образом, можно проводить анализ ИИС с точки их технической состоятельности и экономической перспективности.

Эффективность ИИС определим как отношение времени ее развития  $t$  к периоду ее существования  $T$ , тогда из уравнения (4) для временной зависимости  $W$  получим:

$$W = W_0 \exp\left(\frac{t}{\varepsilon T}\right), \quad (6)$$

где  $W_0 = \varepsilon \ln \varepsilon$ .

#### *Закон Мура*

В 1960-е гг., в самом начале информационной революции, Гордон Мур, впоследствии один из основателей корпорации Intel, обратил внимание на интересную закономерность в развитии компьютеров. Он заметил, что объем компьютерной памяти удваивается примерно каждые два года. Эта закономерность стала своего рода эмпирическим правилом в компьютерной промышленности, и вскоре оказалось, что не только память, но и каждый показатель производительности компьютера — размер микросхем, скорость процессора и т.д. — подчиняется этому правилу [23].

Закон Мура — это эмпирическое наблюдение, первоначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому (в современной формулировке) количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца.

Кроме предсказания экспоненциального роста плотности размещения транзисторов, Мур сделал и другой важный и на первый взгляд парадоксальный вывод. Сокращение размеров транзисторов должно неизбежно привести к тому, что интегральные микросхемы на их основе будут все дешевле, мощнее и доступнее. Из этого следовало, что изменится электронная отрасль в целом.

Основной характеристикой ИИС является объем памяти процессора, пропорциональное ее ресурсам, так что уравнение (6) является математическим выражением закона Мура. Однако в отличие от обычных интерпретаций закона Мура наше уравнение содержит врожденную способность, что является существенным фактом. Дело в том, что экспоненциальная зависимость типа (6) характерна для многих процессов в природе и обществе, далеких от микроэлектроники, но врожденная способность системы присутствует всегда.

В 2007 г. Мур заявил, что закон, очевидно, скоро перестанет действовать из-за атомарной природы вещества и ограничения скорости света. Одним из физических ограничений на миниатюризацию электронных схем является также принцип Ландауэра, согласно которому логические схемы, не являющиеся обратимыми, должны выделять теплоту в количестве, пропорциональном количеству стираемых (безвозвратно потерянных) данных. Возможности по отводу теплоты физически ограничены [24].

Ограниченность закона Мура естественно вытекает из соотношения (6). При  $t = T$  экспоненциальная зависимость переходит в  $W = \text{const}$ . Графически это выглядит так, как показано на рисунке 1.

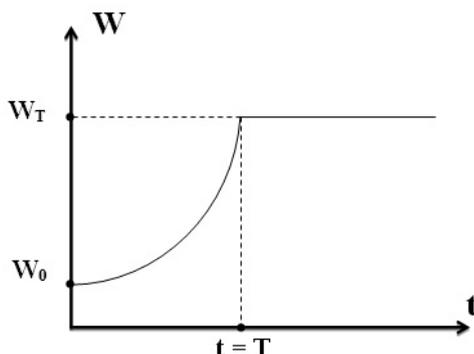


Рисунок 1. Временная зависимость объема памяти процессора ИИС

Следует заметить, что закон Мура (в интерпретации Гордона Мура) не выполняется с такой точностью, чтобы назвать его законом или даже эмпирической закономерностью. Возможно, что шумиха вокруг закона Мура — это ловкий маркетинговый ход корпорации Intel. Тем не менее закон Мура, как и подобные ему «экспоненциальные законы», отражает некоторые общие тенденции развития науки, технологий, человеческого общества и т.д.

Пожалуй, исторически первым человеком, который обратил внимание на тенденцию ускоряющегося развития науки и техники, человеческих знаний и т.д., был Ф.Энгельс [25]. Он отмечал, что наука движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующего поколения. По его мнению, со времени своего возникновения (XVI–XVII вв.) развитие наук усиливалось пропорционально квадрату расстояния (во времени) от своего исходного пункта. Близкие идеи высказывал В.И. Вернадский [26]. По мнению некоторых современных исследователей, имеет место «экспоненциальный закон развития науки», проявляющийся в соответствующем увеличении числа научных работников, научных организаций, публикаций и других показателей [27, 28]. Это мнение соответствует нашему уравнению (6).

#### *Жизненный цикл и живучесть ИИС*

Понятие жизненного цикла является одним из базовых понятий методологии проектирования ИИС [29]. Жизненный цикл ИИС представляет собой непрерывный процесс, начинающийся с момента принятия решения о создании ИИС и заканчивается в момент полного изъятия ее из эксплуатации.

Стандарт ISO/IEC 12207 определяет структуру жизненного цикла, содержащую процессы, действия и задачи, которые должны быть выполнены во время создания ИИС. Согласно данному стандарту структура жизненного цикла основывается на трех группах процессов:

- основные процессы жизненного цикла (приобретение, поставка, разработка, эксплуатация, сопровождение);
- вспомогательные процессы, обеспечивающие выполнение основных процессов (документирование, управление конфигурацией, обеспечение качества, верификация, аттестация, оценка, аудит, разрешение проблем);
- организационные процессы (управление проектами, создание инфраструктуры проекта, определение, оценка и улучшение самого жизненного цикла, обучение).

Среди основных процессов жизненного цикла наибольшую важность представляют разработка, эксплуатация и сопровождение. Каждый процесс характеризуется определенными задачами и методами их решения, исходными данными; полученными на предыдущем этапе, и результатами.

ИИС — это комплекс измерительных устройств, обеспечивающих одновременное получение человеком-оператором или ЭВМ необходимой информации о свойствах и состоянии какого-либо объекта [29]. Структурная схема любой ИИС может быть представлена так, как это показано на рисунке 1. Датчики воспринимают различные параметры объекта измерения, унифицирующие преобразователи унифицируют и передают по каналам связи сигналы датчиков в единый пункт сбора данных. Программное устройство воспринимает информацию датчиков и передает её получателю информации. По такой схеме строятся практически все ИИС, включая современные системы передачи информации со спутников и автоматических межпланетных станций.

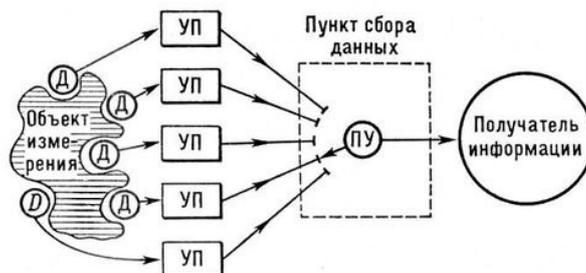


Рисунок 2. Структурная схема информационно-измерительной системы [29]

Выше мы уже отмечали, что при  $t = T$  согласно (6) система перестает развиваться. Время  $T$  естественно назвать ее жизненным циклом, предельное значение которого равно:

$$W_T = \varepsilon \ln \varepsilon \exp(1/\varepsilon), \quad (7)$$

т.е. полностью определяется врожденной способностью ИИС.

Сделаем теперь следующее замечание. Каждый структурный элемент ИИС, представленный на рисунке 2, имеет свою врожденную способность и жизненный цикл. В этом случае жизненный цикл всей ИИС будет определяться наименьшим значением  $T$  структурного элемента ИИС.

Экспериментально жизненный цикл ИИС можно определять по времени отказа того или иного его структурного элемента, используя большой арсенал имеющихся методов определения надежности электронных систем [30].

Еще одним фундаментальным свойством сложных систем, к которым также относятся ИИС, является их живучесть. Под живучестью системы понимают ее способность адаптироваться к новым, непредусмотренным условиям функционирования, противостояния нежелательным влияниям при одновременной реализации основной функции [31]. Живучесть ИИС анализируют и оценивают на различных уровнях их моделирования, проектирования и функционирования. При этом используются теоретико-игровые, вероятностные, графовые, матричные и другие модели. Практически все известные на сегодняшний день методы анализа и оценки живучести информационных систем описаны в работе [31]. Здесь мы изложим свой подход, базируясь на термодинамическом анализе сложных систем, включая ИИС [21, 22, 32].

Основной причиной нарушения работы той или иной системы является наличие диссипативных процессов в системе, возникающих при ее взаимодействии с внешней средой или при взаимодействии составляющих систему элементов. Исключить такие процессы невозможно (невозможность построения вечного двигателя), поэтому на практике стремятся уменьшить их влияние (уменьшение трения и т.п.).

Полученное выражение в работе [32] для к.п.д. ИИС после некоторых преобразований будет иметь вид:

$$\eta = C \cdot \Delta \cdot W \cdot N / E, \quad (8)$$

где  $C = \text{const}$ ,  $\Delta$  — точность ИИС;  $W$  — как и прежде ее ресурсы;  $N$  — число каналов связи в ИИС;  $E$  — энергоемкость ИИС.

Параметр  $\eta$  с точностью до постоянного множителя будет характеризовать живучесть ИИС. Из уравнения (8) видно, что живучесть ИИС также существенным образом (через  $W$ ) зависит от врожденной способности или технологической наследственности ИИС.

#### Прогнозные ресурсы ИИС

Сейчас уже общепринято (см., напр., [31]), что информационные и информационно-измерительные системы относятся к классу коммуникационных систем.

Обобщенное понятие «ресурса» коммуникационной системы впервые было введено Л.И.Розоноэром [33]. В этой работе обмен и распределение ресурса в системе рассматривались как происходящие по законам, аналогичным закону распределения энергии в замкнутой системе механических частиц. Позже понятие «ресурса» коммуникационной системы стали связывать с наличием некоторого множества коммуникаций, соединяющих элементы системы, и с характеристиками этих коммуникаций.

Мы будем называть прогнозными ресурсами ИИС ее «истинное» значение определяющего параметра, в отличие от «ресурсов потребления» или фактических ресурсов, которые сложились при функционировании системы на данный период (или момент) времени. В связи с этим мы введем понятие «концентрации» основной характеристики системы, понимая под этим термином величину этой характеристики в единице «объема» системы. «Объем» системы определяется для конкретной системы (общее количество каналов связи и т.д.).

Если исходить из представлений классической термодинамики, то можно ввести понятие «энергии образования» коммуникационной системы в результате термодинамического цикла (например, цикла Карно) [34].

Тогда формула для определения затрат энергии на термодинамический цикл образования системы будет иметь вид:

$$\Delta F = \alpha T \Delta S = \alpha RT \ln X, \quad (9)$$

где  $X = C/C_0$  (для прямого цикла) и  $X = C_0/C$  (для обратного цикла);  $\alpha$  — число элементов, вовлеченных в процесс образования системы;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $C_0$  — начальная и  $C$  — конечная концентрации основной характеристики.

Концентрацию основной характеристики сложной системы выразим через равновесную концентрацию  $C_p$ . Этот параметр пропорционален к.п.д. цикла, так что полная энергия имеет вид:

$$\Delta F_n = \Delta F / \kappa.п.д. = \alpha RT \ln X / C_p. \quad (10)$$

Для прямого и обратного цикла

$$C_p = \frac{\alpha'}{\sum_i \alpha_i}, \quad C_p = \frac{\alpha''}{\sum_i \alpha_i}, \quad (11)$$

где  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  — количество элементов, вовлеченных в процесс образования системы в прямом и обратном циклах соответственно;  $\sum_i \alpha_i$  — общее число элементов, вовлеченных в образование системы.

Очевидно, что в прямом цикле  $\alpha = \alpha'X$  и в обратном  $\alpha = \alpha''X$ . Подставляя  $\alpha$  и  $C_p$  в (10), имеем:

$$\Delta F_n = RTX \ln X \sum_i \alpha_i. \quad (12)$$

Не меняя общности рассуждений, положим  $\sum_i \alpha_i = 1$ , тогда получим:

$$\Delta F_n = X \ln X. \quad (13)$$

Если дифференцированные ресурсы системы в единице «объема» обозначить через  $W_x$ , то

$$W_x = \frac{1}{X \ln X}. \quad (14)$$

В работе [34] мы применили методы неравновесной термодинамики к ИИС и получили выражение для функции отклика этой системы на внешнее воздействие с учетом диссипативных процессов. После линеаризации полученного нами выражения функция отклика  $\Phi$  системы имеет вид:

$$\Phi = \beta \frac{E}{\Delta G^0} \cdot \bar{N}, \quad (15)$$

где  $E$  — «емкость» канала связи в системе;  $\bar{N}$  — среднее число каналов в системе;  $\Delta G^0$  — энергия Гиббса термостата (внешней среды);  $\beta$  — некоторая постоянная теории, величина которой вычисляется для каждой конкретной системы по процедуре, изложенной нами в [34].

Для идеальных процессов  $\Delta G^0 = \Delta F_n$  и с учетом (13), (14) и (15) получим

$$W_x = \frac{\beta E \bar{N}}{\Phi}. \quad (16)$$

Если «объем» ИИС мы обозначим через  $V$ , то полные ресурсы системы будут равны

$$W = \frac{\beta E \bar{N}}{\Phi} \cdot V. \quad (17)$$

Интуитивно ожидалось, что ресурсы ИИС будут возрастать с увеличением числа каналов связи и канальной емкости системы.

С учетом (6) для функции отклика ИИС из (17) будем иметь

$$\Phi = \beta \varepsilon \ln \varepsilon \cdot E \cdot \bar{N} \cdot V \cdot \exp(-t / \varepsilon T). \quad (18)$$

Таким образом, функция отклика ИИС содержит ее основные параметры (здесь «объем» системы можно принять равным объему памяти процессора) и врожденную способность ИИС.

В простейшем случае в качестве функции отклика можно взять отношение выходного сигнала к входному и воспользоваться автокорреляционными функциями процессов на входе и выходе системы в форме (3) или в любой другой форме.

Заметим, что большая часть параметров в уравнении (18) может быть определена экспериментально, что имеет важное прикладное значение.

### Заключение

В современном мире многие системы — информационные, транспортные, производственные, энергетические и другие — попали в разряд сложных систем, анализ которых представляет собой весьма сложную задачу.

Работы по созданию общей теории систем (ОТС) были начаты в начале XX в. А.А.Богдановым [35], а несколько десятков лет спустя — Л. фон Берталанфи [36], которому удалось продвинуться вперед и привлечь к этой проблеме внимание широких кругов мировой научной общественности. Тем не менее он не создал ОТС, поэтому М. Месаровичем [37], О. Ланге [38], У. Росс Эшби [39], А.И.Уемовым [40] и рядом других исследователей были предложены новые варианты ОТС, во многом свободные от недостатков теории Берталанфи. И все же эти варианты оказались недостаточными для системного анализа глубокого единства живой и неживой природы, процессов, происходящих как в науке, так и в обществе.

Попытки создания ОТС шли параллельно с попыткой создания физиками единой теории поля, впервые предпринятой А.Эйнштейном. Но и в этом случае они оказались пока безуспешными. Тем не менее работы по созданию общих теорий значительно продвинули науку в целом, создали предпосылки развитию новых ее направлений. В частности, исследования в области ОТС привели к появлению синергетики — науке об информации и самоорганизации сложных систем.

Возвращаясь к ОТС, отметим, что наиболее успешная ее реализация, на наш взгляд, достигнута Ю.А.Урманцевым [41]. По его мнению, ОТС должна дать в руки исследователей своеобразный перечень того, 1) что должно быть, 2) что может быть, 3) чего быть не может для систем — материальных или идеальных. Построенная так ОТС должна быть способной к 1) обобщениям, 2) предсказаниям, 3) объяснениям, 4) постановке новых вопросов, 5) связям с важнейшими теориями и принципами. Развитию идей Ю.А. Урманцева посвящена работа [42].

В настоящей работе мы сделали акцент на одно из фундаментальных свойств сложных систем — их врожденную способность. Термодинамический подход, который использован нами при этом, является наиболее общим на сегодняшний день.

*Работа выполнена по программе МОН РК 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований».*

### Список литературы

- 1 Грицай А.В. Экономика предприятий радиоэлектронной промышленности. — Минск: БГУИР, 2006. — 135 с.
- 2 Садовская Т.В. Экономика предприятий радиоэлектронной промышленности. — Минск: БГУИР, 2007. — 152 с.
- 3 Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. — Минск: Наука и техника, 1977. — 248 с.
- 4 Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. — М.: Изд-во МАИ, 2000. — 364 с.
- 5 Дьяченко А.В. Основания теории трансформационной экономики. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2001. — 120 с.
- 6 Ранев Г.Г. Измерительные информационные системы. — М.: Изд-во МГОУ, 2003. — 536 с.
- 7 Ранев Г.Г., Суротина В.А., Калашников В.И. Информационно-измерительная техника и электроника. — М.: Издат. центр «Академия», 2006. — 512 с.

- 8 Грекул В.И., Денищенко Г.Н., Коровкина Н.Л. Проектирование информационных систем. — М.: Интернет-университет, 2005. — 345 с.
- 9 Колмановский В.Б. Уравнения с последствием и математическое моделирование // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 4. — С. 122–127.
- 10 Volterra V. Theorie of functionals and of integral and integro-differential equations. — London, 1931. — 230 p.
- 11 Беллман Р., Кук К. Дифференциально-разностные уравнения. — М.: Мир, 1967. — 548 с.
- 12 Арутюнян Н.Х., Колмановский В. Б. Теория ползучести неоднородных тел. — М.: Наука, 1983. — 336 с.
- 13 Мышкис А.Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. — М.: Наука, 1972. — 352 с.
- 14 Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. — М.: Наука, 1977. — 383 с.
- 15 Башков А.Б. Методы решения задач оценивания для динамических систем, описываемых дискретными уравнениями Вольтерра: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: 2009. — 111 с.
- 16 Сергеев В.С. Устойчивость в системах с последствием, описываемых интегродифференциальными уравнениями типа Вольтерра: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М.: 2000. — 252 с.
- 17 Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования информационно-измерительных систем. — М.: Физматлит, 2004. — 400 с.
- 18 Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. — М.: Наука, 1997. — 316 с.
- 19 Казаков И.Е., Доступов Б.Г. Статистическая динамика нелинейных автоматических систем. — М.: Физматгиз, 1962. — 240 с.
- 20 Деруссо П., Рой Р., Клоуз И. Пространство состояний в теории управления. — М.: Физматгиз, 1962. — 382 с.
- 21 Юров В.М. Термодинамика люминесцирующих систем // Вестник КарГУ. — Сер. Физика. — 2005. — № 3 (39). — С. 13–15.
- 22 Юров В.М. Свойства малых частиц // Вестник КарГУ. — Сер. Физика. — 2009. — № 2 (54). — С. 41–47.
- 23 Пахомов С.А. Экспансия закона Мура // Компьютер-пресс. — 2003. — № 1. — С. 16–22.
- 24 Дмитриев А.С. Тепловые процессы в наноструктурах. — М.: Физматлит, 2012. — 303 с.
- 25 Энгельс Ф. Диалектика природы. — М.: Госполитиздат, 1953. — 328 с.
- 26 Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. — М.: Наука, 1988. — 522 с.
- 27 Кохановский В. П. Философия и методология науки. — Ростов н/Д.: Феникс, 1999. — 576 с.
- 28 Коротаев А.В., Комарова Н.Л., Халтурина Д.А. Законы истории. Вековые циклы и тысячелетние тренды. Демография, экономика, войны. — М.: УРСС, 2007. — С. 7–47.
- 29 Ранев Г.Г. Измерительные информационные системы. — М.: МГОУ, 2007. — 280 с.
- 30 Ямпурин Н.П., Баранова А.В. Основы надежности электронных средств. — М.: Академия, 2010. — 240 с.
- 31 Дадонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучесть информационных систем. — Киев: Науко. думка, 2011. — 256 с.
- 32 Колесников В.А., Юров В.М. Некоторые аспекты метода аналогий в проектировании информационно-измерительных систем // Современные проблемы науки и образования. Электронный журнал. — 2013. — № 2.
- 33 Розоноэр Л.И. Обмен и распределение ресурсов (обобщенный термодинамический подход) // Автоматика и телемеханика. — 1973. — № 5. — С. 115–133; — № 6. — С. 65–80; — № 8. — С. 82–104.
- 34 Юров В.М., Верховская Е.П., Яворский В.В. Характеристики канала и прогнозные ресурсы коммуникационных систем // Автоматизация и управление: Тр. междунар. науч. конф. — Алматы, 2007. — С. 313–316.
- 35 Богданов А.А. Всеобщая организационная наука (тектология). — Спб., 1912. — 126 с.
- 36 Л. фон Берталанфи. Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем / Ред. В.Н.Садовский, Э.Г.Юдин. — М.: Прогресс, 1969. — С. 23–82.
- 37 Месарович М.Д. Основания общей теории систем // Общая теория систем. — М.: Наука, 1966. — С. 15–48.
- 38 Ланге О. Целое и развитие в свете кибернетики // Исследования по общей теории систем / Ред. В.Н.Садовский, Э.Г.Юдин. — М.: Прогресс, 1969. — С. 181–251.
- 39 Эшби У.Р. Теоретико-множественный подход к механизму и гомеостазису // Исследования по общей теории систем / Ред. В.Н.Садовский, Э.Г.Юдин — М.: Прогресс, 1969. — С. 398–441.
- 40 Уемов А.И. Об одном варианте логико-математического аппарата системного исследования // Проблемы формального анализа систем. — М.: Наука, 1968. — С. 14–48.
- 41 Урманцев Ю.А. Симметрия природы и природа симметрии. — М.: Мысль, 1974. — 229 с.
- 42 Артюхов В.В. Общая теория систем: Самоорганизация, устойчивость, разнообразие, кризисы. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 224 с.

В.А.Колесников, В.М.Юров, Ж.Т.Исмаилов

**Ақпараттық-өлшеуіш жүйелерінің технологиялық мұрасы**

Мақалада ақпараттық-өлшеуіш жүйелерінің технологиялық мұра қасиеттері және текті қабілеттілігі жайлы сұрақтар талқыланды. Тепе-теңдік емес термодинамика көлемінде ақпараттық-өлшеуіш жүйелерінің текті қабілеттілігін анықтауға мүмкіндік беретін формула алынған. Осы формула жүйенің текті қабілеттілігін эксперимент жүзінде есептеуге мүмкіндік береді. Бұл теңдеу белгілі Мур заңының математикалық өрнегі болып табылады. Бірақ Мур заңының ежелгі заманнан келе жатқан интерпретациясына қарағанда «текті қабілеттілік» ұғымы бірінші рет енгізіліп отыр. Сонымен, ақпараттық-өлшеуіш жүйелерінің өміршең циклі және болжамды ресурстары жалпы термодинамика тұрғысынан қарастырылған.

V.A.Kolesnikov, V.M.Yurov, Zh.T.Ismailov

**Technological heredity of information-measuring systems**

In work questions of a technological heredity and knack of information-measuring systems are discussed. Within the limits of nonequilibrium thermodynamics the formula for knack of information-measuring systems is received. The received equation allows to define knack of system experimentally. The received equation is also mathematical expression of the known law of Moore. However, unlike usual interpretations of the law of Moore the equation contains knack that is an essential fact. Questions of life cycle of information-measuring systems and their predicted resources with use of the general laws of thermodynamics are considered.

## References

- 1 Gricay A.V. *Economy enterprises of electronic industry*, Minsk: BSUIR, 2006, 135 p.
- 2 Sadovskaya T.V. *Economy enterprises of electronic industry*, Minsk: BSUIR, 2007, 152 p.
- 3 Yashericin P.I., Rizhov E.V., Averchenkov V.I. *Technological heredity in engineering*, Minsk: Science and Technology, 1977, 248 p.
- 4 Dal'skiy A.M., Bazrov B.M., Vasil'ev A.S. et al. *Technological heredity in the engineering industry*, Moscow: Publishing House of the Moscow Aviation Institute, 2000, 364 p.
- 5 D'yachenko A.V. *Foundations of transformation economy*. — Volgograd: Publishing House of the Volga, 2001, 120 p.
- 6 Raneyev G.G. *Measuring information systems*, Moscow: Publishing House of MGOU, 2003, 536 p.
- 7 Raneyev G.G., Surotina V.A., Kalashnikov V.I. *Information and measuring equipment, and electronics*, Moscow: Publishing Center «Academy», 2006, 512 p.
- 8 Grekul V.I., Denishenko G.N., Korovkina N.L. *Design of information systems*, Moscow: Internet University, 2005, 345 p.
- 9 Kolmanovskiy V.B. *Delay equations and mathematical modeling* // *Soros Educational Journal*, 1996, № 4, p. 122–127.
- 10 Volterra V. *Theorie of functionals and of integral and integro-differential equations*, London. 1931, 230 p.
- 11 Bellman R., Kuk K. *Difference-differential equations*, Academic Press, 1967, 548 p.
- 12 Arutynyan N.H., Kolmanovskiy V.B. *Creep theory of heterogeneous bodies*, Moscow: Nauka, 1983, 336 p.
- 13 Mishkis A.D. *Linear differential equations with retarded argument*, Moscow: Nauka, 1972, 352 p.
- 14 Rabotnov Yu.N. *Elements of hereditary mechanics of solids*, Moscow: Nauka, 1977, 383 p.
- 15 Bashkov A.B. *Problem-solving methods for estimation of dynamic systems described by discrete Volterra equations* // Thesis of the candidate tehn. Science, New York: 2009, 111 p.
- 16 Sergeev V.S. *Stability in systems with aftereffect described integrodifferential equations of Volterra* // Thesis of the candidate tehn. Science, New York: 2000, 252 p.
- 17 Pit'ev Yu.P. *Mathematical modeling methods of information-measuring systems*, Moscow Phizmatlit, 2004, 400 p.
- 18 Samarskiy A.A., Mihaylov A.P. *Mathematical modeling*, Moscow: Nauka, 1997, 316 p.
- 19 Kazakov I.E., Dostupov B.G. *Statistical dynamics of nonlinear automatic systems*, Moscow: Fizmatgiz, 1962, 240 p.
- 20 Derusso P., Roy P., Klouz I. *The state space in control theory*, M.: Fizmatgiz, 1962, 382 p.
- 21 Yurov V.M. *Thermodynamics of luminescent systems* // *Bulletin of KSU, Ser. Physics*, 2005, № 3 (39), p. 13–15.
- 22 Yurov V.M. *Properties of small particles* // *Bulletin of KSU, Ser. Physics*, 2009, № 2 (54), p. 41–47.
- 23 Pahomov S.A. *Expansion of Moore's Law* // *Computer Press*, 2003, № 1, p. 16–22.
- 24 Dmitriyev A.S. *Thermal processes in nanostructures*, Moscow: Phizmatlit, 2012, 303 p.
- 25 Engels F. *Dialectics of Nature*, M.: Gospolitizdat, 1953, 328 p.
- 26 Vernadskiy V.I. *Philosophical thoughts naturalist*, Moscow: Nauka, 1988, 522 p.

- 27 Kohanovskiy B.P. *Philosophy and Methodology of Science*. — Rostov-on-Don. «Phoenix», 1999, 576 p.
- 28 Korotayev A.V., Komarova N.L., Halturina D.A. *Laws of history. Secular cycles and millennial trends. Demography, economics, and war*, M.: URSS, 2007, p. 7–47.
- 29 Raneev G.G. *Measuring information systems*, Moscow: MGOU, 2007, 280 p.
- 30 Yampurin N.P., Baranova A.V. *Fundamentals of reliability of electronic equipment*, Moscow: The Academy, 2010, 240 p.
- 31 Dadonov A.G., Lande D.V. *Survivability of information systems*, Kiev: Naukova Dumka, 2011, 256 p.
- 32 Kolesnikov V.A., Yurov V.M. *Some aspects of the method of analogy in the design of information-measuring systems // Modern problems of science and education. Electronic Journal*, 2013, № 2.
- 33 Rozonoer L.I. *Exchange and allocation of resources (generalized thermodynamic approach) // Automation and Remote Control*, 1973, № 5, p. 115–133, № 6, p. 65–80, № 8, p. 82–104.
- 34 Yurov V.M., Verhovskaya Ye.P., Yavorskiy V.V. *Channel characteristics and probable reserves of communication systems // Proceedings of the Int. scientific. Conf. «Automation and Control», Almaty, 2007, p. 313–316.*
- 35 Bogdanov A.A. *General Organization Science (Tectology)*, St. Petersburg: 1912, 126 p.
- 36 *Ludwig von Bertalanffy General systems theory: a critical review // In.: Research on general systems theory / red. Sadovsky, VN, EG Yudin, Moscow: Progress Publishers, 1969, p. 23–82.*
- 37 Mesarovich M.D. *Foundations of a general theory of systems // In.: General Systems Theory, Moscow: Nauka, 1966, p. 15–48.*
- 38 Lange O. *Whole and in the light of the development of cybernetics // In.: Research on general systems theory / red. Sadovsky, VN, EG Yudin, M.: Progress Publishers, 1969, p. 181–251.*
- 39 Ashby W.R. *The set-theoretic approach to the mechanism and homeostasis // In.: Studies on the general theory of systems / red. Sadovsky, VN, EG Yudin, Moscow: Progress Publishers, 1969, p. 398–441.*
- 40 Ueymov A.I. *A version of the logical-mathematical apparatus system research // In. Problems of formal analysis systems, Moscow: Nauka, 1968, p. 14–48.*
- 41 Urmancev Yu.A. *The symmetry of nature and the nature of symmetry*, Moscow: Thought, 1974, 229 p.
- 42 Artyuhov V.V. *General Systems Theory: Self-organization, sustainability, diversity, crises*, Moscow: Publishing house «LIBROKOM», 2009, 224 p.

УДК 538.95.405

В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая, В.М.Юров, С.А.Гученко

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букедова (E-mail guchen@mail.ru)*

## **Влияние термической обработки на микротвердость и трибологические свойства многофазных покрытий**

В работе обсуждаются вопросы влияния термической обработки на свойства композиционных покрытий. Использовались катоды из стали 12Х18Р10Т и титана. Термическая обработка проводилась при температуре 600°C, которая ниже температуры фазовых превращений. Измерялись микротвердость и коэффициенты трения. Отмечено, что микроструктура покрытий после термической обработки практически не меняется. Изменения микротвердости и коэффициентов трения связаны с окислением железа, входящего в состав покрытия. Предложена модель сухого трения, позволяющая объяснить наблюдаемые эффекты изменением химического потенциала покрытия.

*Ключевые слова:* покрытие, термическая обработка, катод, титан, микротвердость, коэффициент трения, химический потенциал.

### *Введение*

Термическая обработка металлов и сплавов является составной частью многих технологических процессов изготовления деталей в различных отраслях промышленности и, в первую очередь, в машиностроении. Достаточно подробно исследованы структурные изменения, которые протекают при отжиге — предварительной термической обработке, в том числе при гомогенизации, отжиге, уменьшающем напряжения, рекристаллизационном и дорекристаллизационном, а также отжиге, увеличивающем зерно в многочисленных вариантах отжиге с фазовой перекристаллизацией. Для сталей особую роль играют структурные изменения, которые протекают при закалке без полиморфного превращения, закалке на мартенсит. Важную роль играют процессы распада пересыщенных твердых

растворов, а также технологические особенности старения и отпуска. Исследованы структурные изменения, которые протекают при химико-термической, деформационно-термической обработке. В настоящее время интенсивно исследуются процессы микродеформационно-термической, термодинамической, ультразвуковой обработки, роль химически активной среды, параметров деформационного воздействия на структурные превращения, протекающие при комбинированных методах термической обработки, и их связь с изменением механических свойств сплавов [1–3].

Значительно меньше подобных исследований проведено для тонких пленок и покрытий, поскольку, кроме структурных превращений и диффузионных процессов, здесь особую роль начинают играть размерные эффекты, приводящие к резкому отличию фазовых диаграмм и других свойств тонких пленок и покрытий от свойств массивных образцов [4, 5].

Исследование термической обработки деталей с покрытиями необходимо также для определения оптимальной структуры и состава покрытий на деталях, которые в промышленных условиях работают при высоких температурах, например, детали тепловых электростанций и ряд других. Именно этому вопросу и посвящена настоящая работа.

#### *Объекты и методика эксперимента*

В настоящей работе использовались композиционные катоды из стали 12X18P10T и титана. С помощью этих катодов наносились покрытия на установке ННВ — 6.6И1 на стальную подложку при различных технологических режимах. Количественный анализ элементного состава покрытий проводился на электронном микроскопе JEOL JSM-5910, исследование микротвердости композиционных покрытий — на микротвердомере HVS-1000A. Микроструктура покрытий определялась на металлографическом микроскопе Эпиквант. Контроль качества покрытий осуществляется на установке ПККП — 1К методом анодно-поляризационного инициирования дефектов (АПИД). Трибологические исследования проводились на установке, описанной в работе [6]. Отжиг образцов проводился в термопечи на воздухе.

Нами использовалось осаждение многофазных покрытий в условиях ионного ассистирования. Перед нанесением покрытий в вакуумной камере сначала очистка подложек производилась тлеющим разрядом, для чего на подложку подавалось напряжение 1–3 кВ в течение 5–10 мин, затем — ионная очистка.

#### *Результаты эксперимента*

**Контрольный образец.** Контрольный образец без покрытия из стали марки 12X18P10T был испытан на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов. Снимки контрольного образца до и после испытания на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов с увеличением  $\times 400$  представлены на рисунке 1.

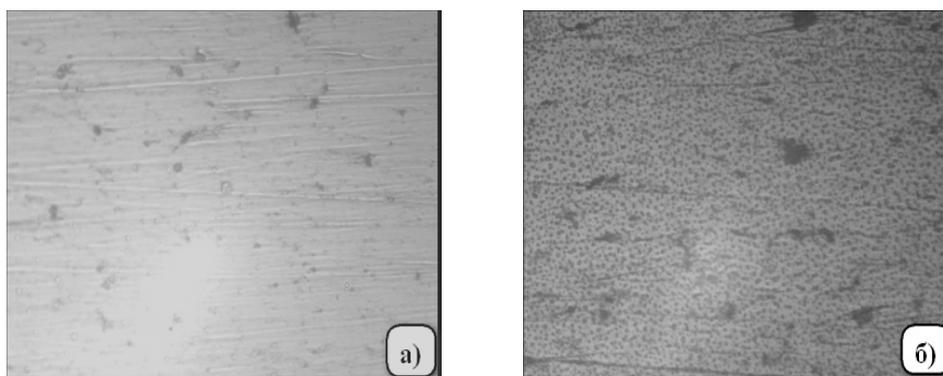


Рисунок 1. Микроструктура контрольного образца: а — до испытания; б — после испытания на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов

В таблице 1 представлены значения микротвердости, а в таблице 2 — коэффициенты трения контрольного образца.

Микротвердость контрольного образца

Кол-во измерений	Микротвердость контрольного образца без покрытия	
	до испытания на жаростойкость	после испытания на жаростойкость
1	305,4	311,1
2	312,5	332,7
3	310,1	363,1
4	317,6	327,0
5	322,9	344,3
6	328,6	368,3
7	319,0	347,5
8	318,1	324,4
9	314,2	372,6
10	309,8	356,4
Ср. арифмет.	315,8	344,7

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты трения контрольного образца

Наименование образца	Коэффициент трения контрольного образца без покрытия	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
до испытания на жаростойкость	0,267	0,256
после испытания на жаростойкость	0,270	0,333

**Покрытие TiN.** Образец с покрытием нитрида титана, напыленный в течение 40 мин при токе дуги  $I_{и} = 80$  А, опорном напряжении  $U_{оп} = 200$ В и давлении газа в камере  $P = 5 \times 10^{-3}$  мм рт. ст, подвергся испытанию на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов. Микроструктура образца показана на рисунке 2, микротвердость и коэффициенты трения — в таблицах 3 и 4 соответственно.

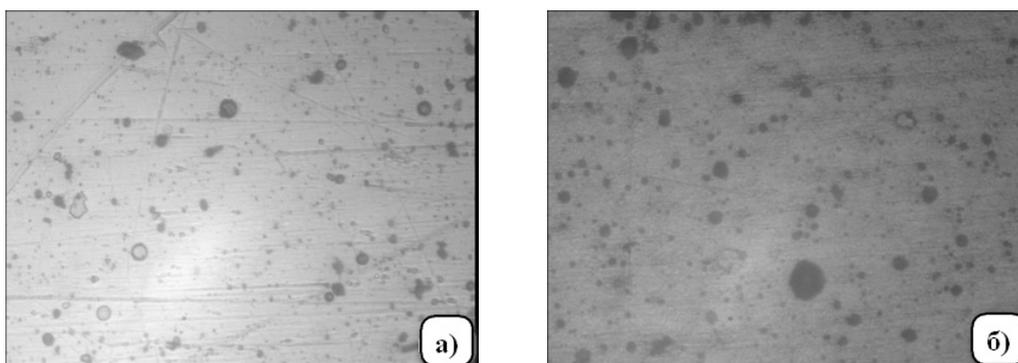


Рисунок 2. Микроструктура нитрид-титанового покрытия образца № 2: а — до испытания; б — после испытания на жаростойкость при температуре 600°С в течение 100 часов

Таблица 3

**Микротвердость образца с покрытием нитрида титана**

Кол-во измерений	Микротвердость покрытия нитрид-титана, HV	
	до испытания на жаростойкость	после испытания на жаростойкость
1	535,5	626,3
2	503,3	508,2
3	416,6	458,8
4	464,3	496,7
5	477,2	597,3
6	526,0	518,0
7	470,3	507,4
8	482,5	496,9
9	424,8	512,5
10	442,9	590,4
Ср. арифмет.	474,3	580,9

Таблица 4

**Коэффициенты трения образца с покрытием нитрида титана**

Наименование образца	Коэффициент трения покрытия нитрид титана	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
до испытания на жаростойкость	0,510	0,436
после испытания на жаростойкость при температуре 600°C в течение 100 часов.	0,362	0,380

**Покрытие 12X18H10T - TiN.** Исследовано послойно нанесенное покрытие, состоящее из: стали марки 12X18H10T в газовой среде аргона и нитрида титана, которое наносилось через каждые 10 мин в течение 40 мин. Микроструктура образца показана на рисунке 3, микротвердость и коэффициенты трения — в таблицах 5 и 6, соответственно.

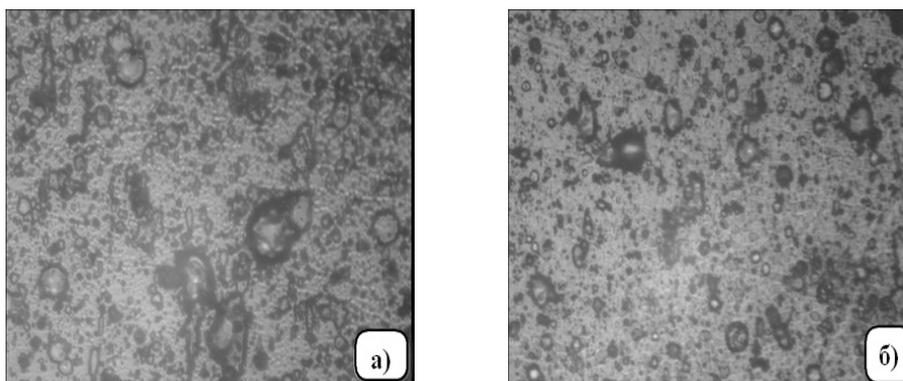


Рисунок 3. Микроструктура покрытия 12X18H10T в газовой среде аргона + TiN (10/10 мин): а — до испытания; б — после испытания на жаростойкость при температуре 600°C в течение 100 часов

Микротвердость образца с покрытием 12X18H10T - TiN

Кол-во измерений	Микротвердость покрытия 12X18H10T в газовой среде аргона + TiN (10/10 мин), HV	
	до испытания на жаростойкость	после испытания на жаростойкость
1	448,9	467,4
2	531,0	395,8
3	471,9	531,7
4	495,2	564,4
5	593,4	500,7
6	545,4	437,4
7	547,2	528,6
8	588,6	369,5
9	591,4	561,5
10	604,7	581,9
Ср. арифмет.	541,7	493,9

Таблица 6

Коэффициенты трения образца с покрытием 12X18H10T – TiN

Наименование образца	Коэффициент трения покрытия 12X18H10T в газовой среде аргона + TiN (10/10 мин)	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
до испытания на жаростойкость	0,331	0,488
после испытания на жаростойкость при 600°C в течение 100 часов	0,354	0,498

**Многофазное, многослойное покрытие.** Был испытан на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов образец из нержавеющей стали с ионно-плазменным покрытием, в составе которого:

- 1) сталь марки 12X18H10T в газовой среде аргона;
- 2) титан в газовой среде аргона;
- 3) нитрид титана;
- 4) сталь марки 12X18H10T в газовой среде аргона;
- 5) титан в газовой среде аргона;
- 6) нитрид титана.

Микроструктура образца показана на рисунке 4, микротвердость и коэффициенты трения — в таблицах 7 и 8, соответственно.

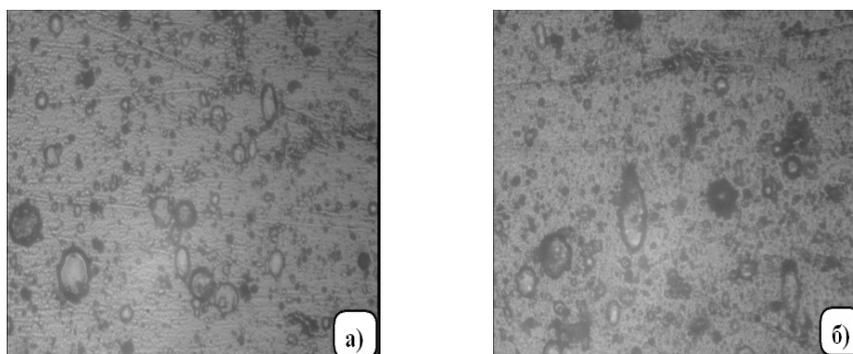


Рисунок 4. Микроструктура сложного покрытия: а — до испытания; б — после испытания на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов

## Микротвердость образца со сложным покрытием

Кол-во измерений	Микротвердость покрытия 12X18H10T Ag (5 мин) + Ti Ag (5 мин) + Ti N (5 мин) + 12X18H10T Ag (5 мин) + Ti Ag (5 мин) + Ti N (15 мин), HV	
	до испытания на жаростойкость	после испытания на жаростойкость
1	419,8	418,3
2	448,4	502,4
3	478,2	477,4
4	490,1	532,5
5	448,6	570,8
6	433,0	534,5
7	434,2	496,9
Ср. арифмет.	456,5	510,1

## Коэффициенты трения образца со сложным покрытием

Наименование образца	Коэффициент трения покрытия 12X18H10T Ag (5 мин) + Ti Ag (5 мин) + Ti N (5 мин) + 12X18H10T Ag (5 мин) + Ti Ag (5 мин) + Ti N (15 мин)	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
до испытания на жаростойкость	0,400	0,414
после испытания на жаростойкость	0,336	0,440

**Покрытие 12X18H10T-Ti - TiN.** Модельный образец из нержавеющей стали с послойным ионно-плазменным покрытием из стали марки 12X18H10T и титана в газовой среде аргона, а затем титана в газовой среде азота, нанесенным через каждые 25 мин в течение 50 мин при токе испарения стального катода  $I_{и} = 60$  А, токе испарения титанового катода  $I_{и} = 80$  А, опорном напряжении  $U_{оп} = 200$  В и давлении газа в камере  $P = 6 \times 10^{-3}$  мм рт. ст., был испытан на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов. Микроструктура образца показана на рисунке 5, микротвердость и коэффициенты трения — в таблицах 9 и 10, соответственно.

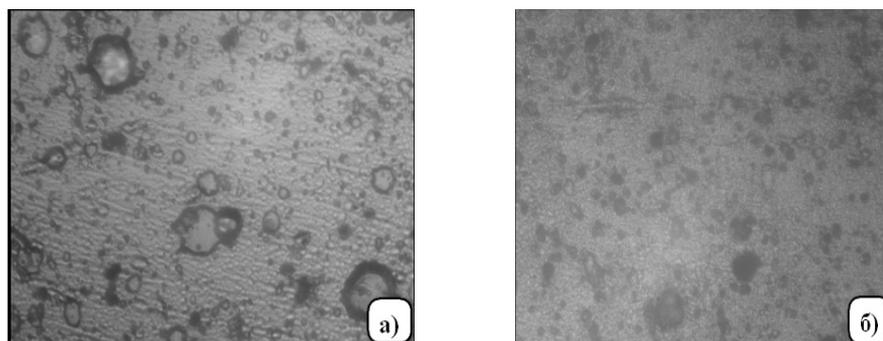


Рисунок 5. Микроструктура покрытия (12X18H10T + Ti)Ag + TiN (25/25 мин):  
а — до испытания; б — после испытания на жаростойкость при температуре 600 °С в течение 100 часов

Микротвердость покрытия 12X18H10T-Ti - TiN

Кол-во измерений	Микротвердость покрытия (12X18H10T + Ti) Ag + Ti N (25/25 мин), HV	
	до испытания на жаростойкость	после испытания на жаростойкость
1	633,5	409,4
2	529,3	515,1
3	524,0	460,1
4	552,1	512,6
5	510,7	490,2
6	538,3	441,5
7	567,6	406,2
8	468,9	403,9
9	600,2	468,9
10	470,7	493,9
Ср. арифмет.	539,5	460,2

Т а б л и ц а 10

Коэффициенты трения покрытия 12X18H10T-Ti - TiN

Наименование образца	Коэффициент трения покрытия (12X18H10T + Ti) Ag + Ti N (25/25 мин)	
	Медная пластина	Алюминиевая пластина
до испытания на жаростойкость	0,417	0,545
после испытания на жаростойкость при температуре 600°C в течение 100 часов	0,325	0,381

*Обсуждение результатов эксперимента*

Прежде всего отметим, что во всех случаях наблюдается увеличение микротвердости покрытия примерно в 1,5 раза по сравнению с микротвердостью основы. Наибольшее значение микротвердости наблюдается у нитрид-титановых покрытий (табл. 3). Температура обработки (600°C) далека от температуры фазовых превращений, так что изменение свойств покрытий может происходить только за счет окисления отдельных компонент покрытия.

Из приведенных выше рисунков следует, что микроструктура нанесенных покрытий практически не претерпевает изменений. Это говорит о том, что термически стимулированные процессы перестройки структуры не происходят из-за низких коэффициентов диффузии элементов покрытия.

В работе [7] в рамках термодинамического подхода для коэффициента сухого трения нами получена следующая формула:

$$k_{mp} = C \cdot T \cdot \frac{A}{\mu} \cdot \bar{N}, \quad (1)$$

где  $A$  — работа (энергия) разрушения;  $T$  — температура;  $\mu$  — химический потенциал металла;  $\bar{N}$  — среднее число элементарных носителей разрушения (пропорциональное числу контактов);  $C$  — постоянная.

Для металлов химический потенциал совпадает с энергией Ферми. Для ее расчета воспользуемся моделью Зоммерфельда, в которой распределение электронов по скоростям описывается статистикой Ферми-Дирака [8]:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} = \frac{50,1 \text{ эВ}}{(r_s / a_0)^2}, \quad (2)$$

где  $k_F$  — волновой вектор Ферми;  $r_s$  — радиус сферы, объем которой равен объему, приходящемуся на один электрон проводимости;  $m$  — масса электрона;  $a_0$  — радиус атома водорода.

В соответствии с этой моделью  $r_s$  вычисляется по формуле

$$r_s = \left( \frac{3}{4\pi n} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

Здесь  $n$  — плотность электронов проводимости, которая равна:  $n = 0,6022 \cdot 10^{24} \frac{Z\rho_m}{A}$ , где  $A$  — относительная атомная масса металла;  $Z$  — число электронов на внешнем уровне металла;  $\rho_m$  — массовая плотность металла ( $\text{г/см}^3$ ). Скорость электронов на поверхности Ферми:

$$v_F = \frac{p_F}{m} = \frac{\hbar k_F}{m} = \frac{4,20}{r_s / a_0} \cdot 10^8 \text{ см/с}. \quad (4)$$

Результаты расчета для ряда металлов представлены в таблице 11.

Таблица 11

Параметры электронов Ферми в некоторых металлах

Металл	$A$ а.е.м.	$Z$	$\rho_m$ $\text{г/см}^3$	$n$ , $10^{22} \text{ см}^{-3}$	$r_s$ , $10^{-8} \text{ см}$	$\epsilon_F$ , эВ	$v_F$ , $10^8 \text{ см/с}$
Li	6,94	1	0,53	4,60	1,63	5,28	1,36
Na	22,99	1	0,97	2,54	1,99	3,54	1,12
K	39,09	1	0,86	1,32	2,47	2,30	0,90
Rb	85,47	1	1,53	1,08	2,65	2,00	0,84
Cs	132,91	1	1,90	0,86	2,85	1,73	0,78
Be	9,01	2	1,85	24,73	0,94	15,85	2,36
Mg	24,31	2	1,74	8,62	1,32	8,00	1,68
Ca	40,08	2	1,54	4,63	1,63	5,27	1,35
Sr	87,62	2	2,60	3,57	1,78	4,43	1,25
Ba	137,34	2	3,5	3,07	1,87	4,01	1,19
Al	26,98	1	2,70	6,03	1,49	6,32	1,49
Ga	69,72	1	5,91	5,10	1,57	5,69	1,41
In	114,82	1	7,31	3,83	1,73	4,68	1,28
Tl	204,37	1	11,85	3,50	1,79	4,38	1,24
Si	28,09	2	2,33	10,0	1,26	8,84	1,76
Ge	72,59	2	5,32	8,83	1,32	8,04	1,68
Sn	118,69	2	7,30	7,41	1,39	7,26	1,60
Pb	207,19	2	11,4	6,63	1,45	6,67	1,53
Cu	63,55	1	8,96	8,49	1,33	7,93	1,67
Ag	107,87	1	10,5	5,86	1,51	6,15	1,47
Au	196,97	1	19,3	5,90	1,50	6,23	1,48
Zn	65,38	2	7,14	13,15	1,15	10,59	1,94
Cd	112,40	2	8,65	9,27	1,29	8,42	1,72
Hg	200,59	2	13,5	8,11	1,35	7,70	1,59
Cr	52,00	1	7,19	8,33	1,34	7,80	1,66
Mo	95,94	1	10,2	6,40	1,46	6,57	1,52
W	183,85	2	19,3	12,64	1,16	10,42	1,92
Mn	54,94	2	7,43	16,30	1,07	12,25	2,08
Tc	98,91	2	11,5	14,00	1,13	10,99	1,96
Re	186,2	2	21,0	13,58	1,14	10,80	1,94
Fe	55,85	2	7,86	16,95	1,05	12,72	2,18
Co	58,93	2	8,9	18,19	1,03	13,22	2,15
Ni	58,71	2	8,9	18,25	1,03	13,22	2,15
Ti	47,90	2	4,51	11,33	1,28	8,53	1,73

Из уравнения (1) следует, что коэффициент сухого трения тем меньше, чем больше химический потенциал (энергия Ферми).

В таблице 12 приведены коэффициенты сухого трения для пар наиболее распространенных материалов [9]. В целом корреляция между таблицами 2 и 3 наблюдается.

**Коэффициенты сухого трения для однородных пар наиболее распространенных материалов**

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения
Алюминий	Алюминий	1.05 - 1.35
Медь	Медь	1.0
Сталь	Сталь	0.8
Железо	Железо	1.0
Кадмий	Кадмий	0.5
Хром	Хром	0.41
Графит	Графит (в вакууме)	0.5 - 0.8
Магний	Магний	0.6
Никель	Никель	0.7 - 1.1
Платина	Платина	1.2
Серебро	Серебро	1.4
Цинк	Цинк	0.6

Последнее означает, что приведенные нами экспериментальные данные говорят о том, что изменение микротвердости и коэффициента трения связано с изменением химического потенциала покрытия. Как отмечалось выше, это возможно при наличии окислов в покрытии, возникающих при их термообработке на воздухе. Поскольку титан и нитриды титана практически не окисляются при таких температурах, сталь 12Х18Н10Т — также, то следует признать, что в покрытии присутствуют примеси легко окисляемых металлов.

*Заключение*

Неконтролируемые примеси в металлах всегда присутствуют в определенных количествах, влияя на их свойства в положительную или отрицательную сторону. Используя формулу (1) и таблицу (12), можно контролировать величину химического потенциала путем использования многоэлементных катодов при нанесении ионно-плазменных покрытий, учитывая аддитивность последнего. Именно такой вывод можно сделать на основе представленных в настоящей работе экспериментальных данных.

*Работа выполнена по программе МОН РК 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований».*

## Список литературы

- 1 Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. — М.: Машиностроение, 1983. — 359 с.
- 2 Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. — М.: МИСИС, 1999. — 416 с.
- 3 Биронт В.С. *Теория термической обработки металлов*. — Красноярск: СФУ: ИЦМиЗ. — 2007. — 739 с.
- 4 Фелдман Л., Майер Д. *Основы анализа поверхности и тонких пленок*. — М.: Мир, 1989. — 344 с.
- 5 Гладких Н.Т., Дукаров С.В. и др. *Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках*. — Харьков: ХНУ, 2004. — 276 с.
- 6 Колесников В.А., Байсагов Я.Ж., Юров В.М. Информационно-измерительный прибор для определения коэффициента трения скольжения // *Фундаментальные исследования*, 2011. — № 12. — Ч. 1. — С. 121–124.
- 7 Юров В.М., Гученко С.А. Некоторые вопросы физики сухого трения // *Вестник КарГУ*. — Сер. Физика. — 2011. — № 1 (61). — С. 44–51.
- 8 Ашкрофт Н., Мермин Н. *Физика твердого тела*. Т 1. — М.: Мир, 1979. — 399 с.
- 9 Крагельский И.В., Виноградова И.Э. *Коэффициенты трения*. — М.: Машгиз, 1962. — 220 с.

В.Ч.Лауринас, О.Н.Завацкая, В.М.Юров, С.А.Гученко

## Микроқаттылыққа және көпфазалы жамылғылардың трибологиялық қасиеттеріне термиялық өңдеудің әсері

Мақалада композициялық жамылғылардың қасиеттеріне термиялық өңдеу әсерінің сұрақтары талқыланды. Титан және 12Х18Р10Т болаттан жасалған катодтар пайдаланылды. Термиялық өңдеу 600<sup>0</sup> С температурада, фазалық түрленулер температурасынан төмен температурада, өткізілді. Үйкеліс коэффициенттері және микроқаттылық көрсеткіштері өлшенді. Микроқұрылымдық жамылғылар термиялық өңдеуден кейін өзгеріске ұшыраған жоқ. Микроқаттылықтың өзгерісі және үйкелес коэффициенттері жамылғының құрамына енген темір тотығымен байланысты. Жамылғының химиялық потенциалының өзгерісі бақыланатын әсерлерін түсіндіруге рұқсат етілген құрғақ үйкеліс үлгісі ұсынылды.

V.Ch.Laurinas, O.N.Zavatskaya, V.M.Yurov, S.A.Guchenko

## Influence of thermal processing on microhardness and tribological properties of multiphase coverings

In work questions of influence of thermal processing on properties of composite coverings are discussed. Cathodes from a steel 12X18P10T and the titan were used. Thermal processing was spent at temperature 600°C, which below temperature of phase transformations. Microhardness and friction factors were measured. The microstructure of coverings after thermal processing practically does not vary. Changes of microhardness and friction factors contacts oxidation of the iron which is a part of a covering. The model of the dry friction, allowing to explain observable effects is offered by change of chemical potential of a covering.

### References

- 1 Lahtin J.M. *Metallurgical science and thermal processing of metals*, Moscow: Mechanical engineering, 1983. — 359 p.
- 2 Kolachev B.A., Ye.Elagnn V.I., Livanov V.A. *Metallurgical science and thermal processing of nonferrous metals and alloys*, Moscow: MISIS, 1999, 416 p.
- 3 Biront V.S. *The theory of thermal processing of metals*, Krasnoyarsk: SFU: ICMiZ, 2007, 739 p.
- 4 Feldman L., Mayer Д. *Bases of the analysis of a surface and thin films*, Moscow: Mir, 1989, 344 p.
- 5 Gladkih N.T., Dukarev S.V., etc. *The superficial phenomena and phase transformations in thin films*, Kharkov: KhNU, 2004, 276 p.
- 6 Kolesnikov V. A., Bajzagov J.Z., Yurov V.M. *The information-measuring device for definition of factor of a sliding friction* // Basic researches, 2011, № 12, part 1, p. 121–124.
- 7 Yurov V.M., Guchenko S.A. *Some questions of physics of a dry friction* // Vestnik KarGU. Physics, 2011, № 1 (61), p. 44–51.
- 8 Ashcroft N., Mermin N. *Physics of a solid state*, vol. 1, Moscow: Mir, 1979, 399 p.
- 9 Kragelskiy I.V., Vinogradova I.E. *Friction factors*, Moscow: Masgiz, 1962, 220 p.

<sup>1</sup>С.В.Самоделкина, <sup>2</sup>Г.Г.Таткеева, <sup>2</sup>Г.Ш.Оразгалиев, <sup>2</sup>В.И.Эйрих,  
<sup>2</sup>А.Д.Мехтиев, <sup>2</sup>В.В.Югай

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи;  
<sup>2</sup>Карагандинский государственный технический университет  
(E-mail: barton.kz@mail.ru)

## **Влияние отказов на процессы управления телекоммуникационной системой и передачи информации в ней**

В статье рассматриваются вопросы управления устранением последствий отказов и их локализация. Показано влияние отказов на процесс передачи и распределения информации, на надежность функционирования и методы восстановления системы связи. Приведены методики обеспечения устойчивости узлов к сбоям. Предложена классификация сбоев, алгоритмы восстановления нормального функционирования системы, которые зависят от источников проблемы. Описана стратегия для обеспечения устойчивости сети связи.

*Ключевые слова:* надежность сетей связи, локализация отказов, классификация сбоев, восстановление системы, отказоустойчивость сети, процесс управления.

За последние 10–15 лет произошли существенные изменения в инфраструктуре телекоммуникационных систем и инфокоммуникационных технологий. В современных условиях конвергенции информационных технологий и средств связи корпоративные сети становятся более сложными, как по архитектуре, так и по предоставляемым услугам.

Учитывая необходимость повышения предоставления услуг, новые приложения — а это мультимедийные приложения, а также приложения, адаптируемые к требованиям пользователя, — становятся неотъемлемой частью всех процессов в работе телекоммуникационных систем. В этой новой среде функция управления технологиями перемещается из парадигмы сетевых функций в парадигму функций приложений. Несмотря на такой сдвиг, новый фокус повышает значимость сети, потому что качество и надежность функционирования сети в конвергентной среде с возможностью круглосуточного доступа непосредственно связаны с качеством передачи (QoS).

Поставщикам услуг необходимо поддерживать непрерывность услуг и соответствующее качество передачи для выполнения строгих обязательств перед пользователями. Надежность обслуживания должна быть предусмотрена на уровне каждого элемента сетевого проекта. Это необходимо для защиты услуг от сбоев, обусловленных неисправностью аппаратных средств, IP-маршрутизации, или канальными отказами, а также для защиты от злонамеренных DoS-атак (отказ от обслуживания), при модификации программного обеспечения или от ошибок конфигурирования маршрутизатора. От поставщиков услуг требуется обеспечить минимизацию дорогостоящего времени простоя систем путем быстрого и эффективного диагностирования и устранения проблем.

В современных цифровых сетях для управления активно используется мониторинг. Система мониторинга предназначена для реализации принципов управления эксплуатационной работой отдельной сети связи за счет автоматизации функций контроля и мониторинга работоспособности оборудования, состояния связи между объектами, качества передачи информации между абонентами, а также функций управления оборудованием и ресурсами сети.

Получение полной и достоверной информации о состоянии объектов мониторинга сети связи всегда было актуальной задачей. Такую возможность можно получить только при использовании надежной связи и оборудования, что не всегда удается. Если произойдет отказ оборудования или прерывание связи на участке сети в направлении от объекта мониторинга к серверу мониторинга, в полученных данных появляются «провалы», вызванные неполучением откликов на запрос состояния определенных ресурсов удаленных объектов. В результате, в случае прерывания связи с объектом, администратор сети может сделать неправильные выводы о качестве работы сети [1].

Решения сетевого управления принимаются на основе информации, полученной из систем мониторинга в сети (например, с помощью Simple Network Management Protocol [SNMP]). Однако для того чтобы сделать независимое решение о характере проблем и реакции на них, нужно использовать более широкий спектр информации, чем необходимые данные для разрешения проблемы сети связи.

Помимо традиционной информации мониторинга сети иногда может быть использована внешняя информация о ситуации.

На гарантированное предоставление услуг «всегда на связи» влияют три основные операционные области:

- уменьшение числа сетевых отказов;
- своевременная локализация отказов;
- отработанные процедуры эксплуатации технического обслуживания.

Диагностика отказов является центральным аспектом управления отказами в сетях связи. Так как неисправности неизбежны в системах связи, их быстрое обнаружение и изоляция играют важную роль для прочности, надежности и доступности системы. В больших и сложных сетях связи автоматизация диагностики имеет решающее значение при работе оператора связи с приложениями по управлению сетью и услугами [2]. Для этого используются инструментальные средства ОАМ (Operations Administration Maintenance — эксплуатация, управление и техническое обслуживание), которые позволяют устанавливать упреждающие политики контроля, эффективно выполнять конфигурирование услуг, применять политики верификации и расширенные процедуры локализации отказов для обеспечения быстрого восстановления работы системы связи.

Правильная услуга предоставляется, когда служба реализует функции системы. Сбой системы является событием, которое происходит, когда предоставляемая услуга отклоняется от правильного обслуживания и это не соответствует спецификации. Отказ является переходом от правильной услуги к неправильному обслуживанию, т.е. не выполняется функция системы связи.

Сбой происходит, когда ошибка достигает интерфейса сервиса и видоизменяет службы. Система состоит из множества взаимодействующих компонентов, поэтому состояние системы связи является множеством состояний его компонентов. Неисправность первоначально вызывает ошибку в состоянии одного (или более) компонентов, но сбой системы не произойдет, пока ошибка не достигнет интерфейса системы. Ошибка считается обнаруженной, если ее присутствие в системе указывается в сообщении об ошибке или при наличии сигнала рассогласования, который появляется в системе. Ошибки, которые присутствуют, но не обнаружены, являются скрытыми [3].

Анализ процессов функционирования сетей связи позволяет произвести оценку влияния отказов на процесс передачи и распределения информации, на надежность функционирования сетей связи.

К числу основных факторов отказов в сетях связи относятся следующие:

- отказы и восстановления технических средств;
- естественные помехи;
- искусственные помехи;
- разрушающие искусственные воздействия;
- ошибки программного обеспечения СС;
- отказы, вызванные деятельностью человека;
- отказы, вызванные природными явлениями.

Классификация сбоев и понимания их природы является существенным, если необходимо разработать систему, которая способна функционировать, несмотря на сбои и отказы в сети связи.

Основные направления для правильной и точной классификации сбоев и дальнейшего восстановления системы следующие:

- классификация отказов должна быть независима от какой-либо конкретной системы, т.е., применима к любой системе;
- классификация отказов должна быть как можно более подробной; единственное ограничение в подробности – разделения в значимых классах, которые могут быть использованы для выявления надлежащего набора методов по обнаружению сбоев, характерных для данного класса;
- обработка отказов является шагом, который следует после их обнаружения, а также последствием сбоев, которые следует рассматривать в качестве второго этапа, так как они могут потребовать дополнительной детализации и анализа [4].

Процесс восстановления включает в себя четыре основные группы: модель сбоев, реакцию системы на них, функциональный цикл работы и цикл восстановления.

Модель сбоев — это основа для разработки алгоритмов восстановления системы. Она базируется на спецификации системы определять ее устойчивость к различным видам отказов. В общем слу-

чае важны следующие характеристики: длительность сбоев, их симптомы и источники, степень поражения системы, профиль ожидаемых сбоев.

По длительности сбои можно разделить на три категории:

- постоянные — устраняются по мере возникновения;
- временные — появляются нерегулярно и приводят к кратковременному снижению производительности системы связи или полному отказу сервисов. При высокой частоте возникновения они могут оказывать существенное влияние;
- короткие — приводят к малым потерям производительности или непродолжительным отказам сервисов, устраняются автоматически.

Симптомы отказов могут значительно отличаться друг от друга. Для обеспечения устойчивости узлов к сбоям применяется одна из двух методик: обмен информацией о проблемах между узлами сети или устранение отказов автоматически. В первом случае достоинством является то, что информация поступает в другие узлы сети. Это позволяет включить их в процесс устранения сбоев. Если же симптомы известны и отказ устранен в самом узле, то это делается автоматически.

Также важную роль играют последствия сбоев. Некоторые из них могут привести к немедленному отказу узла и, следовательно, к разрыву соединения, тогда как другие могут лишь обозначить «узкое» место системы.

Выбор алгоритмов восстановления нормального функционирования системы зависит и от источников проблемы. Система может реагировать по-разному на локальные сбои внутри узла и на проблемы, вызванные внешними причинами. Основная сложность в определении источника сбоя состоит в том, что часто одни сбои влекут за собой другие.

Степень поражения системы описывает важный аспект построения отказоустойчивых систем. Отдельные проблемы могут касаться только программных модулей, другие охватывают всю систему в целом. По степени воздействия возникающие отказы можно разделить на два класса.

1. «Жесткие» сбои. Этот вид характеризуется полным отказом системы. Например, разрыв соединения при отказе маршрутизатора.

2. «Мягкие» сбои. В этот класс входят сбои, которые вызывают негативные последствия, но не приводят к отказу всей системы. Например, высокий коэффициент ошибок на физическом уровне приводит к возникновению «узкого места». При появлении «мягких» сбоев применяется техника постепенного снижения показателей. Она заключается в контролируемом снижении функциональности или производительности системы. Это позволяет обеспечить определенный уровень работы системы вместо ее полного отказа [5].

Сбои могут быть упорядочены с помощью профилей ожидаемых сбоев, которые показывают, какие неисправности возможны в сети. Количественная оценка возможных сбоев и их последствий может отличаться в различных сетях.

Для адекватной реакции на сбои система должна их правильно идентифицировать. Процесс реакции системы на сбой включает в себя следующие аспекты:

- идентификация сбоев;
- снижение показателей;
- реакция на сбой;
- восстановление.

На сегодняшний день существуют различные подходы к классификации процесса идентификации сбоев: исключительно внутри компонента, непрерывно сравнивая с резервным работающим компонентом, контроль от узла к узлу и проверка с помощью диспетчера («ведущей станцией»). Эти подходы, в свою очередь, могут основываться на разных методиках. Контроль может быть пассивным и активным. При этом используются различные аудит-тесты, повторные вычисления, применяемые как самостоятельные тесты. Также возможны online-тесты, которые специально стимулируют сбой системы для контроля распознавания отказов.

Даже если проблема правильно идентифицирована, не всегда можно восстановить работоспособность системы в полном объеме. Особенно это часто встречается при «мягких сбоях» (например при высокой нагрузке), что ограничивает функциональность телекоммуникационной системы. С помощью методики снижения показателей можно обеспечить выполнение критических сервисов.

Реакция системы по устранению обнаруженной проблемы может быть очень различной. К online-мероприятиям, которые могут применяться в уже работающей системе, можно отнести сле-

дующие: возврат (откат) к контрольной точке, прогон, с одновременной коррекцией сбоев, повторное выполнение операций, которые были подвержены сбоям (или с теми же самыми или с другими ресурсами). Наряду с этим существуют меры, которые для проведения требуют только режима реального времени: реконфигурация архитектуры системы («на лету», с перезагрузкой), выполнение альтернативных задач (включая контролируемое завершение задач) и запрос ресурсов от внешних систем. Реакция системы на сбой может быть либо превентивной (например регулярные перезагрузки), проактивной (при появлении признаков сбоев) или реактивной (только при конкретных проявлениях сбоев).

После реакции системы на сбой необходимо восстановить ее нормальную работу.

Для этого могут потребоваться дополнительные ресурсы. Например, процедура восстановления может включать в себя инициализацию этих ресурсов.

Обнаружение и локализация сбоев являются одними из ключевых процессов восстановления системы. Среднее время на определение причин сбоя и его локализацию (mean-time-to-cause-and-location (MTTL)) [6] во многом определяет общее среднее время на восстановление системы.

Симптомы сбоев могут быть неоднозначными, непостоянными и неполными. Неоднозначность может возникать из-за схожести или идентичности симптомов для различных проблем. Непостоянство является следствием того, что для одних устройств какие-то компоненты работают неправильно, а для других эти же компоненты нормально функционируют. Из-за задержки или потери сообщений симптомы сбоев могут быть неполными. Задача системы локализации сбоев — справиться с этими факторами и принять непротиворечивое решение.

Возможна правильная интерпретация ненадежных данных для обнаружения сбоев с помощью систем, основанных на использовании предыдущих статистических сведений об ошибках в системе. Для точной локализации сбоя используются зависимости внутри сети, текущие конфигурации, информация о действующих сервисах и других неисправностях. Если симптомы кратковременны или система локализации сверхчувствительна, то могут возникать ложные срабатывания. Следовательно, система локализации сбоев в определенной степени ненадежна, что тоже следует учитывать.

*Способность к определению причин сбоев.* Зачастую, не только зависимые, но и независимые сбои могут возникать практически одновременно. Это ведет к совпадению сообщений о возникших неисправностях. Следовательно, нужно выделять причины сбоев и устранять их независимо.

В связи с этим предлагается описание цикла управления, определяющего необходимые концептуальные компоненты для обеспечения устойчивости телекоммуникационной системы.

Данная концепция устойчивости построена на основе работы J.P.G.Sterbenz др. [7], когда ряд принципов отказоустойчивости определяется стратегией сопротивляемости и называется  $D^2R^2 + DR$ : защита (defense), обнаружение (detection), исправление (rectification), восстановление (recovery), диагностика (diagnosis) и повышение качества (refinement). Стратегия описывает управление в реальном времени. Она позволяет проводить динамическую адаптацию сетей с учетом определенных задач, операции управления отображают прошлый оперативный опыт, а в режиме off-line цикл управления направлен на улучшение структуры сети.

Эта стратегия представляет собой системный подход к разработке отказоустойчивости сети. В ее основе лежит процесс управления, содержащий ряд концептуальных компонентов, которые реализуют в режиме реального времени аспект стратегии  $D^2R^2 + DR$ , и поэтому вводят в действие отказоустойчивость сети. Другие необходимые элементы, входящие в состав цикла управления устойчивости, являются производными, например устойчивость метрик, понимание проблем и рисков, распределение базы данных, основы политики управления.

На основе компонента стратегии в режиме реального времени  $D^2R^2 + DR$  был разработан процесс управления отказоустойчивостью, изображенный на рисунке, в котором контроллер вводит входные данные в систему под контроль, для того чтобы надлежащим образом управлять системой и ее выходными данными до желаемого эталонного значения.

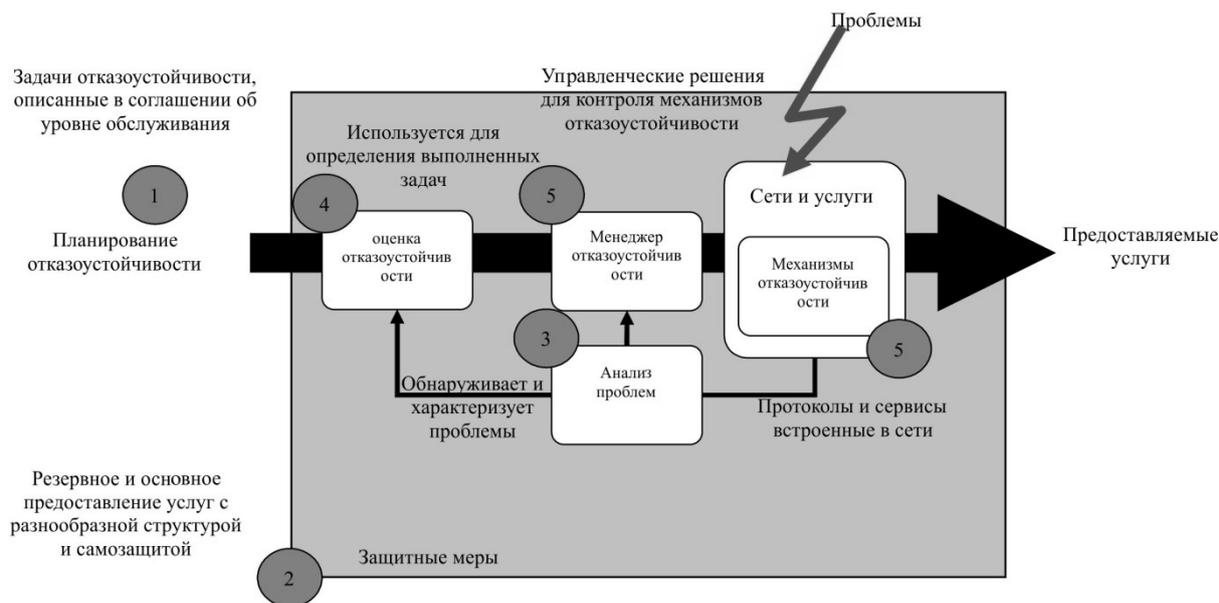


Рисунок. Процесс управления устойчивостью: происходит в режиме реального времени в компоненте стратегии устойчивости  $D^2R^2 + DR$

Цикл управления формирует основу системного подхода к отказоустойчивости сети и определяет необходимые компоненты, которые являются производными. Их действия указаны на рисунке под соответствующими номерами.

1. Эталонное значение, которое стремятся достичь, выражается условием нормы устойчивости сети и описывается с помощью параметров устойчивости. Задачи отказоустойчивости отражают требования конечных пользователей, операторов сетей и поставщиков услуг.

2. Защитные меры должны быть приняты на месте активных действий для смягчения последствий проблем в сети и должны сохранить способность сети реализовать задачу устойчивости. Процесс определения задач, которые следует рассматривать в этой стратегии защиты (например, тех, которые происходят чаще и имеют поэтому большое влияние), является необходимым.

3. Несмотря на защитные меры, некоторые проблемы могут вызвать отклонение от норм устойчивости услуг, предоставляемых пользователям. Эти проблемы могут включать в себя непредвиденные атаки или неправильные конфигурации. Анализ компонентов позволяет обнаружить и охарактеризовать их, используя различные источники информации.

4. На основании анализа проблем делается вывод о состоянии сети, выполняется оценка устойчивости, определяется выполнение задачи отказоустойчивости сети в целом. Эта мера основана на отказоустойчивости показателей и зависит от механизмов эффективности защиты и восстановления при реагировании на вызовы.

5. Результаты выполнения анализа оценки устойчивости подаются менеджеру отказоустойчивости. И тогда ответственность за контроль устойчивости берут на себя механизмы, встроенные в инфраструктуру сети для обслуживания, чтобы сохранить предоставление необходимого уровня обслуживания и обеспечить постепенное уменьшение его возможностей при воздействии массовых угроз, а не обрыв связи. Эта адаптация направлена на использование сведений об отказоустойчивости, таких как политика и проблемы моделей сетей. Если проблема ослабевает, то расходы на восстановление неизбежной деградации качества обслуживания (QoS) уменьшаются. Следовательно, сеть должна восстанавливаться в нормальный режим работы после того, как проблема будет прекращена. Целью данного процесса в стратегии  $D^2R^2 + DR$  является улучшение работы схемы управления устойчивостью, потому что она соответствует идеализированной работе системы. Такое улучшение могло быть реакцией на требование спроса, что приводит к новым нормам отказоустойчивости, новым проблемам и снижению эксплуатационных качеств. На стадии распознавания определены области для улучшения, в том числе защитные, которые вводятся в действие благодаря обработке.

Была разработана распределенная база данных проблем и их последствий (Distributed Store for Challenges and their Outcome — DISCo), которая использует шаблон подписи сообщения для распространения информации между подсистемами в режиме реального времени. Такая информация пояс-

няет действия, выполняемые для обнаружения и устранения проблем. Источники информации могут сообщать больше данных, чем можно передать по сети, особенно в процессе вхождения. DISco способен объединять информацию из различных источников для решения этой проблемы. Разрывание компонентов источников информации позволяет использовать обработку проблем анализа компонентов без необходимости изменять источники информации. Вспомогательные механизмы двух этапов цикла управления DISco используют распределенную систему для долгосрочного хранения данных, которая знает о доступной емкости хранения и спроса.

**Вывод.** При управлении устранением последствий отказов решаются задачи контроля за состоянием сети и ее элементов в реальном масштабе времени; обнаружения и локализации неисправностей; восстановления связей; оперативного перестроения сети; устранения неисправностей; оповещение пользователей о проводимых работах.

### Список литературы

- 1 *Дмитриев В.Н., Тушинов А.С., Сергеева Е.В.*, Повышение эффективности системы мониторинга многозвенной сети передачи данных // Вестник АГТУ. — 2012. — №2.
- 2 *Małgorzata Steinder, Adarshpal S. Sethi* — A survey of fault localization techniques in computer networks — Science of Computer Programming 53, 2004. — P. 165–194.
- 3 *A. Avizienis, J.-C. Laprie and B. Randell*: Fundamental Concepts of Dependability. Research Report № 1145, LAAS-CNRS, April 2001.
- 4 *A. Bondavalli, L. Simoncini* — Failure Classification with respect to detection — IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS. — 1990. — P. 47–53.
- 5 *Paradis Lilia, Qi Han*, A Survey of Fault Management in Wireless Networks // Journal of Network and Systems Management. — № 9. — 2007.
- 6 *Smith P. et al.* Strategies for Network Resilience: Capitalizing on Policies. *AIMS 2010*. — Zurich, Switzerland. — 2010. — June. — P. 118–22.
- 7 *J.P. G. Sterbenz et al.* Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines. *Elsevier Compute. Networks*. Special Issue on Resilient and Survivable Networks. — Vol. 54. — № 8. — 2010. — June. — P. 33–42.

С.В.Самоделькина, Г.Г.Таткеева, Г.Ш.Оразғалиев, В.И.Эйрих, А.Д.Мехтиев, В.В.Югай

### **Телекоммуникациялық жүйені басқару және ақпаратты беру үрдістеріне қабылдамаудың әсері**

Мақалада қабылдамау әсерлерін жою және оларды локализациялауды басқару мәселелері қарастырылды. Жұмыс істеу беріктігіне, ақпаратты беру және тарату үрдісіне, байланыс жүйесін қайта іске асыру әдістеріне қабылдамау әсері сипатталды. Түйінділердің істен шығуының тұрақтылығын қамтамасыздандыру әдістері келтірілді. Проблемалар көздеріне байланысты жүйенің қалыпты қызмет ету алгоритмдері және істен шығу классификациясы ұсынылды. Жүйенің қызмет көрсетуінің тұрақтылығын қамтамасыз ету стратегиясы берілді.

S.V.Samodelkina, G.G.Tatkeyeva, G.Sh.Orazgaliyev, V.I.Eirikh, A.D.Mekhtiyev, V.V.Yugai

### **Influence of failure on telecommunication system and information transmission controlling processes**

Questions of failures' consequences and their localization management are reviewed in this article. The influence of failures on the process of transmission and distribution of information and also on operational reliability and communication system's recovery methods are reviewed. Methods of nodes' failure sustainability are listed. A classification of faults is proposed, as well as recovery algorithms for normal functioning of the system, these algorithms depend on the source of the problem. Describe strategies to ensure sustainability of the network connection.

## References

- 1 Dmitriyev V.N., Tushnov A.S. Sergeyeva Ye.V. *Improvement of monitoring system of multi-tier data transmission network. Messenger of AGTU*, № 2, 2012.
- 2 Małgorzata Steinder, Adarshpal S. Sethi — *A survey of fault localization techniques in computer networks* — Science of Computer Programming 53, 2004, p. 165–194.
- 3 Avizienis A., J.-C.Laprie and B. Randell: *Fundamental Concepts of Dependability*. Research Report № 1145, LAAS-CNRS, April 2001.
- 4 A.Bondavalli, L. Simoncini — *Failure Classification with respect to detection* — IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, 1990, p. 47–53.
- 5 Paradis Lilia, Qi Han, *A Survey of Fault Management in Wireless Networks*, *Journal of Network and Systems Management*, № 9, 2007.
- 6 Sterbenz J.P.G. et al. *Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines*. Elsevier Compute.' Networks. Special Issue on Resilient and Survivable Networks, Vol. 54, № 8, June 2010, p. 33–42.
- 7 Smith P. et al. *Strategies for Network Resilience: Capitalizing on Policies*. AIMS 2010. Zurich, Switzerland, June 2010, p. 118–22.

ӘОЖ 533.9.01

Ә.Ү.Үмбетов, Б.С.Садықова

*Ы.Алтынсарин атындағы Арқалық мемлекеттік педагогикалық институты  
(E-mail: umbetov.a@mail.ru)*

## Лазерлік өлшегіш құралдар

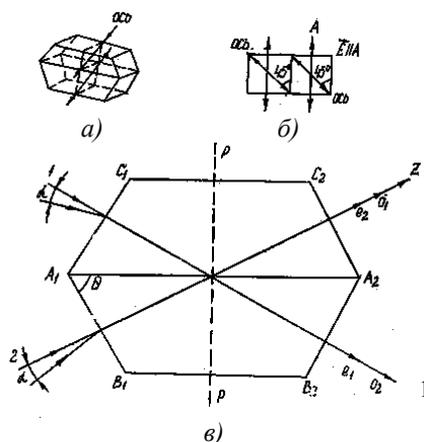
Кристалды-оптикалық жүйелердің негізінде лазерлік өлшегіш құралдарды құрастыру когерентті оптика мен электрониканың заманауи қолданыстарының мысалы болып табылады. Ондай жүйелердің беретін поляризациялық жарықтар интерференцияларының қасиеттерін пайдалана отырып, әр түрлі мақсаттарда қолданылатын лазерлік өлшегіш құралдарды құрастыруға болады. Мақалада осы мақсатты іске асыруға бағытталған лазерлік өлшегіш құралдарды құру жұмысы баяндалған. Сонымен қатар бір осьті кристалдан жасалған биполяризаторда (БП) таралатын электромагнитті толқындарды есептеу әдісі келтірілген. БП қасиеттерін талдауға ыңғайлы өрнектер алынған. БП беретін интерференциялық жолақтардың кеңістік жиілігінің БП-ның кіріс қабырғасына лазер сәулелерінің түсу бұрышына тәуелділігі белгіленген.

*Кілтті сөздер:* лазер, құралдар, биполяризациялар, призма, интерферометр.

Мақаланың мақсаты — бір осьті кристалдың негізінде жасалынған әр түрлі призмалар мен линзалардың көмегімен лазерлік өлшегіш құралдарды құрастыру және оларды тәжірибеде қолдану. Бұрын бір осьті кристалдардан құралған призмалар (Рошон, Сенармон, Воллостон т.с.с.) негізінде табиғи жарық көздері қолданылған поляризациялық интерферометрлер қолданылған [1–3]. Олардың мақсаттары және беретін нәтижелері басқаша. Ұсынылған жұмыстағы лазерлік өлшегіш құралдардың жұмыс істеу принципі жетілдірілген және жарық көзі ретінде лазерлер қолданылатындықтан, интерференциялық суреттердің айқындылығы мен сезімталдығы өте жоғары.

Жұмыстың міндеттері әрбір лазерлік өлшегіш құралдардың жұмыс принциптеріне жеке тоқталып олардың қолданылу бағыттарын көрсету болып табылады.

Исланд шпатынан ( $\text{CaCO}_3$ ) жасалынған бір осьті кристалдардың көмегімен әр түрлі линзалар немесе призмалар құрастыруға болады. Бұл элементтер өз кезегінде әр түрлі мақсаттағы лазерлік өлшегіш құралдарын құруға мүмкіндік береді. Солардың бірі биполяризатор (БП). БП (1-сур., а) — қабырғалары бірдей трапеция тәріздес бір осьті кристалдан жасалынған екі призманың жиыны (Доуве призмасы).



1-сурет. Биполяризатор құрылысы: а — жалпы түрі; б —  $P$  жазықтықтағы қимасы; в — биполяризатордағы  $o$  (кәдімгі) және  $e$  (кәдімгі емес)-сәулелердің өту схемасы

БП үлкен негізі ( $A_1A_2$ ) сыну көрсеткіші  $n_e < n_k < n_0$  аралығындағы желіммен жапсырылған. Құрамды призмалардағы оптикалық осьтер призма негізіне перпендикуляр орналасқан, өзара параллель және жапсырылған жазықтықпен  $45^\circ$  бұрыш құрайды (1-сур., б). Оптикалық осьтердің осылай орналасуы лазерлермен жұмыс істеуге ыңғайлы. Лазер сәулесінің  $E$  векторы вертикаль бағытталған жағдайда ( $A$  қабырғасына параллель)  $A_1 C_1$  қабырғасына нормаль түскен бірінші лазер сәулесі  $o$ - және  $e$ -сәулелерге жіктеледі.  $O$ -сәулесі желім қабатынан толық ішкі шағылуға ұшырайды. Екінші лазер сәулесі  $A_1B_1$  қабырғасына түссе,  $e$ -сәулесі  $z$  осі бойымен тарайды.  $O$ - және  $e$ -сәулелері БП шығысында интерференцияланады. БП қандай да бір  $\alpha$  аз бұрышқа бұрсақ,  $o$ -және  $e$ -сәулелер БП шығысында ығысуға ұшырайды. Анализатордың көмегімен  $o$ -және  $e$ -сәулелерінің тербелісін бір жазықтыққа келтіргенде интерференция құбылысы пайда болады. Бұл кезде БП бұрылу бұрышы келесі өрнекпен анықталады:

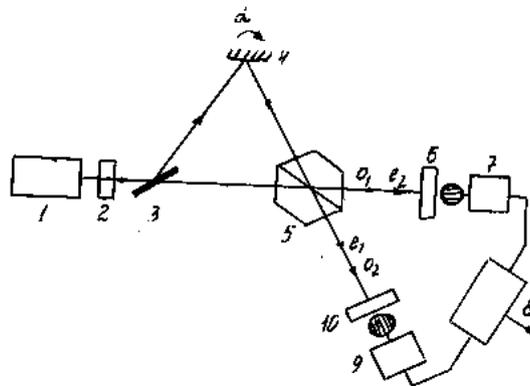
$$\alpha \leq \frac{r \operatorname{ctg} \theta}{\left\{ e + 2\alpha \cos \theta \left( \frac{1}{n_e} - \frac{1}{n_0} \right) \right\}^2 + \alpha^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \frac{1}{n_e^2} \left( 1 - \frac{n_e^2}{n_0^2} \right)^2 }^{1/2}}, \quad (1)$$

мұндағы  $r$  — қабаттасқан сәулелер шеңберінің радиусы;  $2a, l, \theta$  — БП параметрлері, жалпы негізінің ұзындығы, бүйір жағының ұзындығы, негізіндегі бұрыш (1-сур., в).

Исланд шпатынан жасалынған БП үшін  $a = 12$  мм,  $l = 11$  мм,  $\theta = 65^\circ$ . Сонда (1) өрнектен  $r = 3$  мм болғанда  $\alpha \leq 3^\circ$  мәнін аламыз. Интерференциялық сурет бір-бірінен қашықтықтары бірдей өзара параллель жолақтардан тұрады. Жолақтар БП қабырғасына параллель ( $A$  жазықтығына, 1-сур., б)

араларының қашықтығы  $\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha}$  шамасындай болады, мұндағы  $\lambda$  — жарықтың толқын ұзындығы.

Осы нәтижелер БП денелердің өте аз бұрышқа бұрылуын анықтау үшін қолдануға мүмкіндік береді. БП көмегімен екі каналды поляризациялық интерферометр құрастыруға болады (2-сур.). Бұл интерферометр дененің өте аз бұрышқа бұрылуын өлшеуге арналған.



2-сур. Денелердің өте аз бұрыштың бұрылуын өлшеуге арналған поляризациялық интерферометр

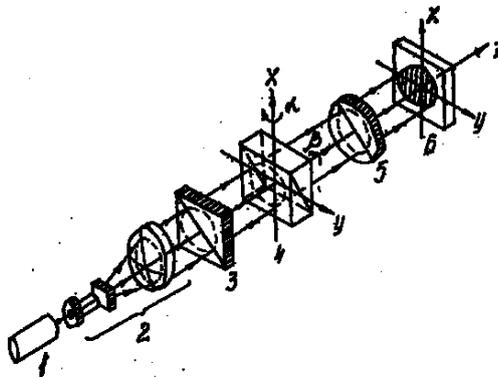
(1) лазерден шыққан жарық ағыны коллиматордан (2) өткен соң жарық бөлгіштен (3) интенсивтілігі бірдей екі сәулеге жіктеленеді. Бірінші сәуле жазық айнаға (4) қарай бағытталады, ол бақылынатын денеде орналасқан. Осы айнадан шағылып, БП (5) түседі. Екінші сәуле жарық бөлгіш (3) арқылы өтіп, ол да БП (5) түседі. Екі сәуле де БП қабырғаларына нормаль бағытта түседі. БП шығысында  $o_1, e_2$  және  $e_1, o_2$  сәулелердің арасында екі өлшегіш жолдар бағытында фотоараласу жүргізіледі. Ол үшін интерферометрдің екі жолына (6) және (10) екі анализаторлар қоямыз. Бұл анализаторлар осьтері бойынша БП қабырғасына перпендикуляр орнатылады. (7) және (9) фотоқабылдағыштар екі жолдағы сигналдарды тіркейді. (4) жазық айнаны сәл бұрған сәтте поляризациялық интерферометрдің екі жолындағы интерференциялық жолақтар өзара ығысады. Сигналдар айырымы дифференциалды күшейткішпен (8) тіркелінеді. Қондырғының сезімталдығы келесідей анықталады: өлшенетін бұрыштардың аралығы  $\alpha \approx 1,5^\circ$  болғанда интерференциялық

жолақтардың ығысуы  $\pm 0,1$  жолақ дәлдігімен өлшенгенде, бұрышты өлшеу дәлдігі  $\Delta\alpha \approx 0,1$  бұр.с. шамасындай болады.

Келесі лазерлі өлшегіш құрал — ол лазерлі-телевизиялық қондырғы (3-сур.). Оптикалық-электронды қондырғылардың контрасты-жиілікті сипаттамаларын (КЖС) бағалау үшін лазерлі интерференциялық резольвометрлер (ЛИР) құрастырылған. Оның жұмысы бір осьті кристалдардан жасалынған екілену айнымалы бұрышты қоссындырғыш призма (ЕАБҚП) және бифокалды линзалар (БЛ) қолданылатын поляризациялық ығысу интерферометрі принциптеріне негізделген. ЕАБҚП қолданылатын КЖС интерференциялық теорияда когерентті-оптикалық өрістерді метрологиялық зерттеулерде сәтті қолданысқа ие.

Өзінің қарапайымдылығымен, ықшамдылығымен және тербеліске орнықтылығымен КЖС көптеген мәселелерді жоғары деңгейде шешеді. Мысалы, төменгі және орташа кеңістік жиіліктерде (0-300 тм.сыз/мм) 100 % модуляция шамасында, интерференциялық тордың әр түрлі контрастында абсолютты өлшеулер жасай алады.

ЕАБҚП қолданылатын КЖС-да түзу интерференциялық тор құралды және оның кеңістік жиілігін біркелкі өзгертуге ЕАБҚП қасиеттері қолданылады. Призманың кірісіндегі қабырғаға түсу бұрышы өзгерген кезде  $o$ -және  $e$ -сәулелерінің арасындағы екілену бұрышы  $0 \pm 7^\circ$  аралығында өзгереді.

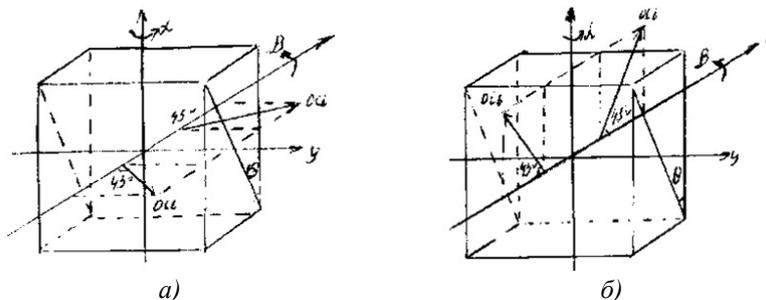


3-сурет. Лазерлі интерференциялық резольвометрдің схемасы; 1 — газды лазер; 2 — коллиматор; 3 —  $\frac{1}{4}$  пластинка; 4 — ЕАБҚП; 5 — анализатор; 6 — экран, немесе фотокабылдағыш жүйе

(1) лазер сәулесі коллиматордың (2) көмегімен кеңейтіліп параллель күйге келтіріледі. Ол  $\frac{1}{4}$  пластинка (3) көмегімен шеңберлі поляризацияланған сәулеге түрленеді. Одан соң ЕАБҚП (4) түседі. Ол айнымалы және жылжымалы қозғалыстар жасауға мүмкіндігі бар оптикалық орындыққа орналастырылған. КЖС-да ЕАБҚП-1 және ЕАБҚП-2 (4-сур.) призмалары қолданған жағдайда периоды келесідей интерференциялық жолақтар пайда болады:

$$d_1 = \lambda / \delta \operatorname{tg} \theta \sin \alpha; \quad (2)$$

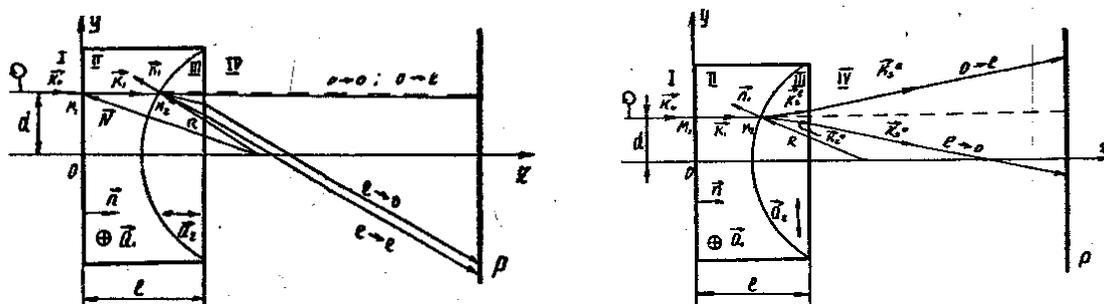
$$d_1 = \lambda \frac{\sin \alpha \operatorname{tg} \theta + \sqrt{n_e^2 - \sin^2 \alpha}}{\delta \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \alpha \sqrt{n_e^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (3)$$



4-сурет. ЕАБҚП-1 (а), ЕАБҚП-2 (б) призмалар құрылымы

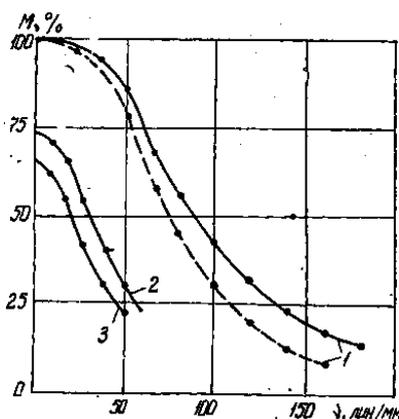
ЕАБҚП-2 қолданылатын КЖС-да  $\theta = 25^\circ$ ,  $\lambda = 632,8$  нм толқын ұзындықта интерференциялық тордың кеңістік жиілігін 0-300 тм.сыз/мм аралығында біркелкі өзгерісін қамтамасыз ете алады. Бұл кезде призmanın өзгеру бұрышы  $\alpha = 0 \div 40^\circ$  аралығында жүреді.

КЖС пайдаланудың келесі жолы — бифокалды линза БЛ-1 (5-сур., а) қолдану. Бұл жағдайда интерференциялық растр сақиналы түрде болады. Ол Френелдің аймақты сақиналары түріндегі когерентті торды береді. ЕАБҚП негізінде құрылған КЖС-мен салыстырғанда бұл қондырғы жиілікті арнайы өзгертуді талап етпейді. Себебі сақиналы растр құрылымында қажетті жиіліктер жиыны бар.



5-сурет. БЛ-1 (а), БЛ-2 (б)

Төмендегі 6-суретте КЖС сақиналы интерференциялық растрды қолдану арқылы диссектордың (электронды сәулелі қондырғы) КЖС өлшеудің нәтижесі көрсетілген.

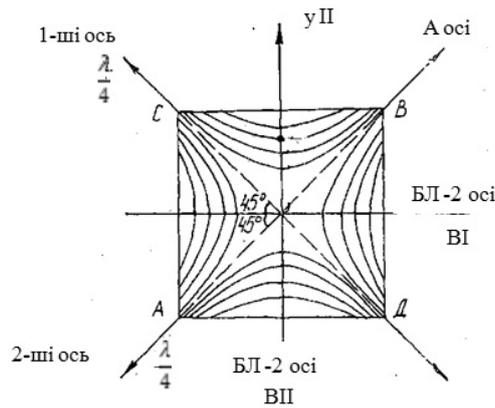


6-сурет. Диаметрі 10 мкм саңлауы бар диссектордың КЖС:

1 тұтас сызық интерференциялық әдіспен алынған; 1-үзінді сызық проекциялық әдіспен алынған  
Интерференциялық растрдың әр түрлі контрастарында алынған: 1 -  $\omega = 45^\circ$ ; 2 -  $\omega = 55^\circ$ ; 3 -  $\omega = 58^\circ$ ,  
мұндағы  $\omega$  — анализатор мен  $\vec{E}_0$  векторының (немесе  $\vec{E}_e$ ) арасындағы бұрыш.

Бұл суреттен көретініміз, интерференциялық жолақтардың контрастысының ( $M$  модуляция шамасының) кеңістік жиілікке  $v$  (сыз/мм) тәуелділігін интерференциялық әдіспен өлшеу (1тұтас сызық)  $M$ -нің жоғары мәнін береді, ал штрихты саңлаулар көмегімен алынған проекциялық әдісте бұл көрсеткіш төмен (1 үзінді сызық). Интерференциялық растрдың контрастын азайтқан жағдайда КЖС көп төмендейді (2- және 3-сызықтар). Сақиналы интерференциялық растр екі өлшемді сигналды телевизиялық каналдар арқылы тасымалдаудың сапасын талдау үшін қолданылады.

КЖС-қолданудың үшінші жолы — бифокалды линза БЛ-2 (5-сур., б) қолдану. Бұл жағдайда периодтылығы әр түрлі гипербола түріндегі интерференциялық торлар пайда болады (7-сур.). Кеңістіктік жиіліктер жиынының ішінен әр түрлі жолдар бойынша сигналдарды бөліп алуға болады. Бұндай когерентті тор телевизиялық кеңістікте бірнеше қатар арналар бойынша өлшеулер жүргізуге мүмкіндік береді.



7-сурет. БЛ-2 линзасы беретін гиперболалық растр

Сонымен қатар айтылып өткен қондырғылар поляризациялық жарықты голография алуға, оптикалық байланысты жүргізуге, ақпараттарды өңдеуге, жартылай өткізгішті лазерлердің сәулесінің бағыттылық диаграммасын анықтауға мүмкіндік береді.

Қорыта келе, бір осьті кристалдардан жасалынған линзалар мен призмалардың негізінде құрылған поляризациялық интерферометрлердің көмегімен әр түрлі мақсаттарда өлшеулер жүргізіп, тәжірибеде аса маңызды деректер алуға мүмкіндік аламыз.

#### Әдебиеттер тізімі

- 1 Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973.
- 2 Сороко Л.М. Основы когерентной оптики и голографии. — М.: Наука, 1971.
- 3 Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — М.: Сов. радио, 1988.

А.У.Умбетов, Б.С.Садыкова

### Лазерные измерительные устройства

В статье отмечено, что с развитием когерентной оптики и электроники использование кристаллооптических систем для создания лазерных измерительных устройств получило широкое развитие. Интерференция поляризованных лучей, формируемых кристаллооптическими системами в различных комбинациях, позволяет использовать их для разработки многообразных лазерных измерительных устройств. Рассмотрены примеры лазерных измерительных устройств, разработанных на основе кристаллооптических систем, приведен метод расчета распространения электромагнитных волн в кристаллооптической системе-биполяризаторе (БП) из одноосного кристалла. Получены выражения, удобные для анализа свойства БП. Выведена зависимость пространственной частоты интерференционных полос, формируемых БП, от угла падения лазерных пучков на входные грани БП.

A.U.Umbetov, B.S.Sadykova

### Lazer measuring device

The broad use of cristal-optics system for creating measuring laser devices was due to the development of optics and electronics. The author gives some examples of using laser measuring devices developed on the basis of cristal system. The method of calculation bipolarizator of electromagnetic waves has been also developed in crystalloptical system from monoaxial crystal. Convenient expressions are received for the analysis of the bipolarizator's property. Dependence of spatial frequency of the interferential strips has been formed by BP, from the angle of falling laser beams to entrance side of BP.

#### References

- 1 Born M., Volf Ye. *Basis of optiks*, Moscow: Nauka, 1973.
- 2 Soroco L.M. *Basis coherent optometrists and holography*, Moscow: Nauka, 1971.
- 3 Magdich L.N., Molchanov V.Ya. *Akustooptic devices and their using*, Moscow: Soviet radio, 1988.

---

# ФИЗИКАНЫҢ ӘДІСТЕМЕСІ

## МЕТОДИКА ФИЗИКИ

УДК 530.145

К.М.Арынгазин, Э.К.Мусенова, Т.Е.Сейсембекова

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: emusenova@mail.ru)*

### **Роль геометрических идей в нанотехнологии**

В работе показано, что нанотехнология рождена и развивается именно благодаря применению математики, главным образом геометрических идей. В качестве доказательств этих предположений рассмотрены результаты нескольких экспериментальных исследований волновых свойств электронов в нанобъектах. Эти исследования и анализ их результатов показали, что геометрические идеи, как метод построения определенных форм, пространственных отношений в нанобъектах, играют главную роль в создании различных квантовых структур и в визуализации волн и атомов нанобъектов. Результаты, полученные на основе взаимосвязи математики, нанотехнологии и фундаментальной физики, могут открывать новые возможности в познании окружающей действительности, расширить методы исследования.

*Ключевые слова:* геометрические идеи, геометрический дизайн, квантовый мираж, нанотехнология, нанобъект.

В рождении и становлении нанотехнологии выдающуюся роль сыграли и играют геометрические идеи. Например, природа создала основу и придала уникальные свойства существующей окружающей действительности. Вселенная, галактики, звезды, планеты, атомы, молекулы, элементарные частицы, микромир, макромир, растения, животные и сам человек разумный обладают определенной геометрической структурой, формой и расположением, правильной симметрией. И она (природа) заложила фундамент для развития всего этого. В дальнейшем данные природой человеку разум и логика подсказали: «на бога надейся, но сам не плошай», действуй сообразно своему уму, мышлению, деятельности. Образно говоря, материал для этого под рукой, по принципу: кирпичи есть, раствор есть строй дом по своему дизайну, усовершенствуй, наведи порядок, красоту в этом мире. Создавай невиданное, твори, дерзай, совершенствуй его. Для этого природа дала также мудрую науку — физику, математику и др. Обычно математику сравнивают с кошкой, которая играет со своим хвостом. Бог с ним, с хвостом, но математика творит чудеса. Ей все подвластно. Познав ее, человек строит мир по своему усмотрению, по законам диалектики, логики, сообразно природе. Вот так и математика — строит мир по своему образу, по законам необходимости. По существу, природа и математика — родные сестры, или еще больше: если космический разум — царь, то математика — царица. Математика — через описание мира, а физика — строительством форм, изменяя формы и их соотношения, изменяет мир. Нанотехнология один из примеров этого взаимодействия. Взаимодействие природы, математики и физики, основу которых составляют пространство, время, материя, изменяет формы материи, формы движения материи, в результате человек получает новые формы движения, новые свойства, качества, новый материал, новый метод, способ познания и дальнейшего изменения.

Мы в этой работе хотим показать, что нанотехнология рождена и развивается именно благодаря применению математики, главным образом геометрических идей. Например, гипотеза де Бройля о волновой природе веществ, гипотеза Планка о кванте света являются одними из наиболее ярких не только физических, но и геометрических идей в современной физике и по глубине и математическому содержанию представляют собой крупный вклад в развитие представлений

человечества об окружающем мире, о его строении. Этими гипотезами мы входим в первооснову мира, в его фундамент, пространство, время и материю и обнаруживаем их единство и целостность. Раз не отделимы пространство, время и материя, значит, не отделимы геометрия и физика. Нет геометрии, нет физики. Нет физики, нет и геометрии. Она форма ее существования. Это единство наглядно показано в физической реальности — так называемых нанобъектах. Изменение пространственного распределения материи и ее пространственно-временного отношения в природе создает новую структуру, новое состояние характерного, например для микромира.

В качестве доказательств этих предположений рассмотрим результаты нескольких экспериментальных исследований волновых свойств электронов в нанобъектах. В этих исследованиях геометрические идеи подсказывают, чтобы мы построили разнообразные фигуры геометрических форм из атомов, т.е. квантовых загонов, например, круговой, треугольной, квадратной, шестиугольной и др. И получили разнообразные структуры микромира. И по изменению фигуры оценивали происходящий процесс, раскрывали сущность полученных новых качеств нанокристаллов.

Данная проблема отражена в прекрасных работах Е.В.Смирнова [1]. Мы рассматриваем ее со стороны применения геометрических идей и ограничиваемся исследованием волновых свойств электрона в нанобъектах.

Многочисленные опыты по дифракции микрочастиц на кристаллах подтвердили гипотезу де Бройля и выявили волновые свойства не только электронов, но и крупных микрочастиц: нейтронов, атомов, даже крупных молекул. Все это оказалось связанным с достижением нанотехнологии с применением геометрических идей.

#### Геометрический дизайн на атомном уровне

В 1992 г. лауреаты Нобелевской премии Г.Бинниг, Х.Рорер [2] предложили техническое устройство, называемое сканирующим туннельным микроскопом (СТМ), позволяющее получить изображение атомов (железо) и на атомарно гладкой поверхности проводников (медь). Высокая чувствительность туннельного тока к расстоянию между иглой СТМ и исследуемой поверхностью дает возможность проводить исследования с высокой точностью измерения.

Одним из важных достоинств СТМ являются конструкторские функции: захватывать отдельные атомы или молекулы и осуществлять их контрольное измерение вдоль поверхности проводника, собирая при этом из них различные структуры. Это было продемонстрировано в работе [3]. СТМ может удалять ненужные атомы, перестраивать, создавая новые структуры, позволяет обнаружить и исследовать геометрические формы стоячих волн де Бройля, возникающих вблизи атома на поверхности металла. Здесь идет речь о волновых свойствах электронов, образующих электронный газ на поверхности кристалла.

Чрезвычайно высокая разрешающая способность этого прибора позволяет «увидеть» поверхностную волну, изучить картину волн электронной плотности на поверхности проводника и «руками» управлять процессом строительства геометрических структур, топографию и осуществлять дизайн на атомном уровне. Следовательно, тем самым можно проводить на атомном уровне геометрический дизайн и с помощью СТМ, собрать квантовый загон различной геометрической модификации, которые позволяют исследовать волновые свойства микрочастиц, подтвердить гипотезу де Бройля на уровне нанотехнологии. Это удалось благодаря строительству загонов с помощью СТМ геометрической формы. Выясним, что такое квантовый загон.

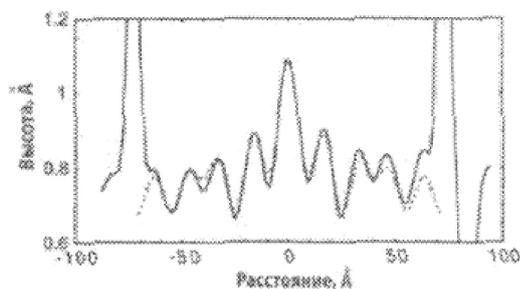
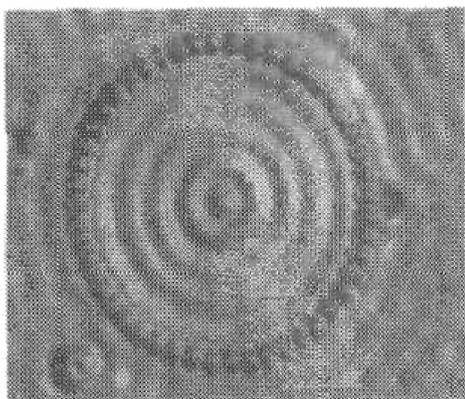
#### Геометрия квантовых загонов (потенциальных ям)

Квантовые загоны представляют замкнутые структуры, построенные СТМ из отдельных атомов на поверхности проводника, размеры которых сравнимы с длиной волны дебройлевского электрона. Они являются потенциальными ямами для электронов, попавших в загоны. На рисунке 1 представлен загон в форме окружности, состоящий из 48 атомов железа на гладкой поверхности меди [4]. Результаты эксперимента показывают, что поверхностные волны электрона внутри и вне загона обладают цилиндрической симметрией. Длина волны заметно превышает постоянную решетки и размер атома меди. Тем самым легко можно их отличить, и длина волны отвечает энергии электронов. Следовательно, СТМ дает возможность с большей точностью изучить связи геометрических форм, картины волн и происходящего физического процесса, т.е. электронную структуру поверхности кристалла по форме. Эти исследования показывают [5], что вид волновой картины сильно зависит от разности потенциалов между иглой СТМ и поверхностью кристалла меди,

т.е. от их расстояния (напр., рис. 2) [5]. Как видно из этого рисунка, изменение этой разности показывает резкое изменение картины волн от ярко выделенного в центре пика (рис. 2а) и до провала в центре (рис. 2з).

Это говорит о том, что картины этих волн зависят от геометрических форм загонов, т.е. от граничных условий, еще раз доказывая, что геометрические идеи играют большую роль в нанотехнологии. Это продемонстрировано на рисунке 3 в работе [6] — яркий пример «ручного» геометрического дизайна в нанотехнологии. Структура волнового поля для загонов отражает симметричные свойства этих геометрических фигур.

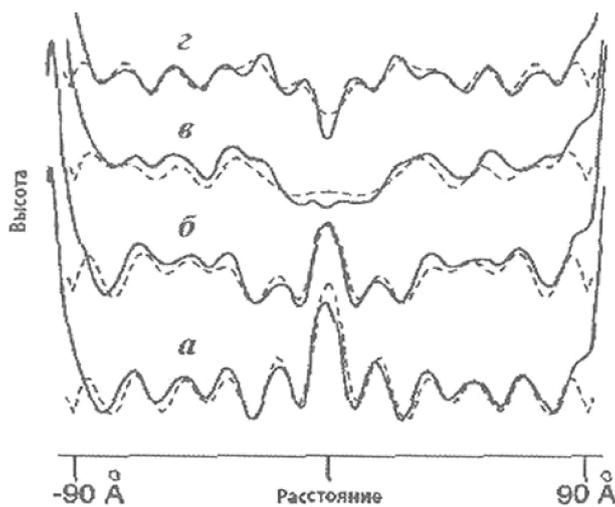
Следующим убедительным доказательством большой роли геометрических идей в нанотехнологии является так называемый квантовый мираж, появляющийся в геометрических точках, обнаруженных Н.С. Manaharan, С.Р. Lutz, D.M. Eigler [7].



СТМ-изображение загона и поверхностных волн электронной плотности внутри и вне его

Сравнение экспериментальных данных с результатами численных расчетов

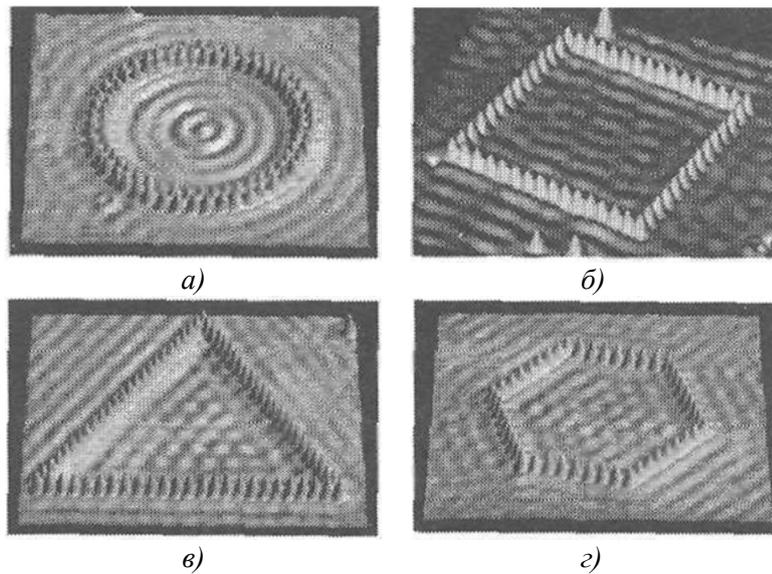
Рисунок 1. Квантовый загон из атомов железа на поверхности меди



*a* —  $V = 0.41$  В; *б* —  $V = 0.43$  В; *в* —  $V = 0.45$  В; *г* —  $V = 0.47$  В.

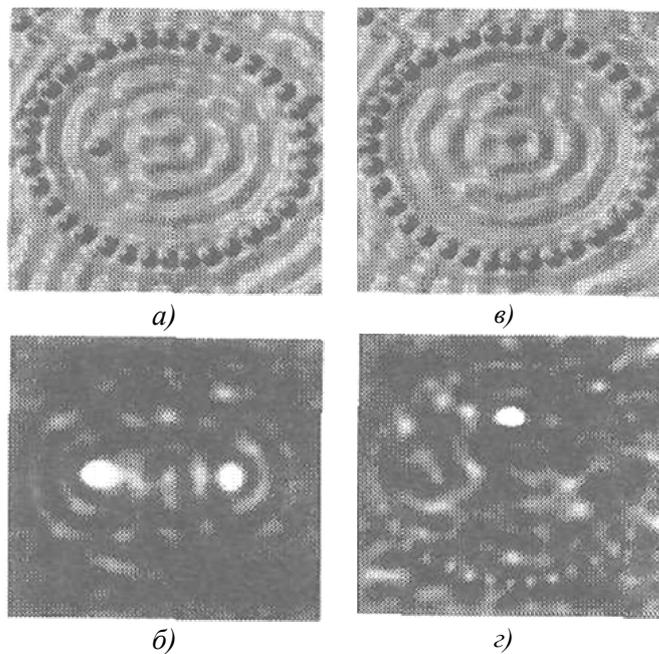
Сплошная линия — результаты эксперимента, пунктирная линия — результаты численных расчетов

Рисунок 2. Стоячие волны в круговом квантовом загоне для разных значений  $V$



а — круглый; б — прямоугольный; в — треугольный; г — шестиугольный

Рисунок 3. Структура поверхностных электронных волн внутри и вне квантового загона для различных видов загонов



а — эллиптический загон с атомом Co в левом фокусе;  
 б — изображение атома Co и его миража; в — загон с атомом Co вне фокуса;  
 г — изображение атома Co в загоне, мираж отсутствует

Рисунок 4. Квантовый мираж

#### Нелинейная геометрическая оптика в нанобъектах

Суть этого явления в следующем [7]. На атомарно гладкой поверхности меди с помощью СТМ и из 36 магнитных атомов кобальта собирают эллиптической формы загон. В один из фокусов эллипса помещается атом кобальта. Исследование показало, что от атома кобальта, помещенного в одном из фокусов эллипса загона, идет сильный сигнал, в то же время (сравнительный с ним) поступает сигнал и от пустого фокуса, где нет атома кобальта. А если атом кобальта поместить вне фокуса, то

нет дополнительного сигнала. В первом случае говорят о квантовом мираже, а во втором — о его отсутствии (рис. 4).

По мнению авторов, это явление связано. Во-первых, атом кобальта обладает значительным магнитным моментом, поэтому атом помещают в одном из фокусов эллипса. В силу эффекта Конда [8] он оказывается окруженным облаком поверхностных электронов, экранирующих его магнитный момент. Это облако дает достаточно сильный сигнал при сканировании загона иглой СТМ. Во втором фокусе, где атома нет, появившийся пик электроной плотности представляет собой «мираж» — «изображение» электронного облака, окружающего первый атом, полученное с помощью эллиптической цепочки атомов кобальта. Во-вторых, главную роль возникновения квантового миража играет когерентное расстояние поверхностной электромагнитной волны де Бройля атомами кобальта, образующими эллиптический квантовый загон.

Известно, что эллипс представляет собой геометрическое место точек, сумма расстояний от которых до фокусов эллипса постоянна. Значит, наличие максимума интенсивности во втором фокусе может быть объяснено интерференцией дебройлевских волн электронов, рассеянных на атомах загона и приходящих во второй фокус в фазе, точнее, образованием внутри загона такой стоячей волны де Бройля, которая имеет максимумы как в первом, так и во втором фокусе эллипса.

Эксперимент также показал, что изменение эксцентриситета эллипса никак не сказывается на интенсивности сигнала – миража. Таким образом, эллиптический квантовый загон обладает свойствами не только захватывать и удерживать внутри себя поверхностные электроны меди, но и фокусировать их в отдельной точке загона.

Все эти эксперименты достаточно ярко демонстрируют огромную роль геометрии в исследованиях нанотехнологий и в раскрытии сущности физических явлений, происходящих в нанобъектах. Таким образом, можно сказать, что методом геометрических идей удастся управлять физическим процессом. Это не преувеличение роли геометрических идей, а констатация фактов.

#### Заключение

Эти исследования и анализ их результатов показывают, что геометрические идеи, как метод построения определенных форм, пространственных отношений в нанобъектах (окружность, треугольник, квадрат, эллипс и т.д.) играют главную роль в создании различных квантовых структур и в визуализации волн и атомов нанобъектов. Результаты, полученные на основе взаимосвязи математики, нанотехнологии и фундаментальной физики могут открывать новые возможности в познании окружающей действительности, расширить методы исследования.

Мы ограничились рассмотрением только узкого, но очень содержательного исследования, посвященного доказательству наличия волновых свойств электронов в нанобъектах.

#### References

- 1 Smirnov E.V. *Wave properties in electronical nanoobektah* // Physical education in Russian universities, Moscow, vol. 18, № 3. 2012, p. 80–91.
- 2 Binnig G., Rohrer H. *Scanning tunneling microscopy — from birth to adolescence*. Nobel lectures in physics // U.F.N. T. 154, Vol. 2, 1988, p. 261–278.
- 3 Eigler D.M., Schweizer E.K. *Positioning Single Atoms With a Scanning Tunneling Microscope* // Nature, vol. 344, 1990, p. 524–526.
- 4 Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M. *Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metal Surface* // Science, vol. 262, 1993, p. 218–220.
- 5 Fiete G.A., Heller E.J. *Theory of quantum corrals and quantum mirages* // Rev. Mod. Phys, vol. 75, 2003, p. 933–948.
- 6 Collins G.P. *STM rounds up electron waves at the QM corral* // Physics Today, vol. 46, 1993, p. 17–19.
- 7 Manoharan H.C., Lutz C.P., Eigler D.M. *Quantum mirages formed by coherent projection of electronic structure* // Nature, vol. 403, 2000, p. 512–515.
- 8 Abrikosov A.A. *Fundamentals of the theory of metals*, Moscow: Science, 1987, p. 520.

Қ.М.Арынғазин, Э.К.Мүсенова, Т.Е.Сейсембекова

**Геометриялық ойлардың нанотехнологиядағы ролі**

Мақалада нанотехнология математиканы және геометриялық ойларды қолдану арқылы пайда болып, дамып келетіндігі көрсетілген. Осы жорамалдардың дәлелдемесі ретінде наноысандардағы электрондардың толқындық қасиеттеріне арналған эксперименттік зерттеулердің нәтижелері қарастырылған. Бұл зерттеулер және олардың нәтижелерінің талдануы геометриялық ойлар наноысандарда белгілі формаларды, кеңістіктік қатынастарды құру әдісі ретінде әр түрлі кванттық құрылым және наноысандардағы толқындар мен атомдардың визуализациясында басты рөл атқаратындығын көрсетті. Математика, нанотехнология және іргелі физиканың өзара байланыстарының негізінде алынған нәтижелер қоршаған ақиқаттықты танып-білуге, зерттеу әдістерін кеңейтуге жана мүмкіндіктер ашады.

К.М.Арынгазин, Е.К.Мусенова, Т.Е.Сейсембекова

**The role of geometric ideas in nanotechnology**

It is shown that nanotechnology is born and develops through the application of mathematics, mainly due to the use of geometric ideas. As proofs of these suppositions the results of a few experimental researches of wave properties of electrons are considered in nanoobjects. These researches and analysis of their results showed that geometrical ideas, as method of construction of definite forms. The spatial relations in nanoobjects has a main role in creation of different quantum structures and in visualization of waves and atoms of nanoobjects. The results obtained based on the relationship (interrelation) of mathematics, nanotechnology, and fundamental physics can open new opportunities in the knowledge of reality and to expand research methods.

К.Т.Үермағанбетов, Л.В.Чиркова, Үе.Т.Аринова

*Ye.A.Buketov Karaganda State University (E-mail: tchlv\_53@mail.ru)***Use of nonconventional lectures in disciplines of the specialty «Radio engineering, electronics and telecommunications»**

In article questions of development of lectures as forms of education in higher education institution are considered. Analysis of didactic and methodical literature is presented in article, the main functions of lecture are formulated. The conclusion is drawn on lectures as about the main forms of the organization of work in higher education institution. Article contains the short characteristic of nonconventional types of lectures. Authors formulated the main requirements to development and carrying out visual lecture. Concrete examples of use of visual lectures are given when carrying out studies «Microelectronics Bases» for the specialty «Radio engineering, electronics and telecommunications».

*Key words:* lecture, visualization, nonconventional forms, active methods of training, didactic principles

Lecture is the main form of the organization of educational process in higher education institution. Lecture is also main link of a didactic cycle of training. It is the most difficult type of work therefore lectures are given by only skilled teachers.

Modern researchers allocate [1, 2] in function lecture: information (lecture contains necessary data), motivational (lecture awakens interest to a subject), organizational and orientation (lecture directs attention being trained on important questions), methodological (lecture gives the analysis of the scientific theory, opens methods of scientific research and the principles of scientific search), both estimated, and developing and bringing up (lecture forms analytical thinking, develops the identity of the student, opens wide his outlook).

Practice shows that teachers not always manage to realize all listed functions of lecture. Therefore there can be a gap between ideal and real function of lecture in higher education institution. In educational process there are situations at which not to replace lecture form of education with other forms of education.

The lecture purpose — formation of approximate knowledge for the subsequent assimilation by students of a training material. Now there is a dispute on value of a lecture form of occupations in educational process. Some scientists [3, 4] consider that lecture brakes independent thinking of students, and that lecture is inefficient form of education of students.

Experience shows that refusal of lectures will lower scientific level of preparation of the being trained. Therefore lecture remains the main form of the organization of educational process in higher education institution. On the contrary the role of lecture increases in modern conditions [1, 2] and requirements to lecture at the same time increase. Today lecture has to be differentiated, multipurpose. Lecture has to carry out information, methodological, estimated functions, it has to develop and bring up students. Therefore value of the organization of study of students at lecture, after lecture increases and by preparation for lecture. The lecturer has to be able to prepare and give lecture and to prepare for it students. Teachers solve today a new problem of formation of study of students. The humanization and development of a modern education system stimulated development of the active methods of training (AMT).

Active training treat: compulsory activity of thinking steady and a long involvement of trainees in educational process, increase of degree of motivation and emotionality of trainees, independent development of decisions, and, at last, interaction of trainees and teacher (realization of straight lines and feedback). Today active training is one of the main directions of pedagogical researches.

New forms belong to AMT, methods and tutorials It is innovative active lectures, seminars discussions, business games, methods of mathematical modeling, academic year and degree projects etc. [1, 2]. Experience of use of active training shows that in comparison with traditional training it helps to solve problems of professional education.

The special place among AMT is taken by innovative types of lectures, such, as problem lectures, visual lectures, «lectures together», lectures of a press conference, lecture dialogues, lecture discussion, etc. [3, 4]. All listed lectures can supplement traditional lecture [1, 2]. Besides, new forms assume development of author's lecture courses.

Let's consider short characteristics of nonconventional forms of carrying out lectures.

Problem lecture begins with questions, statement of a problem which needs to be solved. Such lecture enters new knowledge as unknown for listeners. Therefore received information is acquired as personal opening. It distinguishes problem lecture from traditional lecture.

Visual lecture gives the main contents in the form of images (in drawings, schedules, charts, schemes, etc.). Visualization in this case is way for thinking activity. It also a way of information transfers through change of a code with various sign systems.

«Lecture together» is a work of two teachers who lecture on the same subject and cooperate with each other and with audience.

Lecture a press conference is a lecture which is formed concerning audience, thus lecture can be to give some teachers or being trained.

Lecture with the planned mistakes or lecture provocation is lecture for ability development quickly to analyze professional situations, to play a role of the expert, the opponent.

Lecture dialogue is a direct contact of the teacher with audience. Lecture allows to draw attention of listeners to important questions of a subject, to consider features of trainees.

Lecture discussion assumes a free exchange of opinions at a statement of a training material.

All these types of lectures show transition from classical lecture to modern forms of lectures. It means that lecture it isn't simple information transfer, and process of creative theoretical thinking. Such process increases a role of students in the course of training and increases also value of dialogue with the teacher during reading lecture. It is of great importance for formation of professional qualities of experts. This factor matters for modern Kazakhstan therefore our universities pass to credit technology of training. And at credit technology of training the number of lectures in curricula of educational programs is sharply reduced.

In work of higher education institutions of Kazakhstan when lecturing the traditional information form at which the teacher imparts to students ready knowledge through a monologue is used. But already noncon-

ventional forms of carrying out lecture occupations are even more often used also. Modern educational process demands from graduates of universities existence such quality, as competence and mobility. Students of a technical profile of preparation have pragmatic approach to education. They consider that practical knowledge and abilities are important. Therefore they want to study disciplines which will help them with a profession. Such students don't want to study theoretical disciplines, they consider them uninteresting. Therefore teaching of basic theoretical disciplines demands formation of internal motivation from students. It is necessary to put emphasis on studying of theoretical disciplines. In educational process there can be a contradiction between needs for assimilation of missing knowledge and real opportunities of satisfaction of these requirements. The task of the teacher consists in stimulation and management of activity of students. The success in this process depends on methods of development of discipline. Visual lectures are atypical for our universities. Their use helps to awaken interest to knowledge in students. For success of it like lectures students have to have a personal experiment on work with information.

In visual lectures the traditional didactic principle of presentation is realized in a new way. Results of psychological and pedagogical researches testify that presentation promotes successful perception and storing of a training material and allows to stir up cerebration of the being trained. Because process of studying joins both cerebral hemispheres of the person. Existence of visual information strengthens work of the right hemisphere of a brain which is responsible for figurative and emotional perception of the world. Results of use of bright examples confirm an important role of an image in activity of the person.

Visualization allows information to act in an evident image. In modern science and equipment visualization is one elements of processing of difficult information, for example, when we speak about a spatial structure of objects. The visualization for the explanation of such phenomena, as temperature, electromagnetic fields, etc. is effectively used.

Methods of visualization share on data presentations in one, two or three measurements. Distribution was gained by two-dimensional visualization — the image on the plane, on a sheet of paper or on the screen. At the same time the great value is got by methods volume (3D) — visualization. The main methods of visualization treat: drawings, schedules, charts, photos, cards. Great opportunities to users are given by computer visualization (rendering).

Visual lecture teaches students to transform oral and written information to a visual form. This process forms at them professional thinking, teaches students of systematization. «Image» can form for students a basis for cogitative and practical actions. As a result preconditions for development of professional qualities at students are created: they can structure information, work with information in the form of schedules, schemes, tables.

Visual lecture helps to create problem situations and to include vigorous cogitative activity of students. They learn to carry out the analysis, synthesis, generalization, and folding or information expansion. The teacher has to use such forms of education which supplement verbal information. The more in information, the cogitative activity of students is higher than problems.

In visual lecture the didactic principle of availability is realized. Such lectures help to integrate visual and verbal perception of information. The main difficulty of perception of a training material is connected with assimilation of abstract concepts, the phenomena, and processes. Visualization helps to overcome this difficulty and gives to abstract concepts evident character.

Visual lectures have features. The content of such lecture is oral information which is transformed to a visual form. Therefore the teacher has to create, pick up, and make demonstration materials, for addition of oral information.

Preparation of such lecture demands reconstruction, and information code conversion in a visual form with use of technical means of training. The teacher has to give comments of materials of lecture and provide systematic of knowledge.

In lecture visualization an important role is played by logic, a rhythm and giving of a training material, and also skill and style of communication of the teacher with students. In modern pedagogical and methodical literature of [1, 2] lectures visualization recommend to use at the beginning of studying of disciplines.

Lectures visualization is widely used by authors of article in their pedagogical activity. All lecture classes in disciplines of the specialty «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» — a basis of

quantum electronics, a microelectronics basis, optoelectronics teachers read in the visualized form in the Kazakh and Russian languages.

Teachers read all listed disciplines on 3 and 4 courses and therefore the task of teachers is facilitated: students on 3 and 4 courses are able to conduct records of lectures and well perceive a training material. Thus lecturers use special methodical receptions for relief of perception of training material students. So, in the course of lecturing teachers recommend educational and methodical literature, scientific monographs and articles; use interesting examples; give laboratory and practical classes. Besides, teachers use different opportunities for demonstration of communication of a training material with practice.

The form of lectures imitates professional situations in which students need to estimate a large number of information.

The technique of reading such lectures demands preliminary preparation of visual materials according to the content of lecture. Authors of article in the work use the slides issued in Power Point, different types of chips, printing posters, etc.). In preparation of materials participate both teachers, and students and it helps students to create information. For this purpose to students before lecture tasks on preparation of evident materials on lecture are given.

It is possible to give fragments of some lectures on discipline as an example of «A microelectronics basis», the specialty «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» entering into the working curriculum.

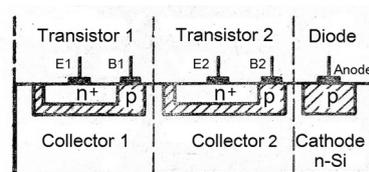
The discipline of «A microelectronics basis» in its classical understanding, consists of three equivalent sections: physical, technological and circuitry bases [5–7].

The subject «Elements of Integrated Schemes» belongs to the section of technological bases of microelectronics. In lecture on the specified subject questions are considered: Isolation of elements (isolation by dielectric; isolation of back displaced p-n-of transition; the combined ways of isolation); N-p-n Transistors (configuration and working parameters; parasitic parameters); Versions of n-p-n-of transistors (many emitter transistor; the transistor with Schottky's barrier; super beta transistor); P-n-p Transistors.

In lecture graphic visualization (the slides executed in Power Point) is used.

Stages of a production cycle of creation of elements of integrated schemes difficult for understanding and perception of students also demand high level of abstract thinking. In lecture these processes are divided into stages, illustrated by schemes and drawings, and it helps students to understand them. So, at an explanation of the reasons of existence of internal communication between elements of the bipolar integrated schemes (IS) the scheme is provided.

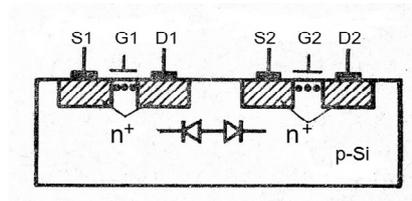
*Internal communication of elements of bipolar IS  
for lack of isolation*



Transistors 1 and 2 and the diode are executed in the general silicon substrate. Collectors of transistors and the cathode of the diode are connected

At an explanation of one of important advantages of MDP (metal-dielectric-semiconductor) — transistor IS in comparison with bipolar, consisting that in MDP — transistor IS isolation of elements isn't required and therefore MDP — transistors it is possible to have close from each other, the scheme on which lack of communication between elements MDP-transistors of IS shown is provided:

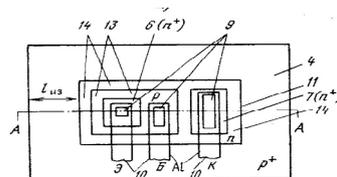
*Lack of communication between elements IS  
MDP-transistors*



Sources and drains of adjacent transistors are divided by opposite included p - n - transitions. Therefore galvanic communication between elements is caused by small return currents of transitions

Further the structure of the epitaxial and planar transistor in different projections (the top view, sideways) is considered:

*Structure of the epitaxial and planar transistor  
(top view)*



4 — Isolating area of p-type; 6 — Emitter area; 7 — Collector area; 10 — Contact openings; 11 — Lateral surfaces of p - n-transition; 13, 14 — passive areas of base and the collector, not taken with contacts; L — Width of isolating area

According to the plan of lecture transistors with dielectric isolation are considered; ways of isolation by dielectric (epic — process, the SS (silicon on sapphire) technology, the SI (silicon on an insulator) technology. In detail the sequence of the main technological operations used in isoplanar technology and a standard production cycle of creation of integrated n-p-n-of the transistor with the hidden layer by a method of dividing diffusion reveals. Further the lecturer passes to many emitter transistors (MET) and emphasizes features of MET as uniform structure.

All listed questions are difficult and can't be presented by means of natural experiments. Therefore use of receptions of visualization will help students to understand processes, their stage-by-stage realization and value in microelectronic technology.

The analysis of use of visual lecture allows drawing the following conclusions. Such lectures create peculiar “basis” for thinking, develop skills of evident modeling. It helps to increase the intellectual and professional potential of students.

The choice of ways of achievement of the purposes set in lecture and types of presentation depends on a subject. At a statement of big lectures on volume it is expedient to use a combination of different types of presentation. For example, schemes are universal, but means of presentation rather difficult for perception. Therefore as a basis for their designing it is necessary to use drawings because drawings help students to remember and comprehend information well.

Experience of authors proved that the main complexity in preparation of visual lectures consists in a choice of means of presentation, their creation and direction of all lecture. Big role the graphic design, color, an optimum combination of words and visual information, technical means and traditional evident materials here carry out, skill and style of communication of the lecturer with audience.

Besides, application of lectures of this type has to consider psycho physiological opportunities of students.

## References

- 1 Zagvyazinskiy V.I. *Training Theory: modern interpretation*, Moscow: Academia, 2008.
- 2 Zagvyazinskiy V.I. *Pedagogical dictionary*, Moscow: Academia, 2008.
- 3 *Pedagogics and psychology of the highest school*. Manual / Under M.V.Bulanova-Toporkova edition: Rostov-on-Don: Phoenix, 2002.
- 4 Borisov H.B., Solovyeva A.A. *New technologies of training: blitz games and nonconventional lectures: method. grant.*, Moscow: UTsPK, 1992.
- 5 Stepanenko I.P. *Bases of microelectronics*, Moscow: Laboratory of Basic Knowledge publishing house, 2001.
- 6 Yefimov I.Ye., Kozyr I.A. *Bases of microelectronics*, Moscow: Lan, 2008.
- 7 Margolin V.I. *Physical bases of microelectronics*, Moscow: Academia, 2008.

Қ.Т.Ермағанбетов, Л.В.Чиркова, Е.Т.Аринова

### **«Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» оқу бағдарламасының пәндерінде дәстүрлі емес дәрістерді қолдану**

Жоғары оқу орындарында дәріс сабағын дамыту мәселесі қарастырылған. Дидактикалық, әдістемелік әдебиеттерді талдау арқылы жоғары оқу орындарындағы оқу үдерісінің негізгі түрі болып табылатын дәріс сабағының негізгі міндеттері талданған. Дәстүрлі емес дәріс түрлеріне қысқаша сипаттама берілген. Дәрісті көрнекі етудің негізгі талаптары келтірілген. «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы бойынша оқылатын «Микроэлектроника негіздері» пәнінің дәріс сабағын көрнекілеудің нақты мысалы берілген.

К.Т.Ермағанбетов, Л.В.Чиркова, Е.Т.Аринова

### **Использование нетрадиционных лекций в дисциплинах образовательной программы «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»**

Рассмотрены вопросы развития лекционной формы обучения в вузе. На основе анализа дидактической и методической литературы сформулированы основные функции лекции, как основной организационной формы, используемой в вузе. Даны краткие характеристики нетрадиционным видам лекций. Сформулированы основные требования к разработке и проведению лекции-визуализации. Приведены конкретные примеры использования лекций-визуализаций при чтении дисциплины «Основы микроэлектроники» для специальности «Радиотехника, электроника и телекоммуникации».

## Список литературы

- 1 *Загвязинский В.И.* Теория обучения: современная интерпретация. — М.: Academia, 2008.
- 2 *Загвязинский В.И.* Педагогический словарь. — М.: Academia, 2008.
- 3 Педагогика и психология высшей школы: Учеб. пособие / Под ред. М.В.Булановой-Топорковой. — Ростов н/Д.: Феникс, 2002.
- 4 *Борисова Н.В., Соловьева А.А.* Новые технологии обучения: блиц-игры и нетрадиционные лекции: Метод. пособие. М.: УЦПК, 1992.
- 5 *Степаненко И.П.* Основы микроэлектроники. — М.: Изд-во «Лаборатория базовых знаний», 2001.
- 6 *Ефимов И.Е., Козыр И.Я.* Основы микроэлектроники. — М.: Лань, 2008.
- 7 *Марголин В.И.* Физические основы микроэлектроники. — М.: Академия, 2008.

---

## АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Akhmadiyev, B.A.** — Lecturer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Antoshchenko, V.S.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Head of lab of compounds A3B5, Research Inst. of exper. and theoret. phys., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.
- Arinova, Ye.T.** — Undergraduate, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Aryngazin, K.M.** — Doctor, professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Chirkova, L.V.** — Candidate of technical sciences, docent, professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Dyomina, I.A.** — Candidate of physical and mathematical sciences, the associated professor, the East Kazakhstan State University of S.Amanzholov, Ust-Kamenogorsk.
- Eirikh, V.I.** — Head teacher, Karaganda State Technical University.
- Francev, Yu.V.** — Assistant of Physics and Mathematics, Research Institute of Exper. and Theoret. Phys., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.
- Guchenko, S.A.** — Engineer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Ibrayev, N.Kh.** — Director of Institute of molecular nanophotonics doctor of physical and mathematical sciences, professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Ismailov, Zh.T.** — Candidate of physical and mathematical sciences, docent, Chair of the Department, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Kolesnikov, V.A.** — Junior Researcher, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Kussainov, K.** — Doctor, professor, Chair of the Department, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Kuzhukhanova, Zh.A.** — First-year graduate student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Laurinas, V.Ch.** — Candidate of physical and mathematical sciences, docent, Chair of the Department, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Lavrishev, O.A.** — Candidate of physical and mathematical sciences, docent, Director of Research Inst. of exper. and theoret. phys., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.
- Markidonov, A.V.** — Candidate of physical and mathematical sciences, department chair of Novokuznetsk branch of Tomsk Polytechnical University, Branch of the Kuzbass State Technical University, Russia.
- Mekhtiyev, A.D.** — Candidate of Technical Sciences, Docent, Chair of the Department, head of the Technologies and systems of telecommunications department, Karaganda State Technical University.
- Musenova, E.K.** — Candidate of physical and mathematical sciences, docent, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Obidina, O.V.** — The assistant Scientific degree, the Belarussian-Russian university, Mogilev, Belarus.
- Orazgaliyev, G.Sh.** — Candidate of Technical Sciences, senior teacher, chair of Technology and communication systems, Karaganda State Technical University.
- Popova, G.V.** — Candidate of physical and mathematical sciences, the associated professor, East Kazakhstan State University of S.Amanzholov, Ust-Kamenogorsk.
- Sadykova, B.S.** — Teacher of faculty of Natural Sciences and informatizations, Arkalyk State Pedagogical Institute after I.Altynsarin.
- Samodelkina, S.V.** — Senior teacher, Almaty university of power and communication.
- Sejsembekova, T.Ye.** — Undergraduate, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

- Seliverstova, Ye.V.** — PhD student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Seysenbayeva, G.S.** — Master student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Shuyushbayeva, N.N.** — PhD student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Starostenkov, M.D.** — Doctor of physical and mathematical sciences, professor, Chair of the general physics, Altay State Technical University of I.I.Polzunov, Barnaul, Russia.
- Tatkeyeva, G.G.** — doctor of technically sciences, professor, director, Institute of Telecommunications, Energy drinks and Automatic equipment, Karaganda State Technical University.
- Umbetov, A.U.** — Assistant of Physics and Mathematics, dean of faculty of Natural Sciences and informatizations, Arkalyk State Pedagogical Institute after I.Altynsarin.
- Yermaganbetov, K.T.** — Candidate of physical and mathematical sciences, docent, professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Yugai, V.V.** — Master, head teacher, Karaganda State Technical University.
- Yurov, V.M.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Docent, Ye.A.Buketov Karaganda State University; Director of Research Centre for ion-plasma technologies and modern instrumentation, Karaganda.
- Zakharov, P.V.** — Post-graduate student, Altay State Technical University of I.I.Polzunov, Barnaul, Russia.
- Zakiyev, D.M.** — First-year graduate student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Zavatskaya, O.N.** — Engineer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Zharekeshev, I.Kh.** — Doctor of physical and mathematical sciences, Associate professor, Leading researcher, Research Institute of Exper. and Theoret. Phys., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.
- Zhuandykova, G.A.** — Lecturer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.